

文章编号: 1000-7032(2021)09-1419-08

基于光纤 Bragg 光栅 F-P 滤波器及复合双环腔滤波器的单纵模掺铥光纤激光器

韩文国¹, 延凤平^{1*}, 冯 亭^{2*}, 程 丹¹, 李 挺¹, 白卓娅¹,
秦 齐¹, 杨丹丹¹, 张鲁娜³, 郭 颖¹, 王 伟¹, 关 彪¹, 张 璇¹

(1. 北京交通大学 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 光波技术研究所, 北京 100044;

2. 河北大学物理科学与技术学院 光信息技术创新中心, 河北 保定 071002;

3. 中国科学院理化技术研究所 固体激光重点实验室, 北京 100190)

摘要: 提出了一种基于光纤 Bragg 光栅 Fabry-Pérot (F-P) 窄带滤波器和复合双环腔滤波器的单纵模掺铥光纤激光器。通过对复合双环腔进行数值仿真并实验制作, 结合光纤 Bragg 光栅 F-P 滤波器的窄带滤波特性, 实现了光纤激光器的单纵模选取。激光器输出波长为 1 941.56 nm, 光信噪比为 55.8 dB, 70 min 内的波长和功率波动分别小于 0.019 nm 和 1.464 dB。由自制的基于非平衡迈克尔逊干涉仪线宽测试系统测量了所提出的掺铥光纤激光器输出单纵模激光的频率噪声特性, 并用 β 线方法由频率噪声谱估计了不同测量时间下的激光线宽, 2 ms 测量时间下的典型激光线宽为 14.194 kHz。

关键词: 光纤激光器; 掺铥光纤; 单纵模; 光纤光栅

中图分类号: O436; TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20210215

Single-longitudinal Mode Thulium-doped Fiber Laser Based on Fabry-Pérot Fiber Bragg Grating Filter and Passive Compound Double-rings Cavity

HAN Wen-guo¹, YAN Feng-ping^{1*}, FENG Ting^{2*}, CHENG Dan¹, LI Ting¹, BAI Zhuo-ya¹,
QIN Qi¹, YANG Dan-dan¹, ZHANG Lu-na³, GUO Ying¹, WANG Wei¹, GUAN Biao¹, ZHANG Xuan¹

(1. Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education,

Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Photonics Information Innovation Center, College of Physics Science & Technology, Hebei University, Baoding 071002, China;

3. Key Laboratory of Solid Laser Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

* Corresponding Authors, E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn; wlxyft@hbu.edu.cn

Abstract: A single-longitudinal-mode (SLM) thulium-doped fiber laser based on an F-P narrowband filter and compound rings cavity is proposed. The compound rings incorporated in the cavity can help to achieve SLM lasing by adjusting the cavity FSR and it also plays the role of narrowband filtering. A theoretical model which can numerically calculate the transmission spectrum of the complex multi-ring sub-cavity filter is proposed. The output wavelength of the laser source is 1 941.56 nm, and the optical signal-to-noise ratio is 55.8 dB. The wavelength and power fluctuations within 70 min were less than 0.019 nm and 1.464 dB, respectively. Experimental results also show that the laser operates in a stable SLM state. The frequency noise characteristic of the proposed SLM laser was measured by a homemade unbalanced Michelson interferometer, and laser linewidth under

收稿日期: 2021-06-21; 修订日期: 2021-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(61827818, 61620106014, 61775128)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(61827818, 61620106014, 61775128)

different measurement time was estimated from the frequency noise spectra based on the β -separation line method. The calculated laser linewidth in 2 ms measurement time is 14.194 kHz.

Key words: fiber laser; thulium-doped fiber; single longitudinal mode; fiber Bragg grating

1 引 言

单纵模光纤激光器因其超窄光谱线宽、超长相干长度等特征成为光纤激光技术领域快速发展的方向,可被广泛应用于光纤传感、相干激光雷达、大功率相干合成、相干光通信、引力波探测等领域^[1]。常见的实现激光单纵模窄线宽输出的方式有分布布拉格反射(DBR)型光纤激光器^[2]、分布反馈(DFB)型光纤激光器^[3]、环形腔单纵模光纤激光器^[4]等。其中,超短腔激光器具有结构简单、输出功率和频率稳定等特点,但线宽通常较宽,输出功率较低,需要经过一级甚至多级放大后才能达到应用要求。长腔光纤激光器线宽通常较窄,但是单纵模实现困难且容易产生跳模现象。可以利用腔型结构设计、非线性二波混频、布里渊增益谱线压缩等方法消除多模振荡,也可以利用激光腔内高精度滤波器选模^[5]或加入偏振控制器改变激光的偏振态消除空间烧孔效应^[6]等方法获得单纵模激光输出。对于长腔激光器,采用超窄带滤波以及扩大模式间隔、减少纵模密度都是实现稳定单纵模的思路。只用超窄带滤波器(如相移光纤光栅等)实现单纵模时,需要特别设计和精巧制作滤波器,以使其带宽尽可能窄。这样的滤波器往往制作困难,成本高昂。使用复合多环腔滤波是一种成本低廉、简便易行的扩大模式间隔的有效方案。此前,已有多种复合多环腔实现单纵模激光器的报道,但多是简单地用游标原理来解释实验现象^[7-8]。窄带滤波器结合复合多环腔实现单纵模,可以降低对窄带滤波器的苛刻要求,增加了激光腔设计的灵活性,是非常实用的方案。

由于 2 μm 波段的激光具有人眼安全、大气窗口损耗低等优点,在激光雷达、激光测距、医疗等领域具有十分诱人的应用前景^[9-10],因此,有必要开展 2 μm 波段掺铥(Tm^{3+})光纤激光器的单纵模、窄线宽特性的研究。相比于 980 nm、1 550 nm 等常见波长的单纵模光纤激光器,2 μm 波段单纵模、窄线宽光纤激光器的报道相对较少,主要是因

为缺乏有效的 2 μm 波段激光线宽测量方法。2 μm 波段激光在普通单模光纤中的传输损耗达 10 dB/km,而传统的延时自外差法需要长达几十千米的光纤延迟线。2007 年,Meleshkevich 等报道了线宽小于 1 nm、最高功率超过 400 W 的掺铥光纤激光器^[11]。2012 年,Tang 等利用中心波长为 2 019.8 nm 的光纤 Bragg 光栅实现了 2 019 nm 处线宽小于 3 nm、最高功率可达 137 W 的激光输出^[12]。2015 年,杨麒等用宽带光纤 Bragg 光栅和保偏光纤布拉格光栅中间一段 21 mm 长的掺铥铈酸盐光纤构成了单频 DBR 光纤激光器,在 1 950 nm 处获得了线宽小于 6 kHz、功率大于 100 mW 的线偏振单频激光。2015 年,姚建铨等用 793 nm 单模泵浦 1.9 cm 掺铥石英光纤制得的 DBR 激光器,最大输出功率为 18 mW,用 10 km 延迟线测得线宽为 37 kHz^[13]。2018 年,王璞等将 1 992.6 nm 的 DBR 光纤激光器用 MOPA 结构放大至 100 W,采用 3 km 长延迟线的延时自外差法,测得线宽小于 66 kHz^[14]。2020 年,张鲁娜等提出了一种基于 NPR 效应的波长可切换窄线宽掺铥光纤激光器,激光腔内使用采样光纤布拉格光栅作为滤波器,实现了 1 940.29,1 941.55,1 942.87 nm 3 个波长切换、线宽小于 2 kHz 的单纵模激光稳定输出^[15]。

本文利用实验室自制的光纤 Bragg 光栅(Fiber Bragg grating,FBG)Fabry-Pérot(F-P)滤波器及复合双环腔选单纵模,搭建了 2 μm 波段单纵模光纤激光器。建立了多环子腔滤波器的数值仿真模型,得到了实验制作参数。分析了单纵模运转原理,测量了输出激光特性及稳定性,证实了激光器处于单纵模运转状态。利用实验室自搭建的基于非平衡迈克尔逊干涉仪结构^[16]的线宽测量系统,采用相位噪声测量法测量并计算了所提出单纵模激光器的线宽。

2 单纵模掺铥光纤激光器实验装置

2.1 实验结构

搭建的单纵模掺铥光纤激光器实验结构如图

1 所示。793 nm 的泵浦光经过 790/2 000 nm (6 + 1) × 1 合束器 (只用其中一支泵浦臂) 注入腔内为增益光纤提供泵浦, 一段 3.5 m 长的掺铥光纤 (Nufern, thulium-doped fiber, TDF) 作为增益介质, 其芯径/内包层直径为 10/130 μm, 纤芯数值孔径为 0.15, 在 793 nm 处吸收系数为 4.5 dB/m。掺铥光纤的另一端与光隔离器相连后接环形器的 1 端口, 隔离器与环形器共同确保腔内激光的单向运转。一支反射率大于 99% 的 FBG 与一支 FBG F-P 分别作为高反射镜与窄带滤波器接环形器的 2, 3 端口。经 F-P 滤波后的光注入到复合双环腔中进行进一步的滤波及纵模选择, 由耦合器 10% 输出端口输出。

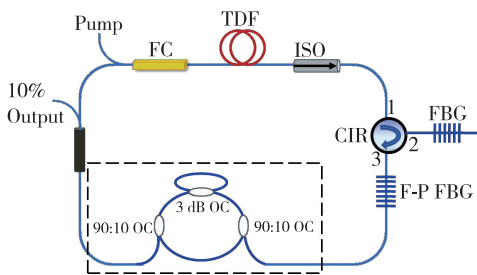


图 1 环形腔掺铥光纤激光器实验结构图

Fig. 1 Experimental setup of the proposed fiber laser

2.2 光栅特性

所用光栅均为实验室自制, 采用相位掩模板法, 由 248 nm KrF 准分子激光器 (Excimer laser) 直接扫描写入, 其中 FBG 利用均匀掩模板制作, 掩模板周期为 1 347.3 nm, 写入长度为 20 mm。FBG F-P 利用相同的均匀掩模板分别写入两段 6 mm 长 FBG, 两段 FBG 之间间隔为 4 mm。FBG 的反射谱与 F-P FBG 透射谱如图 2 所示, 光谱由 YoKogawa AQ6375 型光谱仪测量, 分辨率为 0.05 nm。FBG 反射峰的半高全宽 (FWHM) 为 0.25 nm,

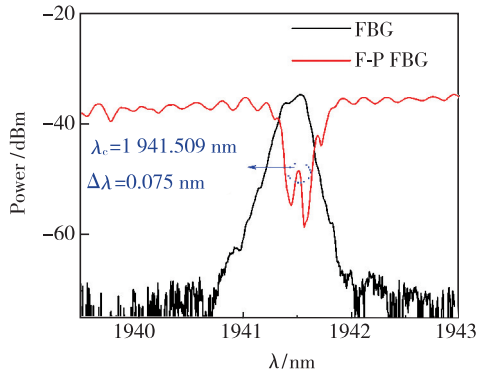


图 2 光纤光栅的反射谱和透射谱

Fig. 2 Reflection and transmission spectra of fiber gratings

F-P 滤波器的中心透射峰波长为 1 941.509 nm, FWHM 为 0.075 nm。由图 2 可以看出, FBG 的反射谱可以完全覆盖 F-P 滤波器的透射峰。

2.3 复合双环腔结构特性

由于所搭建激光器为 ~16 m 长环腔结构, 所对应纵模间隔约为 13 MHz, 未加复合子腔前, 透射带宽为 0.075 nm 的 F-P 滤波器不足以窄到抑制腔内多纵模, 因此将复合子腔引入主腔中进行进一步的滤波及纵模选择。复合子腔结构如图 3 所示, 该复合子腔由两个 90: 10 的耦合器及一个 50: 50 的耦合器共同组成一个 1 m 长大环腔及一个内嵌的 0.3 m 长的小环腔。90% 的光留在复合环中形成窄带干涉。由自由光谱范围 (Free spectral range, FSR) (R) 公式: $R = c/nL$, $c = 3 \times 10^8$ m/s 为光速, $n = 1.44$ 为纤芯折射率, L 为腔长, 可知大环对应的 FSR 为 ~208 MHz, 小环对应的 FSR 为 ~694 MHz。根据游标效应^[17], 复合环所对应的有效 FSR 应为该两环 FSR 的最小公倍数, 即 72 GHz, 对应 2 μm 波段带宽 0.9 nm, 大于 F-P 滤波器带宽, 即在 F-P 透射带宽内只有一个纵模振荡, 可以保证滤波带宽内单纵模输出。

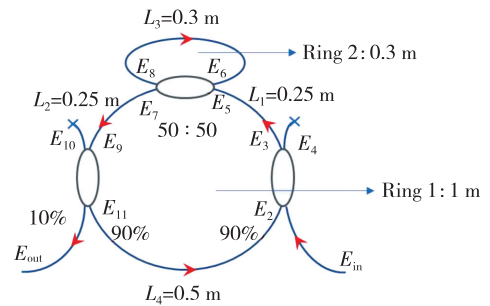


图 3 复合双环结构图

Fig. 3 Schematic of the proposed compound rings filter

除了起到增加谐振腔有效 FSR 的作用外, 复合双环腔内形成的窄带干涉峰可进一步压窄激光器线宽, 这里对所提出的复合双环腔进行仿真, 将每个耦合器视为有输入输出的节点, 每个节点用传输矩阵表示, 即通过第一个耦合器后输出节点的传输矩阵可表示为^[18]:

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i\sqrt{1-\gamma_1}\sqrt{k_1} & \sqrt{1-\gamma_1}\sqrt{1-k_1} \\ \sqrt{1-\gamma_1}\sqrt{1-k_1} & i\sqrt{1-\gamma_1}\sqrt{k_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in} \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 γ_1 和 k_1 分别为耦合器的插入损耗与耦合比。当从第一个耦合器输出到下一个耦合器输入时,输入输出关系可表示为

$$E_5 = E_3 \cdot \sqrt{1 - \delta} e^{(-\alpha + i\beta)L_1}, \quad (2)$$

依此类推直至回到第一个耦合器输入:

$$\begin{bmatrix} E_7 \\ E_8 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} i\sqrt{1 - \gamma_1} \sqrt{k_2} & \sqrt{1 - \gamma_1} \sqrt{1 - k_2} \\ \sqrt{1 - \gamma_1} \sqrt{1 - k_2} & i\sqrt{1 - \gamma_1} \sqrt{k_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_5 \\ E_6 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$E_6 = E_8 \cdot \sqrt{1 - \delta} e^{(-\alpha + i\beta)L_3}, \quad (4)$$

$$E_9 = E_7 \cdot \sqrt{1 - \delta} e^{(-\alpha + i\beta)L_2}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i\sqrt{1 - \gamma_1} \sqrt{k_3} & \sqrt{1 - \gamma_1} \sqrt{1 - k_3} \\ \sqrt{1 - \gamma_1} \sqrt{1 - k_3} & i\sqrt{1 - \gamma_1} \sqrt{k_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_9 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$E_2 = E_{11} \cdot \sqrt{1 - \delta} e^{(-\alpha + i\beta)L_4}, \quad (7)$$

其中 δ, α 及 β 分别为熔接损耗、光纤损耗系数及光纤传输常数, L 为光纤长度。通过遍历所有输入输出之间的关系来表示节点间的网络拓扑结构,将整个网络拓扑结构循环足够多的次数即可达到稳态解。仿真所得复合双环腔透射谱如图 4 所示,其中红色虚线为所测得的 F-P 滤波器的透射谱,蓝线表示仿真所得的复合双环滤波器的透射谱,插图为对复合双环透射谱在 F-P 滤波器中心透射峰 0.01 nm 带宽内的部分放大,由插图所示干涉形成的最宽窄带透射峰为 12.75 MHz。

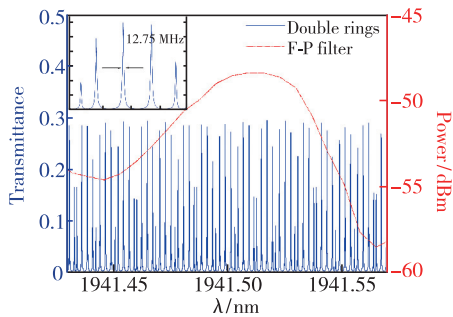


图 4 复合双环输出透射谱

Fig. 4 Transmission spectrum of the proposed compound rings

3 激光器输出特性

激光器输出特性测量结构如图 5 所示,激光输出经光耦合器分成两路,一路接入光谱仪进行

光谱测量,另一路接入一个带宽为 1 GHz 的 2 μm 波段的光电探测器 (Photodetector, PD) 后,再接入带宽为 8 GHz 的频谱分析仪 (Frequency spectrum analyzer, FSA) 观察激光器输出自拍频所得纵模特性。室温下,当泵浦功率提高到 3 W 时可以得到稳定的激光输出,激光光谱如图 6 (a) 所示。测量所用光谱仪分辨率为 0.05 nm,激光的中心波长在 1 941.56 nm,与 F-P 滤波器透射峰中心波长相比偏移了 0.05 nm,该波长漂移主要由固定光栅时带来的应力扰动造成。光谱仪显示输出激光

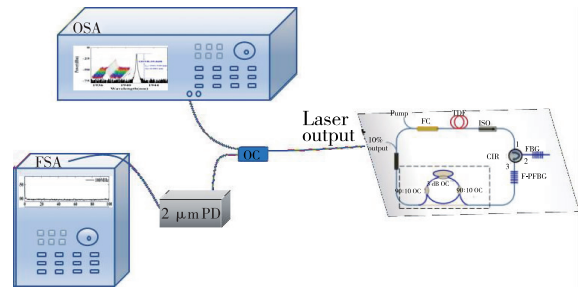


图 5 激光输出特性测量结构图

Fig. 5 Experimental setup of laser output characteristics measurement

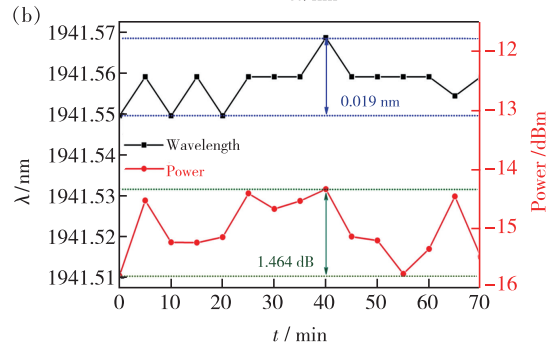
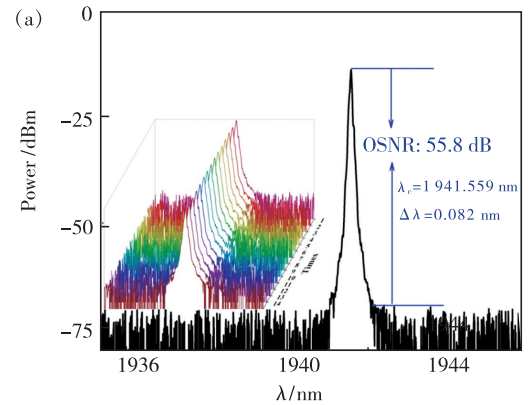


图 6 单纵模激光器输出特性。(a) 输出光谱;(b) 输出波长和功率抖动。

Fig. 6 Output characteristics of the single longitudinal mode fiber laser. (a) Output laser spectra. (b) Fluctuations of output wavelength and power.

FWHM 为 0.08 nm, 光信噪比 (Optical signal to noise ratio, OSNR) 为 55.8 dB。图 6(a) 内插图为输入泵浦功率不变的情况下 70 min 内对激光器每隔 5 min 光谱扫描一次所得光谱图, 其波长漂移与功率抖动如图 5(b) 所示, 70 min 内波长漂移量小于 0.019 nm, 体现了很好的波长稳定性。功率抖动小于 1.464 dB, 该功率抖动主要由 793 nm 泵浦源风扇电机强振动引起整个激光器系统振动造成。

在测量光谱的同时, 激光器的单纵模运转特性也可以通过自零差法测量确认, 实验测得加子环与未加子环的激光输出拍频图如图 7(a)、(b) 所示。由于未加子环前腔内 FSR 及加复合双环后双环各对应 FSR 分别为 13, 208, 649 MHz, 因此频谱仪分别选取 100 MHz、500 MHz、1 GHz 频率范围, 以 3 kHz 为分辨率扫描。当腔内存在复合双环时, 各频谱范围均不存在激光输出的拍频信号, 说明激光器稳定运转在单纵模状态。当移除复合双环后, 频谱仪在各频谱范围内均检测到了明显的拍频信号, 而且主要分布在 0 ~ 200 MHz 范围, 说明 F-P 滤波器起到了窄带滤波的效果, 但仍需结合复合子腔来达到稳定的单纵模运转。

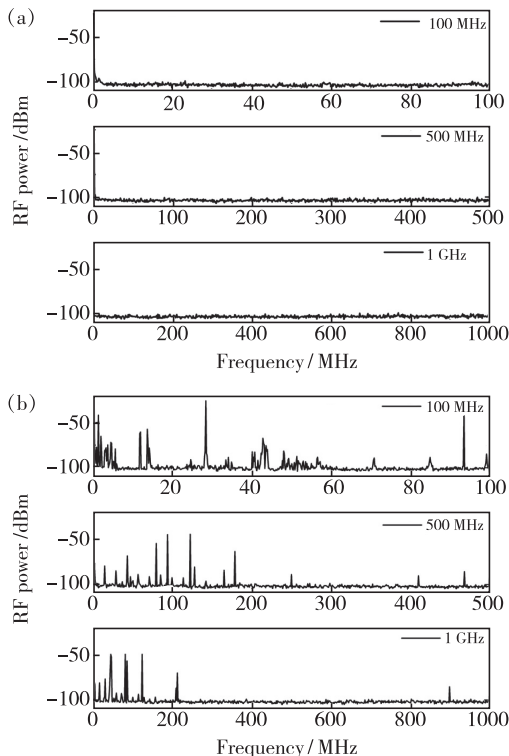


图 7 激光输出拍频图。(a) 加子环; (b) 无子环。

Fig. 7 RF beating spectra of laser output. (a) With compound rings cavity. (b) Without compound rings cavity.

随后, 在耦合器的 10% 端口用功率计 (Ophir StarLite) 对激光器的输出功率进行了测量, 单纵模激光器输出功率随泵浦功率变化曲线如图 8 所示。由于复合双环滤波器只留 10% 的光在主腔内, 以及增益光纤与合束器及隔离器处的熔接点存在模场失配损耗, 造成激光器总输出功率偏低。但是曲线具有很好的线性度, 说明激光器并未达到饱和, 随着泵浦功率的提高, 单纵模激光器的输出功率可继续提高。由于考虑到泵浦注入点的功率承受能力, 在泵浦功率达到 4.5 W 后便未再继续向上提高注入泵浦功率, 此时激光器输出为 2 mW。

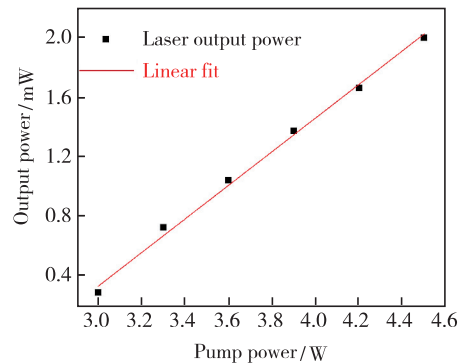


图 8 激光器输出功率随泵浦功率变化特性曲线

Fig. 8 Laser output power variation with pump power

4 激光线宽测量

激光线宽是连续光单纵模激光器的重要指标, 线宽的测量方法一般为延迟自外差法, 这种方法需要采用较长的延迟线, 然而 2 μm 波段激光在普通单模光纤中损耗很大, 不具有适用性。另一方面, 即便是损耗问题不突出的 1.5 μm 波段, 延时自外差法也只能测量到最小约 kHz 量级的线宽。课题组自制了基于 3×3 耦合器相位解调的非平衡迈克尔逊干涉仪, 测量了激光器的频率噪声特性, 并用 β 线方法由频率噪声谱估计了不同测量时间的激光器线宽。

4.1 线宽测量系统结构

实验所用相位噪声解调法线宽测量系统结构如图 9 所示, 待测激光从 3×3 光耦合器 1 端口输入, 经耦合器输出至 4, 5, 6 端口, 其中 6 端口闲置。两个法拉第旋转镜 (Faraday rotation mirror, FRM) FRM1、FRM2 分别接在 4, 5 端口用于反射输入激光。一段 100 m 长单模光纤 (Single mode fiber, SMF) 接入 5 端口臂作为延迟线, 用于引入

双臂臂长差带来激光时延 τ 。反射回的激光经耦合器发生干涉,干涉信号分为三束,其中两束由 2,3 端口分别输入到 PD1 和 PD2 进行光电转换,实现相干探测后,由示波器显示并将采集到的信号送入计算机进行解调分析,得到待测激光的差分相位波动信息。所得到的差分波动信息将经历一系列变换得到待测激光的瞬时频率波动功率谱密度(Power spectral density, PSD) $Sv(f)$ [19], 结合 β 线算法 [7,20] 可以算出待测激光线宽。

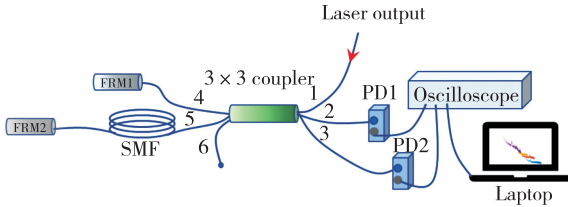


图 9 线宽测量系统结构图

Fig. 9 Experimental setup of the linewidth measurement system

4.2 线宽测量结果

图 10 为所测得单纵模激光器的频率噪声 PSD 及根据 β 线算法 ($\beta = Sv(f) = 8 \log(2) f / \pi^2$) 计算得出的不同积分时间下的激光线宽。受数据采集系统动态范围限制,实验所测总频率噪声 PSD 由四段不同测量时间下的频率噪声 PSD 拼接而成。由于所用采集卡是 8 位示波器,量化噪声较大,经过相位解调后在频率噪声谱密度图表现为每条曲线右侧部分的水平的噪声基底。为了避免粗重的系统噪声遮挡带来歧义和误解,已将 $t = 2, 0.2, 0.02$ s 三组结果的系统噪声部分(右侧水平尾巴)移除,只保留了 $t = 0.002$ s 结果的系统噪声部分。 10^5 Hz 频率偏移处的热噪声和白噪声理论上都远低于 10^{-2} Hz²/Hz,同时,4 条水平尾巴依次小于 10 dB,源于对应的测量时间依次变为 1/10,都说明水平尾巴是系统采样噪声而不是所测量的激光器噪声。由图可见,四段频率噪声 PSD 重叠部分展现了很好的一致性。激光器线宽随测量时间的延长(积分带宽的减小)而增加,当测量时间最短时(积分带宽最大),激光器的线宽为 14.2 kHz,当测量时间最长时(积分带宽最小),激光器线宽为 712.45 kHz。其中,2 s 测量时间线宽异常偏大主要是低频段由环境振动导致的技术噪声。对应于图 9 中,小于 100 Hz 时频率噪声明显急剧增大。

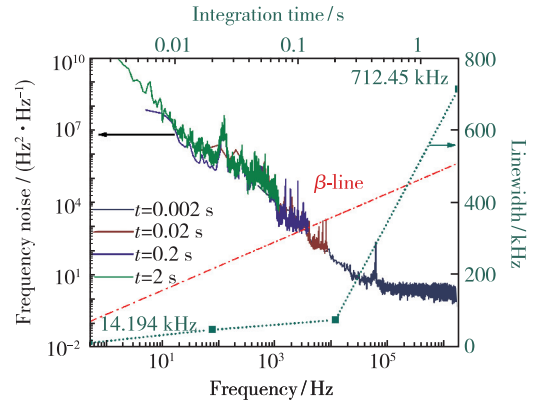


图 10 频率噪声功率谱密度及不同积分时间下线宽测量结果

Fig. 10 Frequency noise PSD and the linewidths at different integration time

表 1 不同测量时间下的线宽值

Tab. 1 Linewidth value under different measurement time

t/s	$\Delta\nu$ /kHz
0.002	14.194
0.02	50.26
0.2	77.166
2	712.45

由于 2 μ m 波段线宽测量的特殊困难,报道的 2 μ m 窄线宽激光器多用数千米延迟线的延时自外差法测量线宽 [13-14],测得线宽约为几十 kHz,然而这是因为超短腔具有更大的本征线宽。文献 [21] 中腔长约为 12.3 m,用延时自外差法测得线宽小于 20 kHz,测量结果受限于延迟线长度。本文激光器线宽略大于文献 [22] 中类似长腔结构的 1 550 nm 激光器,使用同样的 β 线方法估计线宽,0.001 s 测量时间的线宽为 7.1 kHz。这是由于包层泵浦的热效应明显高于纤芯泵浦,4 W 的泵浦功率一方面升高了光纤温度,另一方面较低的斜率效率也导致增益光纤中更大的 non-Langevin 热源,这都会使激光器低频热噪声增加 [23-24]。包层泵浦对频率噪声和线宽影响的更多细节和定量分析还有待于精心设计实验来进一步确认。

5 结 论

本文报道了一种基于 FBG F-P 滤波器及复合双环腔滤波器的 2 μ m 波段单纵模光纤激光器,并对其输出稳定性和线宽特性进行了详细表征。

数值求解了提出的复合双环腔滤波器的透射谱,得到了滤波器的制作参数,可用于指导高质量复合腔滤波器的设计与制作。实验室自制的 FBG F-P 滤波器具有窄带滤波特性,结合复合双环腔滤波器,具有优秀的单纵模选择能力,确保了提出的光纤激光器可以稳定运转在单纵模激光输出状态。激光输出波长为 1 941.56 nm,光信噪比为 55 dB,70 min 内的波长抖动和功率抖动分别小于

0.019 nm 和 1.464 dB。利用自行搭建的非平面迈克耳逊干涉仪线宽测量系统对激光器输出线宽进行表征,0.002 s 测量时间下激光器线宽的典型值为 14.194 kHz。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20210215>。

参 考 文 献:

- [1] LIU B, JIA C L, ZHANG H, *et al.* DBR-fiber-laser-based active temperature sensor and its applications in the measurement of fiber birefringence [J]. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2010, 52(1):41-44.
- [2] XIONG L Y, HOFMANN P, SCHÜLZGEN A, *et al.* Short monolithic dual-wavelength single-longitudinal-mode DBR phosphate fiber laser [J]. *Appl. Opt.*, 2014, 53(18):3848-3853.
- [3] MATSUOKA T, YOSHIKUNI Y, MOTOSUGI G. Dependence of single-longitudinal-mode probability on DFB laser facet structure [J]. *Electron. Lett.*, 1985, 21(24):1151-1152.
- [4] CHEN X F, YAO J P, ZENG F, *et al.* Single-longitudinal-mode fiber ring laser employing an equivalent phase-shifted fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, 17(7):1390-1392.
- [5] RODRÍGUEZ-COBO L, QUINTELA M A, ROTA-RODRIGO S, *et al.* Single-longitudinal mode laser structure based on a very narrow filtering technique [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(8):10289-10294.
- [6] PASCHOTTA R, NILSSON J, REEKIE L, *et al.* Single-frequency ytterbium-doped fiber laser stabilized by spatial hole burning [J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22(1):40-42.
- [7] WANG Z K, SHANG J M, MU K L, *et al.* Stable single-longitudinal-mode fiber laser with ultra-narrow linewidth based on convex-shaped fiber ring and sagnac loop [J]. *IEEE Access*, 2019, 7:166398-166403.
- [8] FENG S J, MAO Q H, TIAN Y Y, *et al.* Widely tunable single longitudinal mode fiber laser with cascaded fiber-ring secondary cavity [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2013, 25(4):323-326.
- [9] GENG J H, WANG Q, JIANG S B. 2 μm fiber laser sources and their applications [C]. *Proceedings of the SPIE 8164, Nanophotonics and Macrophotonics for Space Environments V, San Diego, California*, 2011:816409.
- [10] 孟佳, 张伟, 赵开祺, 等. 国产化掺铥光纤激光振荡器性能研究 [J]. *中国光学*, 2019, 12(5):1109-1117.
MENG J, ZHANG W, ZHAO K Q, *et al.* Investigation on the performance of a homemade thulium-doped fiber laser oscillator [J]. *Chin. Opt.*, 2019, 12(5):1109-1117. (in Chinese)
- [11] MELESHKEVICH M, PLATONOV N, GAPONTSEV D, *et al.* 415 W single-mode CW thulium fiber laser in all-fiber format [C]. *Proceedings of 2007 European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference, Munich*, 2007.
- [12] TANG Y L, HUANG C Y, WANG S L, *et al.* High-power narrow-bandwidth thulium fiber laser with an all-fiber cavity [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(16):17539-17544.
- [13] FU S J, SHI W, LIN J C, *et al.* Single-frequency fiber laser at 1 950 nm based on thulium-doped silica fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(22):5283-5286.
- [14] QI S X, HOU Y B, ZHANG Q, *et al.* High-power, narrow linewidth single-frequency fiber laser at 2 μm [C]. *Proceedings of the SPIE 10619, 2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Laser Technology and Applications, Beijing, China*, 2018.
- [15] HAN W G, YAN F P, FENG T, *et al.* Wavelength-switchable single-longitudinal-mode thulium-doped fiber laser with sampled fiber Bragg grating [J]. *IEEE Access*, 2021, 9:62212-62218.
- [16] 白燕, 延凤平, 韩文国, 等. 基于全保偏光纤结构的高稳定性激光相位解调系统 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(4):739-746.

- BAI Y, YAN F P, HAN W G, *et al.* High-stability laser phase demodulation system based on 3×3 polarization maintaining fiber coupler [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(4):739-746. (in Chinese)
- [17] LEMIEUX J F, BELLEMARE A, LATRASSE C, *et al.* 100 GHz frequency step-tunable hybrid laser based on a vernier effect between a Fabry-Perot cavity and a sampled fiber Bragg grating [C]. *Proceedings of Advanced Semiconductor Lasers and Their Applications, Santa Barbara, California*, 1999:1-186.
- [18] FENG T, JIANG M L, WEI D, *et al.* Four-wavelength-switchable SLM fiber laser with sub-kHz linewidth using superimposed high-birefringence FBG and dual-coupler ring based compound-cavity filter [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(25):36662-36679.
- [19] XU D, YANG F, CHEN D J, *et al.* Laser phase and frequency noise measurement by Michelson interferometer composed of a 3×3 optical fiber coupler [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(17):22386-22393.
- [20] DI DOMENICO G, SCHILT S, THOMANN P. Simple approach to the relation between laser frequency noise and laser line shape [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49(25):4801-4807.
- [21] YIN T C, SONG Y F, JIANG X G, *et al.* 400 mW narrow linewidth single-frequency fiber ring cavity laser in $2 \mu\text{m}$ waveband [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(11):15794-15799.
- [22] WANG W T, SONG Z Q, QI H F, *et al.* Study of a single longitudinal fiber ring laser with a π phase-shifted fiber Bragg grating [J]. *Opt. Commun.*, 2017, 396:88-91.
- [23] FOSTER S. Low-frequency thermal noise in optical fiber cavities [J]. *Phys. Rev. A*, 2012, 86(4):043801-1-8.
- [24] FOSTER S, CRANCH G A, TIKHOMIROV A. Experimental evidence for the thermal origin of $1/f$ frequency noise in erbium-doped fiber lasers [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, 79(5):053802.



韩文国(1985 -),男,甘肃张掖人,博士研究生,2013年于北京交通大学获得学士学位,主要从事 $2 \mu\text{m}$ 波段光纤激光器方面的研究。
E-mail: 14111021@bjtu.edu.cn



冯亭(1986 -),男,河北张家口人,博士,副教授,2014年于北京交通大学获得博士学位,主要从事光纤激光、光纤传感器及其应用等方面的研究。
E-mail: wlxyft@hbu.edu.cn



延凤平(1966 -),男,山西兴县人,博士,教授,1996年于北方交通大学获得博士学位,主要从事光纤激光器、光纤传感器、光纤通信、基于太赫兹超材料等方面的研究。
E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn