

2.0 μm 波段掺铥连续单频光纤激光器的研究进展

杨昌盛¹, 陈 丹¹, 赵齐来¹, 冯洲明^{1,2,3}, 钱 奇^{1,2,3}, 杨中民^{1,2,3}, 徐善辉^{1*}

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;

³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 介绍了 2.0 μm 波段掺铥连续单频光纤激光器的实验研究进展, 以实现单频光纤激光器的关键技术为主线, 总结了不同腔结构掺铥单频光纤激光振荡器的研究现状与发展方向。基于种子源主振荡功率放大(MOPA)结构进行了单频激光器功率放大, 介绍了高功率掺铥单频光纤 MOPA 激光器的国内外研究进展。此外, 介绍了本课题组在高掺杂铥锗酸盐玻璃光纤制作, 2.0 μm 波段单频光纤激光振荡器构建, 以及单频激光功率放大方面的部分研究工作。

关键词 激光器; 2.0 μm 波段; 单频激光器; 掺铥锗酸盐玻璃光纤; 主振荡功率放大

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0201006

Research Progress of 2.0 μm -Band Tm-Doped Continuous Wave Single-Frequency Fiber Lasers

Yang Changsheng¹, Chen Dan¹, Zhao Qilai¹, Feng Zhouming^{1,2,3}, Qian Qi^{1,2,3},
Yang Zhongmin^{1,2,3}, Xu Shanhui¹

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

²Guangdong Provincial Engineering Technology Research and Development Center of Special Optical Fiber Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

³Guangdong Provincial Key Laboratory of Fiber Laser Materials and Applied Techniques, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China

Abstract The experimental research progress of 2.0 μm -band Tm-doped continuous wave (CW) single-frequency fiber laser is introduced. With a focus on the key technologies in realizing the single-frequency fiber lasers, the present research status and development directions of the Tm-doped single-frequency lasers with different cavities are summarized. Based on master-oscillator power amplifier (MOPA) of laser seeds, the power amplification of single-frequency lasers is realized and the research progress of high-power Tm-doped single-frequency fiber MOPA lasers at home and abroad is summarized. In addition, some research works in our research group related to the fabrication of highly Tm-doped germanate glass fibers, the construction of 2.0 μm -band single frequency laser oscillators, and the power amplification of single-frequency lasers are presented.

Key words lasers; 2.0 μm -band; single-frequency lasers; Tm-doped germanate glass fiber; master-oscillator power amplification

OCIS codes 140.3070; 140.3280; 140.3510; 140.3460

收稿日期: 2016-09-27; 收到修改稿日期: 2016-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(11674103, 61635004, 61535014)、广东省自然科学基金(2016A030310410, S20120011380)、中央高校基本科研业务费项目(2015ZP013, 2015ZM091)

作者简介: 杨昌盛(1982—), 男, 博士, 工程师, 主要从事光纤激光器、单频光纤激光应用方面的研究。

E-mail: mscsyang@scut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: flxshy@scut.edu.cn

1 引 言

2.0 μm 波段连续单频光纤激光器可输出单一纵模的激光,具有光谱线宽窄、相干长度长、噪声低、波长可调谐、结构紧凑等优点,在高分辨率光谱学、非线性光学、激光雷达、光动力疗法和无创医学等领域有着广泛的应用前景^[1-6]。2.0 μm 波段单频激光器的工作波长集中在 1.7~2.1 μm ,覆盖了 H_2O 、 CO_2 等大气气体的吸收带,还可以作为光学参量振荡器(OPO)的抽运源来实现 3~5 μm 波长的激光输出^[7-8]。此外,2.0 μm 波段单频光纤激光器的非线性效应的阈值比传统 1.0 μm 波段单频激光器的高,在窄线宽、高功率和高能量激光输出方面具有较大优势^[9-10]。

实现光纤激光器单纵模运转(单频)的主要结构有环形腔、线性腔和复合腔,其中环形腔和线性腔是最基本的结构^[11-16]。环形腔的腔长较长,结构较复杂,缺乏有效的选频机制,容易出现跳模现象^[17];线性腔结构简单,转换效率高,工作稳定,不易跳模,通常采用短直法布里-珀罗(F-P)谐振腔形式。短线性腔主要包括分布反馈型(DFB)和分布布拉格反射型(DBR)两种结构^[18-24],其中 DFB 结构主要通过在一端稀土离子掺杂有源光纤上直接刻写相移光栅来构成谐振腔,DBR 结构一般两端为光纤布拉格光栅、中间为稀土离子掺杂有源光纤。当前研究报道较多的 2.0 μm 波段单频光纤激光器多为以掺铥(Tm)石英光纤作为增益介质的短线性腔结构,虽然可以实现稳定的单纵模运转,得到千赫兹量级的单频激光输出,但输出功率通常仅为几毫瓦,转换效率较低^[25-28]。

短腔结构要求使用的增益介质具有较高的增益系数以实现高效的单频激光输出,即需要最大限度地提高光纤中的稀土离子铥的掺杂浓度。传统石英玻璃基质的红外透射范围较窄(约 3.5 μm)、声子能量较高(约 1100 cm^{-1}),且对稀土离子的溶解度较小,其掺杂浓度很难得到进一步提高。与之相比,多组分玻璃对稀土离子具有更好的溶解度,且未发现高掺杂稀土离子引发的荧光猝灭现象^[29-31]。如掺铥锗酸盐玻璃光纤(TGF)可将传统线性腔中增益介质的长度缩减至厘米量级,腔内相邻纵模间隔达几个吉赫兹,可直接从腔内实现 0.1 W 的窄线宽单频激光输出^[32-33]。

由于单一振荡器或谐振腔直接输出功率有限,为提高 2.0 μm 波段单频光纤激光器的输出功率,一般采用种子源主振荡功率放大(MOPA)技术方案。使用小功率 2.0 μm 波段单频激光器作为主振荡种子源,使用多级掺铥光纤放大器结构进行功率放大,可以获得数百瓦乃至上千瓦的高功率连续单频激光输出^[3,9-10]。

本文总结了不同腔结构掺铥单频光纤激光振荡器的研究现状与发展方向,基于 MOPA 结构进行了单频激光器功率放大,总结了高功率掺铥连续单频光纤 MOPA 激光器的国内外研究进展。

2 TGF 的研制

受激发射截面和吸收截面是稀土离子掺杂光纤激光器的两个重要参数,直接影响着激光器的荧光输出。图 1(a)为掺铥锗酸盐玻璃基质的吸收截面,可以发现 Tm 的 6 个吸收峰波长分别为 1665,1208,791,685/662,465,355 nm,这些吸收峰分别对应基态 $^3\text{H}_6$ 的 6 个能级 $^3\text{F}_4$ 、 $^3\text{H}_5$ 、 $^3\text{H}_4$ 、 $^3\text{F}_2/{}^3\text{F}_3$ 、 $^1\text{G}_4$ 和 $^1\text{D}_2$ 。因此,可以选择吸收较强的 793 nm 或 1210 nm 作为抽运波长。图 1(b)为掺铥锗酸盐玻璃基质的受激发射截面,其峰值为 $4.83 \times 10^{-21}\text{ cm}^2$,位于 1.845 μm 附近。由图可以观察到,发射谱半峰全宽较宽,3 dB 带宽达到

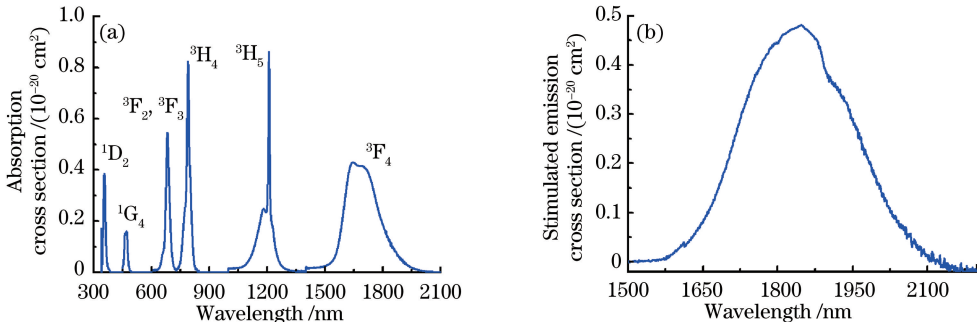


图 1 掺铥锗酸盐玻璃的(a)吸收截面和(b)受激发射截面

Fig. 1 (a) Absorption cross section and (b) stimulated emission cross section of Tm-doped germanate glass

250 nm,具有稀土离子在玻璃中的典型特性^[30,34-35]。

钨酸盐玻璃的机械性能明显优于其他类型的多组分玻璃(磷酸盐、碲酸盐玻璃等)^[30,36-37]。可以利用机械加工方法将大块钨酸盐纤芯/包层玻璃分别加工成芯棒和玻璃套管,将芯棒插入到套管中,用管棒法制备光纤预制棒。光纤预制棒在拉丝塔的加热炉中加热,拉丝温度约为 1000 °C,在此温度点,棒体尖端的黏度变低,在自身重力作用下逐渐下垂变细而成纤维,进而快速拉制出 TGF。研究发现,光纤拉制过程中的拉丝温度、拉丝速度与光纤尺寸和质量之间的关系影响 TGF 的质量。

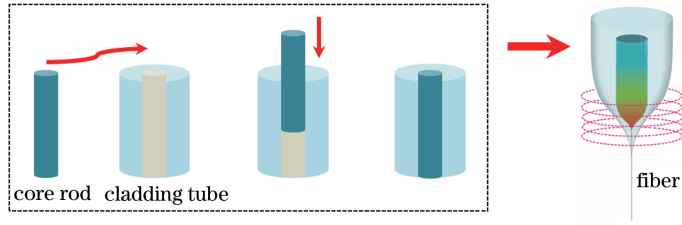


图 2 管棒法制作光纤示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fiber fabrication by rod-in-tube method

在钨酸盐纤芯玻璃中均匀掺杂稀土离子铥,掺杂浓度为 5.1%(物质的量分数)。测得其能级 $^3F_4-^3H_6$ 的荧光寿命为 4.1 ms,在 1950 nm 波长处的吸收截面和受激发射截面分别为 $0.21 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 和 $2.95 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 。其他光学参数为:数值孔径 0.145,归一化频率 2.01,纤芯直径 $8.6 \mu\text{m}$,包层直径 $(125 \pm 1) \mu\text{m}$ 。

以 1568 nm 光纤激光器作为抽运源,使用 1950 nm 单频光纤激光器作为信号光源,当 TGF 长度为 8 cm 时,在不同注入信号光功率 P_s 条件下,TGF 增益与吸收的抽运功率之间的关系如图 3 所示,内插图为使用电荷耦合器件(CCD)成像系统测量的 TGF 横截面。可以看出,在 1950 nm 波长处,TGF 的单位长度增益最高可达 3.1 dB/cm。此外,用截断法测量了 TGF 的传输损耗。选取一段约 2 m 长的钨酸盐玻璃光纤,绕成直径为 4~5 cm 的光纤圈,将其浸泡在折射率匹配液中以剥离光纤中的包层膜;在 1310 nm 波长处测得 TGF 的传输损耗小于 0.05 dB/cm。

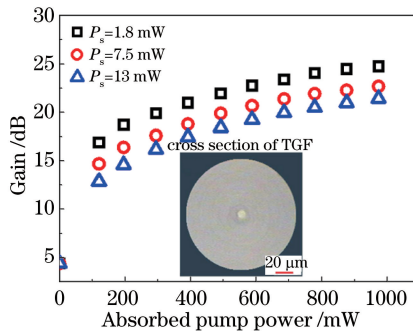


图 3 TGF 增益与吸收的抽运功率之间的关系

Fig. 3 Relationship between gain and absorbed pump power of TGF

3 掺铥连续单频光纤激光振荡器研究进展

3.1 环形腔单频光纤激光器

选频结构是环形腔单频激光器最重要的部分,一般包括光栅、法布里-珀罗(F-P)腔、萨尼亚克环、马赫-曾德尔滤波器和饱和吸收器(SA)等^[38-43],其核心是基于各种光学效应构建带宽尽可能窄的滤波单元,以便有效选择单一纵模。关于环形腔结构的 $2 \mu\text{m}$ 波段单频光纤激光器的研究报道较少。早在 1991 年, Park 等^[44]采用光纤 F-P 滤波器(FFP)进行选频,实现了单频光纤激光输出。实验装置原理如图 4 所示,其中 WDM 为波分复用器,NB-FFP 为窄带 FFP,WB-FFP 为宽带 FFP,偏振控制器(PC)用于调整谐振腔内的偏振态;激光器的谐振腔腔长为 15 m,相应的自由光谱范围为 14 MHz;激光器的激射阈值为 10 mW,通过调节加载在 WB-FFP 上的电压,可以有效调谐激光输出波长,调谐范围可达 30 nm。

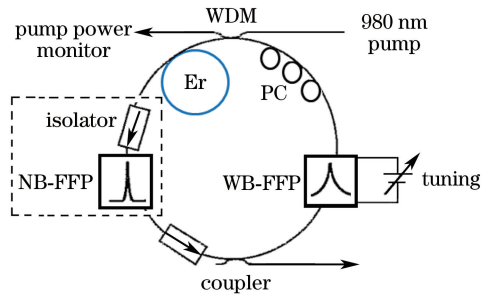


图 4 环形腔结构单频光纤激光器实验装置原理图^[44]

Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup of ring-cavity single-frequency fiber lasers^[44]

环形腔结构比线性腔结构更加灵活,能够使用较长的有源光纤作为增益介质,因而可以从振荡器内获得较高功率的单频激光输出。He 等^[45]利用自制的高掺杂铥锆酸盐玻璃光纤制作环形腔结构,实现了 $2\ \mu\text{m}$ 波段可调谐窄线宽单频激光输出。使用单模 1568 nm 光纤激光器作为抽运源,实验中用到了两段 TGF,一段长 14.5 cm,用作增益介质;另一段长 6.8 cm,用作饱和和吸收器。振荡器由两段 TGF、环形器、可调光纤布拉格光栅(FBG)等构成,其中 FBG 作为输出耦合腔镜,其 3 dB 带宽为 0.06 nm,在波长 1950 nm 处的反射率为 83.4%。实验装置原理图如图 5 所示。

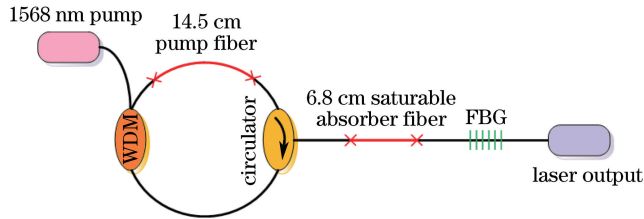


图 5 掺铥窄线宽单频光纤激光器实验装置原理图^[45]

Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup of Tm-doped narrow-linewidth single-frequency fiber lasers^[45]

在实验过程中,当两束方向相反、频率相近的激光在锆酸盐玻璃光纤饱和和吸收器中形成稳定的驻波场时,该驻波场会造成锆酸盐玻璃光纤折射率的周期性变化,形成类光栅结构,该结构起到滤波、窄化激光线宽的作用,可实现单一纵模输出。激光器的激射阈值为 80 mW,当吸收的抽运功率为 680 mW 时,激光器的最大输出功率为 206 mW,斜率效率为 34.8%,如图 6(a)所示。此外,测得激光器的中心波长为 1950.06 nm,信噪比大于 68 dB。实验采用 3 km 光纤延迟线,采用零拍法测量了激光器的线宽;通过测量频率噪声谱进一步提高测量精度,使激光器的线宽小于 3 kHz。通过在 FBG 上施加不同的应力以调谐输出激光的波长,实现了 1949.55~1951.23 nm 的调谐范围和 1.7 nm 的调谐带宽,如图 6(b)所示,其中 λ_c 为调谐中心波长。可以发现,输出激光的中心波长随着应力的改变呈线性变化,斜率为 1.25 nm/N。

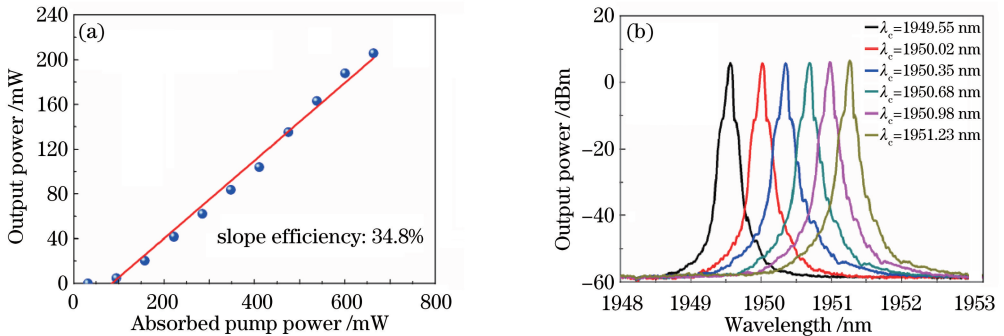


图 6 (a)输出功率与吸收的抽运功率之间的关系曲线;(b)单频光纤激光器的输出光谱^[45]

Fig. 6 (a) Relationship between output power and absorbed pump power; (b) output spectra of single-frequency fiber lasers^[45]

3.2 短腔单频 DBR 光纤激光器

单频 DBR 光纤激光器结构简单、紧凑,受外界影响较小,易于改进,因此其输出激光性能(噪声、线宽、稳定性等)优于传统固体激光器。2007 年, Geng 等^[32]率先在基于 DBR 结构的 2.0 μm 波段单频光纤激光器研究方面取得突破。在 805 nm 抽运波长和 170 mW 抽运功率条件下,利用一段 2 cm 长的 TGF 在 1893 nm 波长处获得了 50 mW 功率的单频激光输出,斜率效率为 35%。实验中所用增益光纤的铥离子掺杂浓度为 5%(质量分数)、纤芯直径为 7 μm 、数值孔径为 0.15。激光器的反馈部分由两个长度为 1 cm、刻写在商用单模石英光纤上的 FBG 构成,其中作为输出腔镜的窄带保偏(PM)FBG 的带宽为 0.1 nm,中心波长处的反射率为 90%,宽带 FBG 带宽也为 0.1 nm,中心波长处的反射率大于 99%。Geng 等^[32]使用迈克耳孙干涉仪测量了激光器的频率噪声,实验装置原理如图 7 所示,其中 HR 表示高反射,并根据此频率噪声估计出激光器的线宽约为 3 kHz。

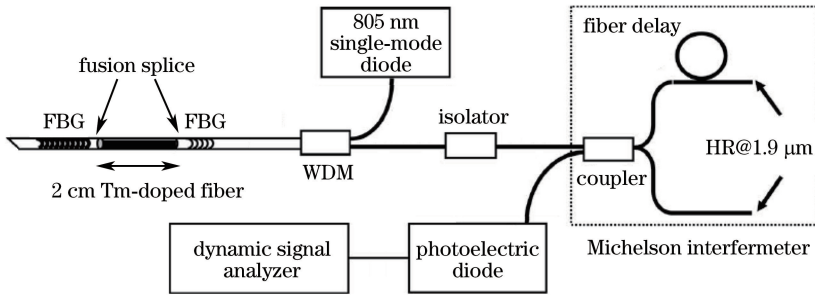


图 7 激光器的频率噪声测量实验装置原理图^[32]

Fig. 7 Schematic diagram of experimental setup for measuring frequency noise of fiber lasers^[32]

激光线宽和噪声是单频光纤激光器的重要性能指标。2009 年, Geng 等^[22]采用短腔 DBR 结构,实现了 1950 nm 工作波长的单频激光输出。激光器的增益介质为单模掺铥双包层光纤,外包层也为玻璃结构,纤芯中铥离子掺杂浓度为 5%(质量分数)。激光器的反馈部分由一对中心波长为 1950 nm、刻写在商用单模石英光纤上的布拉格光栅构成。使用波长为 1575 nm 的光纤激光器对一段 2 cm 长的增益光纤进行纤芯抽运,获得了最大功率为 40 mW 的单频激光输出,斜率效率为 20.4%。同时测量了激光器的相对强度噪声(RIN),观察到两个弛豫振荡峰。研究者认为频率较低的弛豫振荡峰来源于抽运激光器,而频率较高的弛豫振荡峰才是 1950 nm 单频激光器造成的;使用迈克耳孙干涉仪测试了激光器的频率噪声,将其跟线宽分别为 3 kHz 和 30 kHz 的激光器的频率噪声作比较,得出此单频激光器的激光线宽小于 3 kHz。

2011 年, Zhang 等^[46]也进行了 2 μm 波段单频 DBR 光纤激光器的研究。使用的增益光纤为一段 1 cm 长的铥镱共掺铝硅酸盐光纤,纤芯中铥离子掺杂浓度为 1%(质量分数)。整个谐振腔的有效长度为 3 cm,对应着 3.3 GHz 的纵模间隔。其中高反射率(HR)FBG 刻写在非保偏光纤上,3 dB 带宽约为 6 GHz;输出耦合(OC)FBG(低反光栅)刻写在保偏光纤上。使用波长为 1565 nm 的铟镱共掺光纤激光器作为抽运源,实验装置原理图如图 8 所示。研究者使用 F-P 扫描干涉仪证实了激光器的单频运转,测得输出激光的中心波长在 1943 nm 处,最大输出功率为 580 mW,斜率效率为 13%。

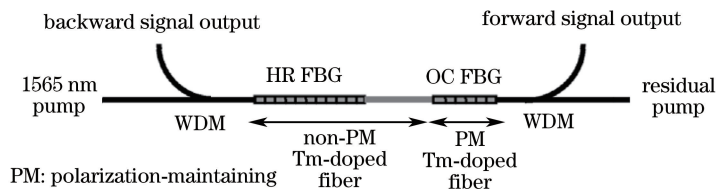


图 8 单频掺铥 DBR 光纤激光器实验装置原理图^[46]

Fig. 8 Schematic diagram of experimental setup of single-frequency Tm-doped DBR fiber lasers^[46]

2015 年, Fu 等^[47]基于商用掺铥石英光纤和短腔 DBR 结构,实现了 1950 nm 工作波长的单频激光输出,并且研究了输出激光线宽和 RIN。实验中使用 793 nm 单模半导体激光器纤芯抽运一段 1.9 cm 长的掺铥增益光纤,增益光纤两端分别熔接一对光纤光栅。其中输出耦合光栅刻写在保偏光纤上,3 dB 带宽为

0.05 nm, 反射率为 70%; 高反光栅刻写在标准光纤上, 3 dB 带宽为 0.3 nm, 反射率为 99%, 实验装置原理如图 9 所示。在 240 mW 抽运功率下获得了最大输出功率为 18 mW 的单频激光输出, 斜率效率为 11%。研究者采用 10 km 光纤延迟线, 通过自外差法测得输出激光线宽为 37 kHz; 同时测量了不同抽运功率下频率在 0~5 MHz 范围内的 RIN, 500 kHz 附近存在明显的弛豫振荡峰, 随着抽运功率的增加, 峰值往高频方向移动并稳定在 -150 dB/Hz 的水平。

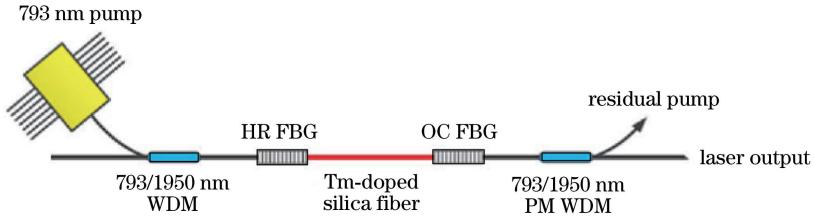


图 9 基于掺铥石英光纤的 1950 nm 单频光纤激光器实验装置原理图^[47]

Fig. 9 Schematic diagram of experimental setup of 1950 nm single-frequency fiber lasers based on Tm-doped silica fiber^[47]

由以上研究报道可知, 由于钽酸盐玻璃的铥离子掺杂浓度比石英玻璃基质的高, 因此以 TGF 作为工作介质的短腔单频激光器的转换效率高于掺铥石英光纤。另外, 相干合束、非线性频率转换等技术也对激光器的偏振态提出了相应要求。Yang 等^[33]使用自制的高掺杂铥钽酸盐玻璃光纤构建短腔 DBR, 研究了 2 μm 波段线偏振单频光纤激光器。将宽带 FBG (WB-FBG) 和窄带保偏 FBG (NB-PM-FBG) 组成光纤光栅对, 匹配的中心波长为 1949.94 nm; WB-FBG 的 3 dB 带宽为 0.4 nm, 中心波长处的反射率为 99.9%; NB-PM-FBG 慢轴的 3 dB 带宽为 0.06 nm, 中心波长处的反射率为 82.9%。将一对 FBG 分别与长为 2.1 cm 的 TGF 的两端熔接构成全光纤短腔 DBR 结构, 实验装置原理如图 10 所示, 其中 PBS 为偏振分束镜, 其有效谐振腔长约为 3.1 cm, 对应纵模间隔大于 2.8 GHz。研究者测得输出激光的偏振消光比大于 22.4 dB, 表明激光器具有良好的偏振特性。

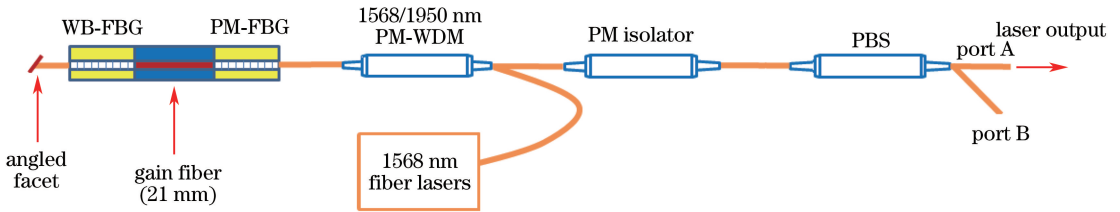


图 10 全光纤线偏振单频光纤激光器实验装置原理图^[33]

Fig. 10 Schematic diagram of experimental setup of all-fiber linearly-polarized single-frequency fiber lasers^[33]

图 11(a)为激光器的输出功率与吸收抽运功率的关系曲线。激光器的激光阈值为 150 mW, 在 576 mW 抽运功率下获得了最大功率为 102.5 mW 的单频激光输出, 斜率效率为 24.7%。图 11(b)为激光器的 RIN 测试谱。在 520 kHz 处存在明显的弛豫振荡峰, 峰值为 -90 dB/Hz; 在频率大于 5 MHz 处, RIN 稳定在

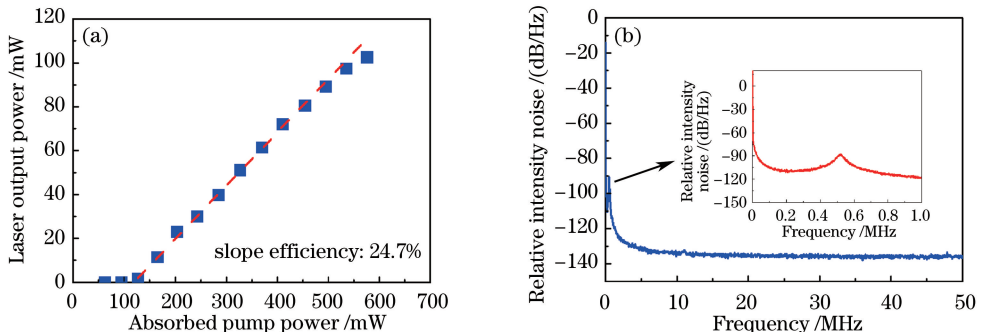


图 11 (a) 激光输出功率与吸收的抽运功率之间的关系曲线; (b) 光纤激光器的 RIN 测试谱^[33]

Fig. 11 (a) Relationship between laser output power and absorbed pump power; (b) RIN test spectrum of fiber lasers^[33]

-135 dB/Hz水平。此外,研究者使用 3 km 光纤延迟线,通过自外差法和频率噪声谱测量结果,得出此单频激光器的输出激光线宽小于 6 kHz。

3.3 短腔单频 DFB 光纤激光器

DFB 结构的单频光纤激光器主要是通过 在 稀 土 离 子 掺 杂 的 有 源 光 纤 上 直 接 刻 写 一 段 相 移 光 栅 来 构 成 激 光 谐 振 腔。相移光栅属于非均匀光栅,通常在栅距范围内留有四分之一波长($\pi/2$ 的相移间隔)。相移间隔的引入使得相移光栅反射谱阻带中心处存在一个线宽极窄的透射窗口,因此相移光栅具有非常好的模式选择特性,使得谐振腔能够产生线宽极窄的单纵模激光输出。

2004 年, Agger 等^[21]首次采用 DFB 结构实现了 2 μm 波段单频光纤激光输出。激光器使用的增益介质为单包层掺铊石英光纤,研究者在纤芯中掺入质量分数为 14.5% 的铊以提高 Tm 的掺杂浓度。激光器的反馈部分由分布反馈光纤光栅构成,谐振腔长度小于 5 cm。激光器的激射阈值为 59 mW,工作波长在短波长 1735 nm 处,最大输出功率为 1 mW,斜率效率为 0.2%。研究者通过 F-P 扫描干涉仪证实了激光器的单频特性。同时,通过压电陶瓷对光栅施加拉力,调谐激光输出波长为 1734~1736 nm。

2007 年, Gapontsev 等^[24]采用掺铊石英光纤和 DFB 结构,获得了工作波长为 1.74, 1.76, 1.93, 1.98, 2.09 μm 的一系列单频激光输出,并且重点研究了 1.93 μm 单频光纤激光的输出性能。激光器的谐振腔长度为 5 cm,采用 1567 nm 波长的光纤激光器进行同带抽运,实验装置原理如图 12 所示,其中 EDFA 为掺铒光纤放大器。在 1.93 μm 波长处激光的输出功率最高可达 22 mW,斜率效率为 10%。研究者对激光器的 RIN 进行了测量,测得其 RIN 小于 -130 dB/Hz;对于激光器的线宽仍然是根据经验进行估计,得出激光线宽为 20~50 kHz。

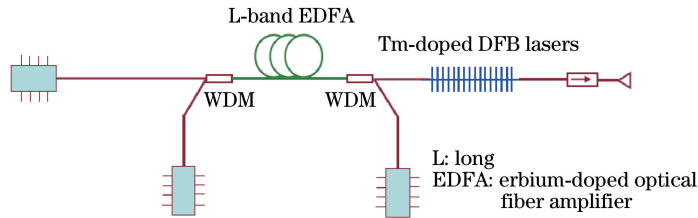


图 12 单频 DFB 光纤激光器实验装置原理图^[24]

Fig. 12 Schematic diagram of experimental setup of single-frequency DFB fiber lasers^[24]

同年, Shen 等^[25]采用分立式空间结构,继续提高了单频光纤 DFB 激光器的性能。使用的增益介质为共掺铊石英光纤,纤芯中铊的掺杂浓度为 1% (质量分数),并通过截断法测得增益光纤的小信号吸收系数为 1 dB/cm。激光器的谐振腔长度约为 8 cm,使用波长为 1565 nm 的铒镱共掺光纤激光器进行同带抽运,实验装置原理如图 13 所示,其中 HT 表示高透射, f 表示焦距。激光器的激射阈值为 50 mW,最大输出功率为 318 mW,斜率效率为 21%,使用扫描单色仪测得输出激光的中心波长在 1935 nm 处。研究者通过 F-P 扫描干涉仪证实了激光器工作在单纵模状态,但是观察到偏振分裂现象,两个偏振模式的间隔为 660 MHz。

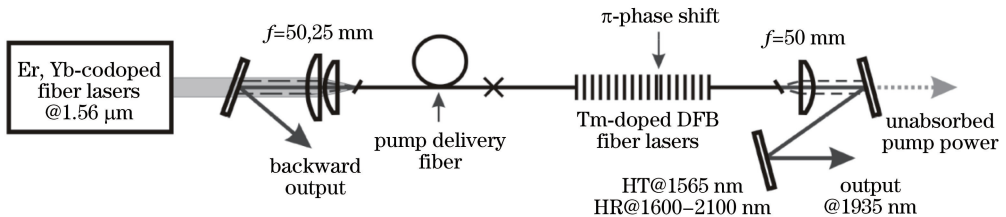


图 13 单频掺铊光纤 DFB 光纤激光器实验装置原理图^[25]

Fig. 13 Schematic diagram of experimental setup of single-frequency Tm-doped DFB fiber lasers^[25]

2008 年, Zhang 等^[26]对使用的增益光纤进行了优化,纤芯为铊铈共掺的铝硅酸盐基质,铊掺杂浓度仍为 1%,包层为纯石英玻璃基质。谐振腔长度仍为 8 cm,还是使用 1565 nm 激光进行同带抽运。激光器的激射阈值为 80 mW,在 8.1 W 抽运功率下获得了最大输出功率为 875 mW 的单频激光输出,斜率效率为 27%。之后,研究者将此单频光纤激光器作为种子源,基于 MOPA 结构进行了单频激光功率放大,分别获

得了 3, 10, 100 W 的单频激光输出功率^[26-28]。

4 高功率掺铥连续 MOPA 单频光纤激光器研究进展

虽然单一振荡器或以谐振腔形式直接输出的单频激光已基本满足了实际的应用需求,一些特定的应用场合,如激光雷达、激光手术、材料加工等需要更高功率的单频激光输出,此外对线宽、偏振态、噪声也有相应的要求。

单频激光技术、掺铥双包层光纤拉制技术和 2.0 μm 波段关键光器件制作工艺的不断发展与完善,使得 2.0 μm 波段高功率掺铥连续单频光纤激光器的研究和应用有了突破性进展。高功率光纤激光器一般采用 MOPA 结构^[48-50],即使用小功率的高性能单频激光器作为种子源,只要将其注入到光纤放大系统中,最终也能实现大功率的单频激光输出。激光放大系统的输出光谱特性、工作波长、偏振态、激光线宽等仅由种子源激光器决定,而光束质量、输出功率和能量大小则主要依赖于光纤放大器。

2007 年, Gapontsev 等^[24]将波长为 1932 nm、功率为 20 mW 的单频 DFB 光纤激光器作为种子源,采用 MOPA 结构对单频激光进行了功率放大。放大部分由两级掺铥光纤放大器组成,每一级均由波长为 1567 nm 的光纤激光器提供抽运。研究者对 2 m 长掺铥石英光纤进行了抽运,实现了 20 W 功率的单频激光输出,如图 14 所示,输出功率的提升仅受抽运源功率的限制。此外,对放大后 MOPA 激光器的强度噪声进行了测量,当频率在 0.2 ~ 0.5 MHz 范围内, MOPA 激光器的 RIN 为 -115 dB/Hz。

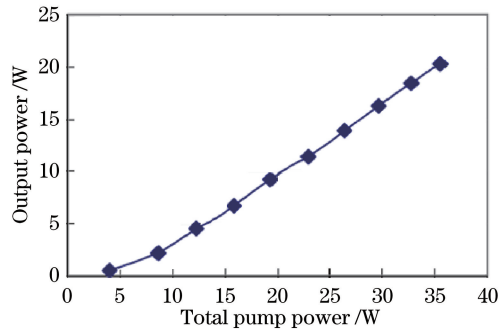


图 14 输出功率与总抽运功率的关系曲线^[24]

Fig. 14 Relationship between output power and total pump power^[24]

2010 年, Pearson 等^[28]采用 MOPA 结构进行了单频激光功率放大研究,实现了波长为 1943 nm、功率为 100 W、偏振消光比大于 15 dB 的线偏振单频激光输出。实验装置由窄线宽单频 DFB 光纤激光器(种子源)和三级掺铥光纤放大器组成。种子源和前面二级预放大级使用 1565 nm 波段钕共掺光纤激光器进行同带抽运,功率放大级使用 795 nm 包层抽运方式。然而,光纤涂覆层的热损伤限制了输出功率的进一步提升。

高功率单频 MOPA 光纤激光器输出功率的提升主要受制于受激布里渊散射(SBS)效应。2009 年, Goodno 等^[10]采用多级 MOPA 结构,实现了功率为 608 W、2.0 μm 波段单频光纤激光输出。其放大部分采用四级掺铥光纤放大器级联结构,将工作波长为 2040 nm、功率为 3 mW、线宽小于 5 MHz 的半导体单频 DFB 激光器作为种子源,使用三个全光纤保偏预放大器将信号光功率提升到 16 W,通过三个自由空间光隔离器提供 50 dB 的隔离度以保护功率放大级。功率放大器包含一段长 3.1 m 的非保偏双包层掺铥石英光纤,其纤芯直径为 25 μm ,包层直径为 400 μm ,数值孔径为 0.08,实验装置原理如图 15 所示,其中 ASE 表示放大自发辐射。实验获得了最大功率为 608 W 的单频激光输出,斜率效率为 54%。通过将增益光纤盘绕弯曲成直径约为 10 cm 的环形以滤除高阶模式,测得光束质量因子为 1.05 ± 0.03 。

与国外研究工作相比,国内在 2.0 μm 波段高功率连续单频光纤激光器方面的研究起步稍晚,但进步很快。2013 年, Wang 等^[51]采用 MOPA 结构,将波长为 1.97 μm 、功率为 40 mW、线宽为 100 kHz 的短腔单频光纤激光器作为种子源,使用三级掺铥光纤放大器进行了功率放大。在 220 W 抽运功率下获得了最大输出功率约为 102 W 的单频激光输出,斜率效率为 50%。研究者估算功率放大器的 SBS 阈值为 460 W,远高于实际输出功率值。2014 年, Liu 等^[9]报道了全光纤单频单偏振掺铥 MOPA 激光器,实现了功率为

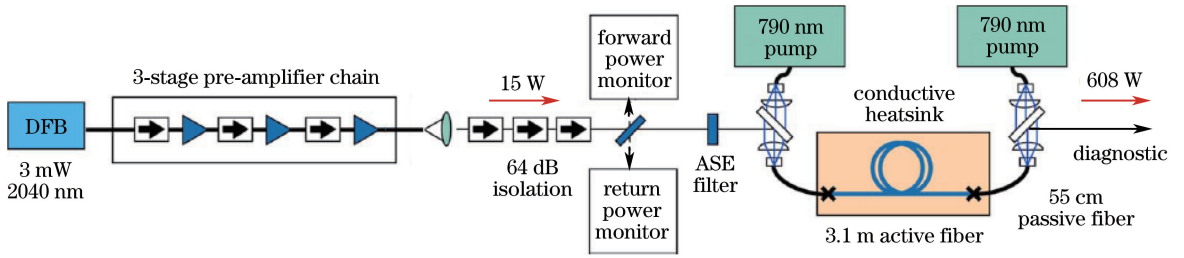


图 15 四级单频掺铥光纤放大器实验装置原理图^[10]

Fig. 15 Schematic diagram of experimental setup of four-stage single-frequency Tm-doped fiber amplifier^[10]

210 W、波长为 2000.9 nm 的线偏振单频激光输出。MOPA 激光器由一只功率为 3.5 mW、线宽小于 2 MHz 的半导体单频 DFB 激光器和四级掺铥保偏光纤放大器组成。由 793 nm 多模半导体激光器提供抽运,前面三级放大器将信号光功率放大至 75 W;功率放大级所用的增益光纤为保偏双包层掺铥石英光纤,其纤芯和包层直径分别为 25 μm 和 400 μm ,数值孔径为 0.09,实验装置原理如图 16 所示,其中 PM-MFA 为保偏模场适配器。获得了最大功率为 210 W 的单频激光输出,斜率效率为 53%,光束质量因子为 1.6,偏振消光比大于 17 dB。

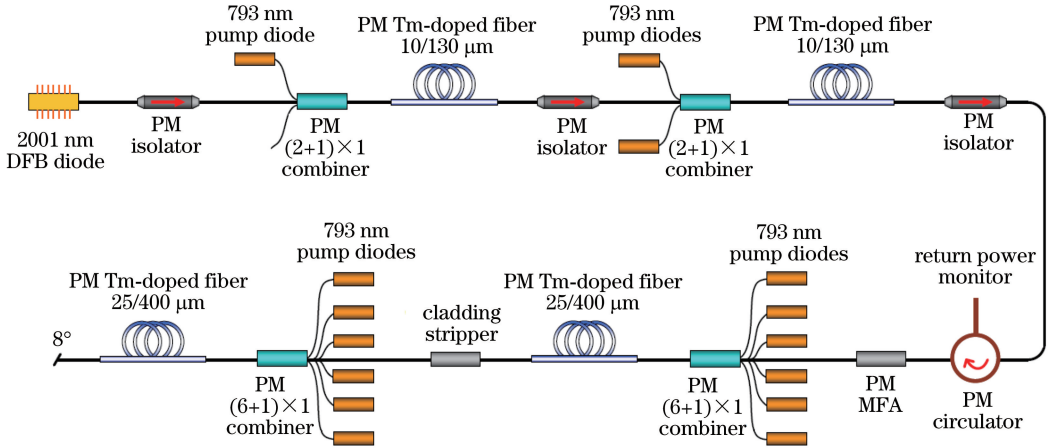


图 16 高功率全光纤单频掺铥 MOPA 激光器实验装置原理图^[9]

Fig. 16 Schematic diagram of experimental setup of high-power all-fiber single-frequency Tm-doped MOPA lasers^[9]

双包层石英光纤相对有限的纤芯尺寸和较长的作用长度,以及较窄的种子源激光线宽,使得单频 MOPA 光纤激光器输出功率的提升受到了 SBS、受激拉曼散射(SRS)等非线性效应的限制。相比于 MOPA 结构中传统掺铥石英增益光纤几米甚至十几米长度的使用量,具有高增益、短长度的 TGF 可以明显地减小非线性效应的影响^[29,31,52],是发展高功率单频光纤激光的一种潜在方案。

最近, Yang 等^[31]报道了高功率全光纤结构的单频 TGF-MOPA 激光器,实验装置原理如图 17 所示,其中 LD 为半导体激光器。激光器由自制的 1950 nm 短腔单频 DBR 光纤激光器(种子源)和两级 TGF 放大器

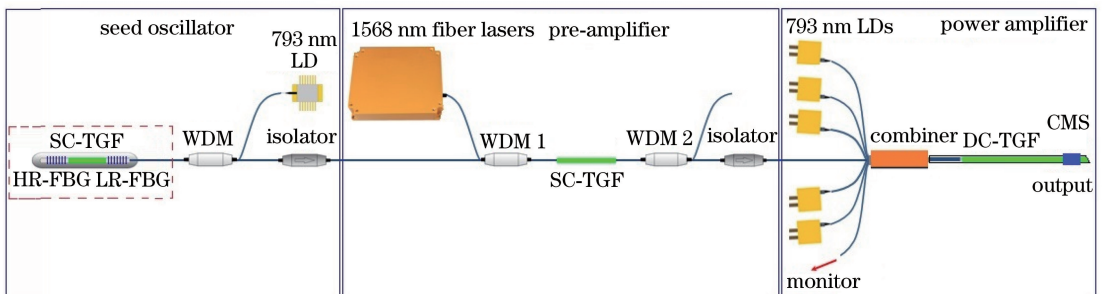


图 17 单频 TGF-MOPA 激光器实验装置原理图^[31]

Fig. 17 Schematic diagram of experimental setup of single-frequency TGF-MOPA lasers^[31]

组成。预放大器中使用了 8 cm 单包层 TGF(SC-TGF),由 1568 nm 光纤激光器对增益光纤进行前向纤芯抽运。通过理论模拟和实验结果相结合,对主放大级中增益光纤的长度进行了优化,最终选取了长 31 cm 的掺铥双包层铬酸盐玻璃光纤(DC-TGF)作为增益介质。TGF 的一端与(6+1)×1 的合束器熔接,并用低折射率胶涂覆其表面,以形成外包层。实验中,用 793 nm 多模半导体激光器对 TGF 进行包层抽运,并取合束器的一个闲置端口进行返回光监测。

图 18(a)为在不同信号光功率条件下,激光器的输出功率与抽运功率的关系曲线。当输入信号光为 350 mW 时,获得最大输出功率 11.7 W,光光转换效率为 20.4%。同时,研究者基于有关 SBS 理论公式估算了功率放大器的 SBS 阈值,约为 980 W,远高于目前报道的输出功率值。分析得出,通过提供足够的抽运功率和有效移除 MOPA 激光系统中的热效应,可以进一步提高单频光纤激光的输出功率。图 18(b)给出了激光器的 RIN 曲线,在 0.62 MHz 处可以看到明显的弛豫振荡峰,峰值为 -95 dB/Hz,其值与谐振腔的结构和抽运电流有关;RIN 在频率大于 2 MHz 时稳定在 -130 dB/Hz 以下。

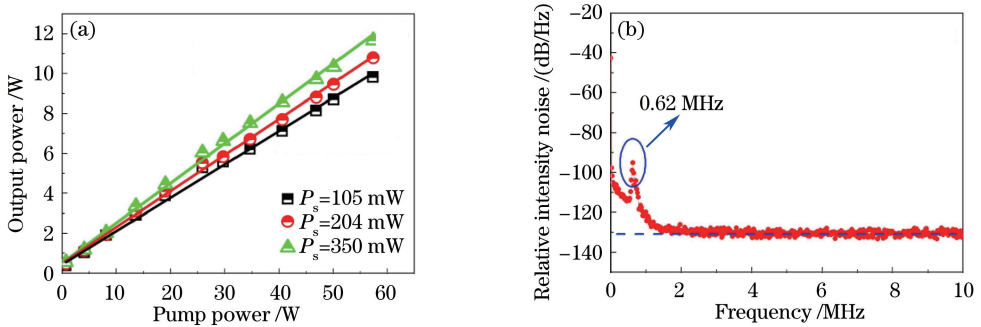


图 18 (a)输出功率与抽运功率之间的关系曲线;(b)MOPA 激光器的 RIN 测试谱^[31]

Fig. 18 (a) Relationship between output power and pump power; (b) RIN test spectrum of MOPA lasers^[31]

5 结束语

从不同腔结构的掺铥连续单频光纤激光振荡器和高功率掺铥连续单频 MOPA 光纤激光器两个方面,分别介绍了当前 2.0 μm 波段掺铥连续单频光纤激光器的实验研究进展。单频光纤激光作为一种重要的激光技术,发展非常迅速,已经实现了输出功率从毫瓦到数百瓦量级、激光线宽千赫兹量级、线偏振和全光纤化输出等性能。

2.0 μm 波段连续单频光纤激光器的发展仍显不足:1) 掺铥单频光纤激光振荡器的输出性能有待进一步提高和完善,如窄线宽、噪声抑制和波长可调谐性能;2) 非线性效应限制了单频 MOPA 光纤激光输出功率的进一步提升,需要探索新型的非线性效应抑制措施;3) 全光纤化程度不够,基于分立式体光学元件的空间结构导致激光器的装置复杂、耦合效率低、易受环境干扰。实现更高功率、低噪声、窄线宽输出的 2.0 μm 波段全光纤化线偏振单频激光器是今后的主要研究方向之一。

参 考 文 献

- [1] Vincent F, Martin B, Bah S T, *et al.* 30 W fluoride glass all-fiber laser at 2.94 μm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(12): 2882-2885.
- [2] Percival R M, Szebesta D, Seltzer C P, *et al.* A 1.6- μm pumped 1.9- μm thulium-doped fluoride fiber laser and amplifier of very high efficiency[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, 31(3): 489-493.
- [3] Höfer S, Liem A, Limpert J, *et al.* Single-frequency master-oscillator fiber power amplifier system emitting 20 W of power[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(17): 1326-1328.
- [4] Clément Q, Melkonian J M, Barrientos-Barria J, *et al.* Tunable optical parametric amplification of a single-frequency quantum cascade laser around 8 μm in ZnGeP₂[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 4046-4049.
- [5] 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.
- [6] Wang X, Zhou P, Zhang H W, *et al.* 100 W-level Tm-doped fiber laser pumped by 1173 nm Raman fiber lasers[J].

- Optics Letters, 2014, 39(15): 4329-4332.
- [7] Hutcheon R J, Perrett B J, Mason P D. Modeling of thermal effects within a 2 μm pumped ZGP optical parametric oscillator operating in the mid-infrared[C]. SPIE, 2004, 5620: 264-274.
- [8] Lippert E, Rustad G, Nicolas S, *et al.* Fibre-laser-pumped mid-infrared source[C]. SPIE, 2004, 5620: 56-62.
- [9] 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.
- [10] Goodno G D, Book L D, Rothenburg J E. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2009, 34(8): 1204-1206.
- [11] Zyskind J L, Sulhoff J W, Sun Y, *et al.* Single mode diode-pumped tunable erbium-doped fiber laser with linewidth less than 5.5 kHz[J]. Electronics Letters, 1991, 27(23): 2148-2149.
- [12] Lu Z G, Grover C P. A widely tunable narrow-linewidth triple-wavelength erbium-doped fiber ring laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(1): 22-24.
- [13] Feng Z M, Mo S P, Xu S H, *et al.* A compact linearly polarized low-noise single-frequency fiber laser at 1064 nm[J]. Applied Physics Express, 2013, 6(5): 052701.
- [14] Poulsen C V, Sejka M. Highly optimized tunable Er^{3+} -doped single longitudinal mode fiber ring laser, experiment and model[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(6): 646-648.
- [15] Zhang W N, Li C, Mo S P, *et al.* A compact low noise single frequency linearly polarized DBR fiber laser at 1550 nm [J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29(8): 084205.
- [16] Xu S H, Yang Z M, Liu T, *et al.* An efficient compact 300 mW narrow-linewidth single frequency fiber laser at 1.5 μm [J]. Optics Express, 2010, 18(2): 1249-1254.
- [17] Lwatsuki K, Okamura H, Saruwatari M. Wavelength-tunable single-frequency and single-polarisation Er-doped fiber ring-laser with 1.4 kHz linewidth[J]. Electronics Letters, 1990, 26(24): 2033-2035.
- [18] Spiegelberg C, Geng J, Hu Y D, *et al.* Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1): 57-62.
- [19] 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, 36(18): 3708-3710.
- [20] Babin S A, Churkin D V, Kablukov S I, *et al.* Single frequency linearly polarized DFB fiber laser source[C]. SPIE, 2007, 6727: 672716.
- [21] Agger S, Povlsen J H, Varming P. Single-frequency thulium-doped distributed-feedback fiber laser[J]. Optics Letters, 2004, 29(13): 1503-1505.
- [22] Geng J H, Wang Q, Luo T, *et al.* Single-frequency narrow-linewidth Tm-doped fiber laser using silicate glass fiber[J]. Optics Letters, 2009, 34(22): 3493-3495.
- [23] Voo N Y, Sahu J K, Ibsen M. 345-mW 1836-nm single-frequency DFB fiber laser MOPA[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(12): 2550-2552.
- [24] Gapontsev D, Platonov N, Meleshkevich M, *et al.* 20 W single-frequency fiber laser operating at 1.93 μm [C]. Conference on Lasers & Electro-Optics, 2007, 15(25): CF15.
- [25] Shen D Y, Zhang Z, Boyland A J, *et al.* Thulium-doped distributed-feedback fiber laser with >0.3 W output at 1935 nm[C]. Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides, 2007: BTuC1.
- [26] Zhang Z, Shen D Y, Boyland A J, *et al.* High-power Tm-doped fiber distributed-feedback laser at 1943 nm[J]. Optics Letters, 2008, 33 (18): 2059-2061.
- [27] Zhang Z, Boyland A J, Sahu J K, *et al.* Single-frequency Tm-doped fiber master-oscillator power-amplifier with 10 W linearly polarized output at 1943 nm[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2008: CFD5.
- [28] Pearson L, Kim J W, Zhang Z, *et al.* High-power linearly-polarized single-frequency thulium-doped fiber master-oscillator power-amplifier[J]. Optics Express, 2010, 18(2): 1607-1612.
- [29] 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.
- [30] Wen X, Tang G W, Wang J W, *et al.* Tm^{3+} doped barium gallo-germanate glass single-mode fibers for 2.0 μm laser [J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7722-7731.
- [31] 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.
- [32] Geng J, Wu J, 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.
- [33] Yang Q, Xu S H, Li C, *et al.* A single-frequency linearly polarized fiber laser using a newly developed heavily Tm^{3+} -doped germanate glass fiber at 1.95 μm [J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(9): 094206.
- [34] Yu S L, Yang Z M, Xu S H. Spectroscopic properties and energy transfer analysis of Tm^{3+} -doped $\text{BaF}_2\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$ glass[J]. *Journal of Fluorescence*, 2010, 20(3): 745-751.
- [35] Wen X, Tang G W, Yang Q, *et al.* Highly Tm^{3+} doped germanate glass and its single mode fiber for 2.0 μm laser[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20344.
- [36] Higby P L, Aggarwal I D. Properties of barium gallium germanate glasses [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1993, 163(3): 303-308.
- [37] Xu R R, Tian Y, Hu L L, *et al.* Enhanced emission of 2.7 μm pumped by laser diode from $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ -codoped germanate glasses[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1173-1175.
- [38] Srivastava S, Gopal R, Sai S, *et al.* Feedback Mach-Zehnder resonator with "reflector:" Analysis and applications in single frequency fiber lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(14): 141118.
- [39] Sun J Q, Huang L. Single-longitudinal-mode fiber ring laser using internal lasing injection and self-injection feedback [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(7): 074201.
- [40] Srivastava S, Srinivasan K. Coupled-cavity analysis of the resonant loop mirror: Closed-form expressions and simulations for enhanced performance lasing[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(4): 572-581.
- [41] Yeh C H, Shih F Y, Lee C N, *et al.* Wavelength-tunable erbium fiber ring laser in single-frequency operation utilizing Fabry-Perot laser with Sagnac cavity[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(9): 2454-2458.
- [42] Feng T, Yan F P, Peng W J, *et al.* A high stability wavelength-tunable narrow-linewidth and single-polarization erbium-doped fiber laser using a compound-cavity structure[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11 (4): 045101.
- [43] Yin M J, Huang S H, Lu B L, *et al.* Slope efficiency over 30% single-frequency ytterbium-doped fiber laser based on Sagnac loop mirror filter[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(27): 6799-6803.
- [44] Park N, Dawson J W, Vahala K J, *et al.* All fiber, low threshold, widely tunable single-frequency, erbium-doped fiber ring laser with a tandem fiber Fabry-Perot filter[J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 59 (19): 2369-2371.
- [45] He X, Xu S H, Li C, *et al.* 1.95 μm kHz-linewidth single-frequency fiber laser using self-developed heavily Tm^{3+} -doped germanate glass fiber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 20800-20805.
- [46] Zhang Z, Boyland A J, Sahu J K, *et al.* High-power single-frequency thulium-doped fiber DBR laser at 1943 nm[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(7): 417-419.
- [47] Fu S J, Shi W, Lin J C, *et al.* Single-frequency fiber laser at 1950 nm based on thulium-doped silica fiber[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5283-5286.
- [48] Gray S, Liu A, 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.
- [49] Wang X L, Zhou P, Xiao H, *et al.* 310 W single-frequency all-fiber laser in master oscillator power amplification configuration[J]. *Laser Physics Letters*, 9(8): 591-595.
- [50] Yin K, Zhu R Z, Zhang B, *et al.* 300 W-level, wavelength-widely-tunable, all-fiber integrated thulium-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 11085-11090.
- [51] Wang X, Zhou P, Wang X L, *et al.* 102 W monolithic single frequency Tm-doped fiber MOPA[J]. *Optics Express*, 2013, 21(26): 32386-32392.
- [52] Barnes N P, Walsh B M, Reichle D J, *et al.* Tm: germanate fiber laser: Tuning and Q-switching[J]. *Applied Physics B*, 2007, 89(2): 299-304.