

基于保偏掺铥光纤饱和吸收体的 2 μm 波段 超窄线宽光纤激光器

白燕¹, 延凤平^{1*}, 冯亭², 韩文国¹, 张鲁娜¹, 程丹¹, 白卓娅¹, 温晓东³

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, 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044;

²光子信息技术创新中心, 河北省光电信息材料重点实验室, 河北大学物理科学与技术学院, 河北 保定 071002;

³曲阜师范大学物理工程学院, 山东 曲阜 273165

摘要 制作了一种单纵模超窄线宽环形腔掺铥光纤激光器, 使用未抽运的保偏掺铥光纤作为饱和吸收体, 结合光纤栅法布里-珀罗滤波器, 实现了激光器的单纵模运转和超窄线宽输出。实验结果表明: 激光器在室温下可以获得中心波长为 1942.03 nm、光信噪比为 63 dB 的稳定输出。通过 100 min 的连续测量, 激光输出功率的波动小于 0.62 dB, 中心波长的波动小于光谱仪的最小分辨率 0.05 nm, 在一定时间内具有良好的稳定性。采用基于频率噪声的线宽测量方法测得 0.01 s 测量时间下的线宽为 300 Hz, 在 0.1 s 测量时间下的线宽约为 3 kHz。所制作的激光器将在对 2 μm 波段激光纵模及线宽特性有严格要求的领域具有重要应用价值。

关键词 激光器; 光纤激光器; 单纵模; 掺铥; 饱和吸收体

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0101003

Ultra-Narrow-Linewidth Fiber Laser in 2 μm Band Using Saturable Absorber Based on PM-TDF

Bai Yan¹, Yan Fengping^{1*}, Feng Ting², Han Wenguo¹, Zhang Luna¹, Cheng Dan¹,
Bai Zhuoya¹, Wen Xiaodong³

¹Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication of Electromagnetic Compatibility,
Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

²Photonics Information Innovation Center, Hebei Key Lab of Optic-Electronic Information and Materials,
College of Physics Science & Technology, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China;

³College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China

Abstract In this paper, a ring cavity Tm-doped fiber laser with both single longitudinal mode and ultra narrow linewidth is proposed and demonstrated. An unpumped polarization maintaining Tm-doped fiber (PM-TDF) and a narrowband F-P filter are combined to realize the single longitudinal mode lasing operation and ultra narrow linewidth. Experimental results show that the proposed laser is stably operating at central wavelength of 1942.03 nm and the optical signal-to-noise ratio is 63 dB at room temperature. Through 100 minutes of continuous measurement, the output power fluctuation is less than 0.62 dB and the center wavelength shift is less than the minimum resolution of the spectrometer of 0.05 nm. This indicates that it has good stability for a certain period of time. Through the linewidth measurement based on frequency noise, linewidth of the laser under the measuring time of 0.01 s and 0.1 s are 300 Hz and 3 kHz, respectively. The proposal will be applied significantly in the field where the longitudinal mode and linewidth specificity of a laser are strictly required for 2 μm wave band.

Key words lasers; fiber laser; single longitudinal mode; Tm-doped; saturable absorber

OCIS codes 140.3510; 140.3560; 140.3570

收稿日期: 2018-07-16; 修回日期: 2018-09-16; 录用日期: 2018-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(61620106014)、山东省高等学校科技计划项目(J17KA089)

* E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn

1 引言

单纵模掺铥光纤激光器可以输出波段在 $2\ \mu\text{m}$ 附近的光,该波段的光对人眼安全,在医疗、雷达系统、大气探测、光电对抗等方面获得了广泛关注,具有潜在的应用价值^[1-6]。1988年,Hanna等^[7]将797 nm的染料激光器作为抽运源,首次得到了1.88~1.96 μm 波段的连续激光输出。随着技术的不断进步,掺铥光纤激光器的输出功率逐步提高,涌现出了大量有关大功率掺铥光纤激光器(功率高于50 W)的报道^[8-12]。然而,包括纵模和横模在内的输出特性会影响到掺铥光纤激光器在雷达系统及材料处理等领域的深入应用。因此,基于各种技术的单纵模掺铥光纤激光器被相继研究和报道。Agger等^[13]于2004年首次将790 nm的钛宝石激光器作为抽运源,获得了中心波长为1735 nm的分布反馈式(DBF)单纵模掺铥光纤激光器。Geng等^[14]于2007年报道了一种高效单频掺铥光纤激光器,采用高浓度掺杂的锗酸盐玻璃光纤作为分布布拉格反射(DBR)腔的增益光纤,在1970~2017 nm的波长范围内获得了连续的激光输出,其线宽大于3 kHz。Zhang等^[15]于2011年研制了一种DBR腔的单纵模掺铥光纤激光器,并在1943 nm处获得了580 mW的输出功率。随后几年,有很多基于这两种结构的单纵模掺铥光纤激光器的报道^[16-19],然而这些激光器都难以获得较大的输出功率,功率只有几百毫瓦。可通过提高增益光纤的掺杂浓度和抽运功率来提高1.5 μm 波段激光器的输出功率^[20],但铥离子的掺杂浓度受限于淬火效率,且最大增益系数小于 $2\ \text{dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ ^[21],因此2 μm 波段激光器的输出功率很难通过上述方式得以提高。此外,短腔结构还存在严重的空间烧孔效应,且不易通过插入其他滤波器器件来进一步提升性能。采用行波结构的环形腔可以有效抑制空间烧孔效应,环形腔较长的腔长也可以有效提高输出功率,且可在其中加入窄带滤波器器件来实现不同输出性能的激光,这在1.5 μm 波段已有很多报道^[22-24]。此外,可以在腔内加入未抽运的掺杂光纤作为饱和吸收体(SA)来实现窄带滤波和单纵模运转^[25-26],这是利用了饱和吸收体中由驻波饱和效应形成的动态自追踪窄带光栅的原理,但驻波的稳定性会受两个反向传输干涉光偏振态的影响。当将单模掺杂光纤作为饱和吸收体时,偏振态易受外界扰动而发生变化,从而导致动态自追踪光栅的稳定性降低。如文献^[27]提到的线形腔掺铥光纤

激光器,虽然使用未抽运单模掺铥光纤作为饱和吸收体就得到了单纵模激光输出,但激光器的整体稳定性较差,输出光信噪比(OSNR)只有32 dB。

本文提出了一种环形腔结构的单纵模窄线宽掺铥光纤激光器,其结构简单,在室温条件下具有63 dB的高OSNR和良好的稳定性。在环形腔中,通过加入窄带光纤布拉格光栅(FBG)进行波长初选,然后结合法布里-珀罗(F-P)滤波器和未抽运的偏振掺铥光纤(PM-TDF)饱和吸收体形成的自追踪动态光栅,可以实现单纵模激光输出。运用基于频率噪声分析的线宽测量方法对激光器的输出线宽进行测量,在0.01 s的测量时间下测得的线宽为300 Hz,在0.1 s测量时间下测得的线宽约为3 kHz。

2 实验系统与理论

本实验所提单纵模掺铥光纤激光器的结构图如图1所示。

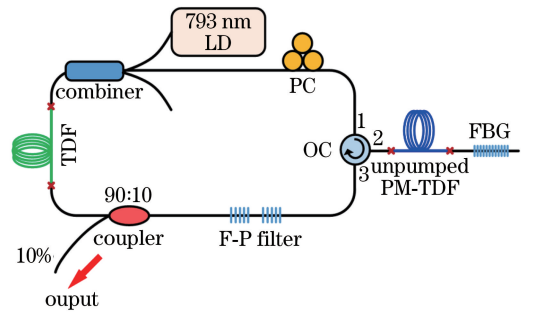


图1 单纵模掺铥光纤激光器的结构图

Fig. 1 Configuration of single longitudinal mode Tm-doped fiber laser

将793 nm抽运激光器(LD)的输出通过 $(2+1)\times 1$ 合束器输入激光谐振腔中,用于对增益介质光纤进行包层抽运。激光器谐振腔内的增益介质为一段长为4.5 m、纤芯和包层直径分别为10 μm 和130 μm 的商用掺铥光纤(TDF),内包层边界为八边形,用以提高抽运效率。偏振控制器(PC)用来调节激光腔内的偏振态。环形器(OC)用来确保环形腔内的光路单向运行。OC的端口2处依次熔接了一段长为30 cm的未抽运的PM-TDF与一个均匀的光纤布拉格光栅。OC的使用确保了793 nm的抽运光不能到达未抽运的PM-TDF。均匀的光纤布拉格光栅用来对激光器的谐振波长进行初选,结合腔内的一个具有窄带滤波功能的法布里-珀罗(F-P)滤波器,可以抑制大部分的激光纵模。激光由耦合器的10%端口输出。整个环形腔的腔长约为14 m,对应的纵模间隔为14.78 MHz。

有源光纤环形腔的传输函数为^[28]

$$t = \frac{(1 - \gamma_1)(1 - \gamma_2)k_1 k_2 G \exp(-2\alpha l_1)}{1 + A^2 - 2A \cos \omega n L / c}, \quad (1)$$

式中: $A = \sqrt{(1 - \gamma_1)(1 - \gamma_2)(1 - k_1)(1 - k_2)} \cdot \sqrt{G \exp(-2\alpha L)}$; γ_1, γ_2 与 k_1, k_2 分别为合束器与耦合器的插入损耗和耦合系数; G 为腔内的增益; α 为光纤的衰减系数; L 为环形腔的腔长; l_1 为合束器与耦合器之间的光纤长度; ω 为光信号角频率; n 为模式的有效折射率; c 为真空中的光速。取腔长 L 为 14 m, l_1 为 $L/2$, 根据(1)式进行数值仿真可得到有源光纤环形腔的输出频谱如图 2(a)所示。由图 2(a)可见, 输出频谱呈周期性, 环形腔的纵模间隔为 14.78 MHz。此时输出光谱在增益带宽内表现为多纵模运转状态。

根据光纤光栅的耦合模理论可知均匀光纤布拉格光栅的反射率为^[29]

$$R = \frac{\sinh^2(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L_g)}{\cosh^2(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L_g) - (\hat{\sigma}^2 / \kappa^2)}, \quad (2)$$

式中: L_g 为光纤布拉格光栅的长度; $\kappa = \pi v \delta \bar{n}_{\text{eff}} / \lambda$ (v 为折射率调制的条纹可见度, λ 为波长, $\delta \bar{n}_{\text{eff}}$ 为常数, 对应光纤光栅一个周期内平均有效折射率的变化); $\hat{\sigma} = \delta + \sigma - 0.5 d\phi / dz$, 均匀光纤布拉格光栅沿 z 向均匀分布, 因而 $d\phi / dz = 0$; $\delta = \beta - \pi / \Lambda =$

$2\pi n_{\text{eff}}(1/\lambda - 1/\lambda_D)$, λ_D 为周期是 Λ 的光纤布拉格光栅的反射中心波长, n_{eff} 为有效折射率; $\sigma = 2\pi \delta \bar{n}_{\text{eff}} / \lambda$ 。取 $L_g = 2$ cm, $\lambda_D = 1942$ nm, $v = 1$, $\delta \bar{n}_{\text{eff}} = 1.15 \times 10^{-4}$, 进行仿真得到的均匀光纤布拉格光栅的反射谱如图 2(b)中的红色虚线所示。由图 2(b)可知, 光纤布拉格光栅反射谱的中心波长为 1942 nm, 3 dB带宽约为 14.6 GHz, 远大于环形腔的纵模间隔, 因而, 经过光纤布拉格光栅的波长初选后激光器依然处于多纵模运转。

使用两个具有相同中心波长的光纤布拉格光栅构成的光纤布拉格光栅 F-P 标准具可以获得良好的窄带滤波性能。光纤光栅 F-P 滤波器的透射率为^[30]

$$T_{\text{F-P}} = \frac{1}{1 + F \sin^2(\beta h - \phi_\rho)}, \quad (3)$$

式中: $F = 4R / (1 - R)^2$; h 为两个光纤光栅之间的间距; ϕ_ρ 为光纤光栅反射率相移因子。设构成 F-P 滤波器的两个相同的光纤光栅的长度为 5 mm, 二者之间的距离为 4 mm, 计算得到的 F-P 滤波器透射谱如图 2(b)中蓝色实线所示。由图 2(b)可见, F-P 腔中光的干涉产生了两个透射通道, 右侧透射通道的中心波长为 1942 nm, 3 dB 带宽约为 3.9 GHz, 与均匀光纤布拉格光栅的反射谱(红色虚线)相叠加, 在二者的共同作用下可对中心波长为 1942 nm 的光谱进行波长选择与窄带滤波。

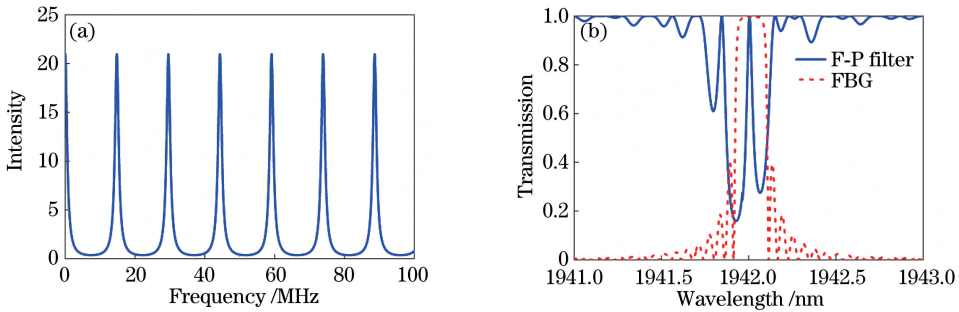


图 2 (a)有源光纤环形腔的输出频谱;(b)均匀光纤布拉格光栅的反射谱(红色虚线)与 F-P 滤波器的透射谱(蓝色实线)

Fig. 2 (a) Output spectrum of active fiber ring cavity; (b) reflection spectrum of uniform FBG (red dashed line) and transmission spectrum of F-P filter (solid blue line)

实验中, 均匀光纤布拉格光栅采用相位掩模法制作, 长度为 2 cm; F-P 滤波器由两个参数相同且长度为 5 mm 的光纤布拉格光栅串联而成, 光栅之间的间隔为 4 mm。实验中使用的光纤光栅由 KrF 准分子激光器通过均匀相位掩模板扫描写入, 均匀相位掩模板的周期为 1347.3 nm。采用超连续光源 (Koheras Co., SuperK) 与 AQ6375 型(分辨率为 0.05 nm)光谱分析仪 (OSA, Yokogawa) 对光纤布

拉格光栅的反射谱以及 F-P 滤波器的透射谱进行测量, 得到的光纤布拉格光栅的反射光谱和 F-P 滤波器的传输光谱分别如图 3 中的红色虚线和蓝色实线所示。由图 3 可知, 光纤布拉格光栅的反射中心波长为 1942.03 nm, 而 F-P 滤波器有两个窄带滤波通道(C-1 和 C-2), 其透射中心波长、3 dB 带宽分别为 1941.83, 0.07 nm 和 1942.03, 0.07 nm。FBG 的反射中心波长与 F-P 滤波器 C-2 通道的透射中心波

长一致,且二者反射谱与透射谱的对应区域只存在 C-2 通道的一个透射峰。由于实验时光纤存在微小的轴向应力,折射率调制深度无法精准控制,因此单侧曝光存在不均匀性等问题,实验得到的光谱特性与仿真计算有些许偏离。另外,所使用的 OSA 的分辨率有限,不能准确测量 F-P 滤波器的两个窄带滤波通道的带宽,其实际带宽应更窄,而且两个滤波通道的透射率也不能被准确测量。

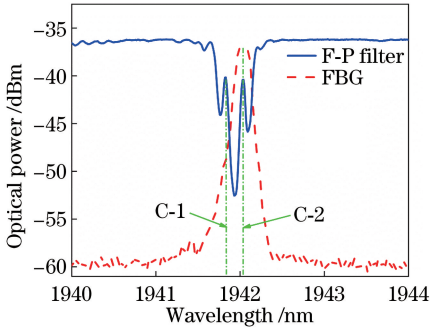


图 3 实验测得的光纤布拉格光栅的反射光谱(红色虚线)和 F-P 滤波器的传输光谱(蓝色实线)

Fig. 3 Reflectivity spectrum of FBG (red dashed line) and transmission spectrum of F-P filter (blue solid line)

当 LD 输出功率高于 TDF 的受激辐射阈值后,谐振腔中将会形成激光振荡。基本的选模原理可描述为:当 TDF 的自发辐射光到达光纤布拉格光栅后,在其反射带宽内的光被反射回激光谐振腔;FBG 反射光到达 F-P 滤波器,由于光纤布拉格光栅的反射谱只覆盖了 F-P 滤波器的 C-2 通道,因此只有波长落在 C-2 带宽内的光可以通过,并再次到达 TDF 后引起受激辐射。经过一段时间的运行后,因 TDF 的均匀加宽效应,故而 C-2 模式中增益高的部分将在增益竞争中获胜,并得到最终的稳定振荡;然而,由于 C-2 的带宽可能不够窄,最终形成稳定振荡的模式可能不止一个;此时,经过 PM-TDF 输入光纤布拉格光栅的光被反射而再次进入 PM-TDF 后,会因驻波效应导致的饱和吸收形成动态自追踪窄带光栅,对腔内振荡的几个模式进行再次滤波。如果 PM-TDF 的参数合适,则可以保证只有一个纵模在激光谐振腔内稳定振荡,从而得到单纵模激光输出。

当信号光通过未抽运的掺铒光纤时,会被光纤末端的反射镜反射,正反两个方向的光信号在这段光纤内形成驻波,此时的光强和折射率沿此光纤呈周期性变化,从而形成动态自追踪窄带光栅,实现饱和吸收体的功能。然而,当将普通的单模掺铒光纤作为饱和吸收体时,其偏振态极易发生变化,削弱其

中所形成的驻波的稳定性。实验中采用未抽运的 PM-TDF 作为饱和吸收体,可以有效消除由偏振态随机变化引起的动态自追踪窄带光栅不稳定的问题,从而有效提高掺铒光纤激光器单纵模运行的稳定性。因为当未抽运的 PM-TDF 用作饱和吸收体时,处于偏振状态的两束反向的光沿相同的折射率主轴传播干涉,可以提高干涉光强的衬比度,形成稳定的驻波,而且保偏光纤抗外界干扰能力强,增强了动态光栅的稳定性。饱和吸收体的稳态模型为^[31]

$$\frac{d\bar{E}_p^+}{d\bar{z}} = -\frac{\alpha_p l}{2\sqrt{B^2 - 4|A_p|^2}} \times \left(\bar{E}_p^+ - \frac{B - \sqrt{B^2 - 4|A_p|^2}}{2|A_p|^2} A_p \bar{E}_p^- \right), \quad (4)$$

$$\frac{d\bar{E}_p^-}{d\bar{z}} = +\frac{\alpha_p l}{2\sqrt{B^2 - 4|A_p|^2}} \times \left(\bar{E}_p^- - \frac{B - \sqrt{B^2 - 4|A_p|^2}}{2|A_p|^2} A_p \bar{E}_p^+ \right), \quad (5)$$

$$A_p = \bar{E}_m^+ \cdot \bar{E}_m^{-*} \exp \left[-2i \frac{4\pi n(f_p - f_m) l}{c} \bar{z} \right], \quad (6)$$

$$B = 1 + |\bar{E}_m^+|^2 + |\bar{E}_m^-|^2, \quad (7)$$

式中:下标 m 和 p 分别表示主信号光和探测信号光;上标+和-分别表示光信号沿前向传输和沿后向传输; $E_{p,m}$ 为光场振幅($\bar{E}_{p,m} = E_{p,m} \sqrt{\pi a^2 / P^{sat}}$, a 为光纤模场半径, P^{sat} 为饱和功率); $\bar{z} = z/l$ ($0 \leq \bar{z} \leq 1$); α_p 为光纤的吸收系数;l 为作为饱和吸收体的光纤的长度;f 为光频率。求解上述非线性耦合常微分方程并进行数值仿真,就可以得到典型的饱和吸收体的反射谱,如图 4(a)所示。仿真中的参数为: $l=4$ m, $\alpha_p=2$ dB·m⁻¹,主信号的归一化输入功率 $P_{in} = \pi a^2 |\bar{E}_m^+|^2 / P^{sat} = |\bar{E}_m^+(z=0)|^2 = 10$ 。由图 4(a)可以看出,饱和吸收体形成的动态自追踪光栅形成了一个带通滤波器,该滤波器的中心传输频率为主信号的传输频率。当所选取的作为饱和吸收体的掺杂光纤的其他参数都已确定时,影响此带通滤波器带宽和反射率的因素便是光纤的长度。图 4(b)为饱和吸收体长度对带宽和中心反射率的影响,可以看出,当光纤长度增加时,带宽变窄,中心反射率随之下降。这说明饱和吸收体越长,动态光栅的带宽越小,越利于实现线宽压窄和单纵模的选取;但是过长的饱和吸收体会降低光谱的输出功率,进而影响激光器的斜率效率。因此,要在满足单纵模选取的带宽条件下,尽可能取较短的饱和吸收体,从而达到最优化的输出。

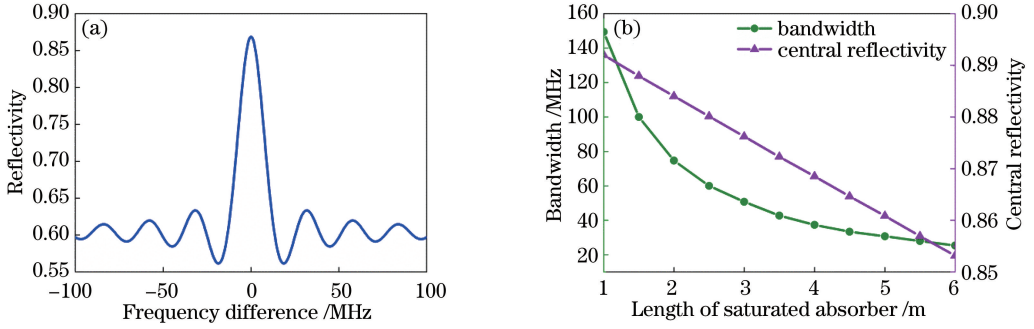


图 4 (a)饱和吸收体的反射谱;(b)饱和吸收体长度对带宽和中心反射率的影响

Fig. 4 (a) Reflection spectrum of saturated absorber; (b) influences of saturated absorber length on bandwidth and central reflectivity

根据已有的报道^[31-32]可知,该模型与实验结果在波形上吻合得较好,这说明上述对饱和吸收体的定性分析是可靠的,但对具体带宽的估计还不够准确。在定量分析方面,研究人员计算饱和吸收体中所形成的动态自追踪窄带光栅的带宽表达式^[33-34]为

$$\Delta f = \frac{c}{\lambda} \kappa_g \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2n_{\text{eff}}L_{\text{SA}}}\right)^2}, \quad (8)$$

式中: λ 为光栅中最大反射处的中心波长; Δn 为折射率的周期性空间变化,可通过Kramers-Kronig关系得出; n_{eff} 为有效折射率; L_{SA} 为饱和吸收体的长度; κ_g 为动态光栅的耦合系数,可表示为

$$\kappa_g = \frac{2\Delta n}{n_{\text{eff}}\lambda}. \quad (9)$$

经估算,未抽运PM-TDF作为饱和吸收体所形成的动态光栅的带宽小于11.89 MHz,小于激光器的纵模间隔,可以保证单纵模的选取。

综上所述,此结构的单纵模选取过程如下:在环形腔中通过窄带光纤布拉格光栅进行波长初选,然后结合F-P滤波器和未抽运的PM-TDF作为饱和吸收体形成的自追踪动态光栅实现单纵模激光的输

出,具体的单纵模选取原理图如图5所示。增益光纤的增益带宽如图5(a)所示,增益带宽与光纤中粒子的掺杂浓度、抽运功率、光纤长度有关。图5(b)表示环形腔内的纵模,纵模间隔为14.78 MHz,与谐振腔类型和腔长有关。光纤布拉格光栅的3 dB带宽约为14.38 GHz,如图5(c)所示。经过谐振腔和光纤布拉格光栅的共同作用,增益带宽内的纵模数约为972个,仍然为多纵模运转,因而需要用F-P滤波器继续进行纵模的选择,同时也可对线宽产生压窄作用。F-P滤波器由两个间距很短的光纤布拉格光栅构成,由于多次反射的光信号产生干涉,因此其透射谱呈现出干涉型条纹与光纤布拉格光栅光谱的叠加效果。F-P滤波器的C-2通道3 dB带宽约为5.58 GHz,如图5(d)所示。经F-P滤波器滤波后,增益带宽内的纵模数下降到约377个,要继续通过图5(e)所示的饱和吸收体,以获得单纵模输出。由未抽运PM-TDF作为饱和吸收体所形成的动态光栅的带宽小于11.89 MHz,该值小于激光器的纵模间隔,因而可以保证单一纵模的选取,单纵模的选取结果如图5(f)所示。在整个纵模选取的过程中,F-

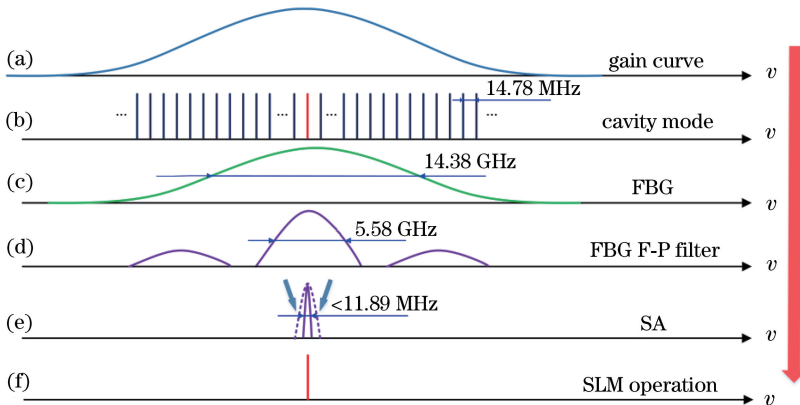


图 5 激光器单纵模选取原理示意图

Fig. 5 Schematic of single longitudinal mode selection principle of the laser

P 滤波器与饱和吸收体的共同作用是为了最终获得单一且稳定的单纵模输出;否则选取结果中会存在模式跳变,加大系统的不稳定性。

3 实验结果与分析

当抽运输入功率为 4.68 W 时,通过仔细调节偏振控制器,将得到的掺铋光纤激光器连接到光谱仪后进行测量,测得的稳定的激光输出光谱如图 6(a) 所示。激光器输出光谱的中心波长为 1942.03 nm,与 F-P 滤波器的 C-2 通道的中心波长一致。从图 6(a) 中还可看出,输出激光的 OSNR 为 63 dB,表明

该激光器谐振腔具有较高的 Q 值,具有优良的模式选择性能。每隔 10 min 对输出光谱进行一次扫描,连续扫描 10 次得到的稳定光谱如图 6(b) 所示。激光器输出光谱的中心波长和峰值功率在观测时间内均无明显波动,表明该激光器在室温条件下具有良好的稳定性。为了进一步研究该激光器的输出稳定性,进行了中心波长和输出功率波动的连续扫描,激光器中心波长和输出功率的波动如图 7 所示。由图 7 可知,激光器中心波长的波动范围仅为 0.04 nm,小于光谱仪的最小分辨率 0.05 nm,且输出功率的波动仅为 0.62 dB。

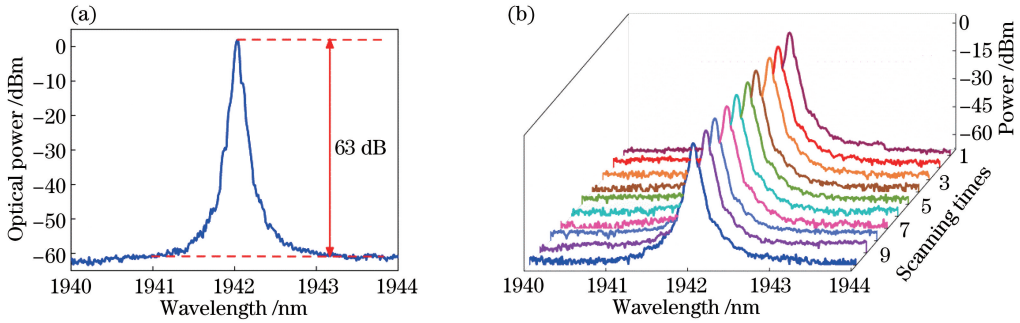


图 6 (a) 激光器的输出光谱;(b) 间隔 10 min 连续扫描 10 次的稳定光谱

Fig. 6 (a) Typical output spectrum of laser; (b) output spectra of 10-times repeated scans with 10 min intervals

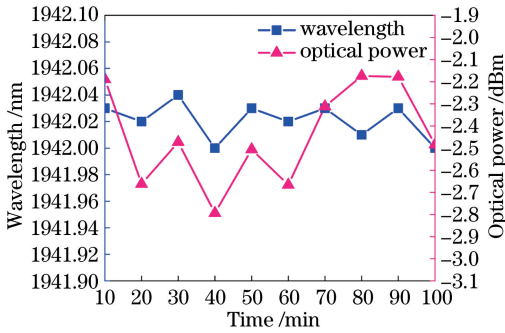


图 7 激光器中心波长和输出功率的波动

Fig. 7 Fluctuations of laser center wavelength and output power

激光器的输出功率随抽运功率的变化如图 8 所示,通过对图中的部分数据进行线性拟合可知,激光器的阈值功率约为 2.70 W,斜率效率约为 0.2%。阈值功率较高及斜率效率较低的原因是实验中采用的抽运源为多模抽运,且为包层抽运。如果改用单模抽运源及纤芯抽运的方式,阈值功率和斜率效率均会有明显的改善。从图 8 中可看出,当抽运功率大于 3.18 W 后,输出功率呈线性增长。这是因为,当抽运功率较低时,谐振腔内的损耗较大,导致受激辐射较弱,当抽运功率增大后,TDF 中的上能级粒子的受激辐射随抽运功率增大而增强。考虑到继续

增加抽运功率可能会对环形器等器件造成不可逆的损伤,因而实验中未继续增大输入抽运功率。

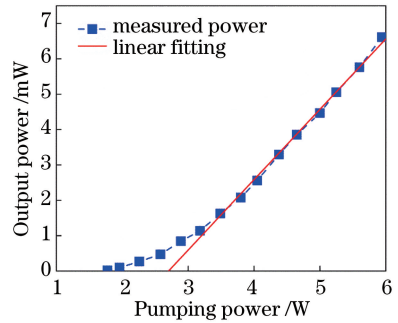
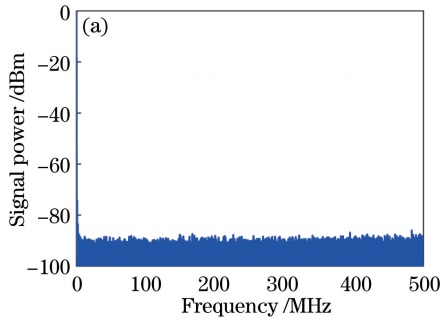


图 8 激光器输出功率随抽运功率的变化
Fig. 8 Variation of output power of laser with pumping power

激光器的单纵模特性可通过自零差法进行测定分析。将激光器的输出端连接到一个在 2 μm 波段有高响应度的 1 GHz 光电探测器(PD)模块上,将光信号转换为电信号,接着将转换后的电信号接入 N9010A 型频谱分析仪(ESA)中。理论上,当输出信号中只有一个激光纵模存在时,在 ESA 上只能观测到零频频率;当输出信号中有两个及两个以上的激光纵模存在时,频谱仪上将会显示有非零频率拍频噪声。

图 9(a) 为测得的激光器的频谱, 可知: 在 500 MHz 扫描范围内没有任何拍频信号存在, 表明该激光器处于良好的单纵模运转状态。图 9(b) 为从激光器结构中移除未抽运的 PM-TDF 后的频谱,



可以看到出现了明显的由纵模拍频产生的频率峰, 说明此时的激光器处于多纵模运转状态。由此可知, 未抽运的 PM-TDF 的使用对于该激光器单纵模运转的形成具有决定性作用。

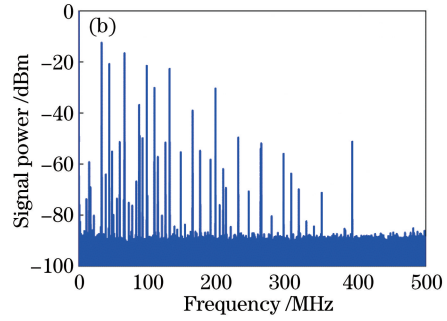


图 9 激光器频谱图。(a)有饱和吸收体;(b)无饱和吸收体

Fig. 9 Frequency spectra of proposed laser. (a) With saturable absorber; (b) without saturable absorber

传统的用于 1.5 μm 波段的延迟自外差线宽测量方法需要几十 km 甚至上百 km 的石英单模光纤作为延迟线, 这对处于 2 μm 波段的掺铥光纤激光器来说是行不通的, 因为 2 μm 波段激光在石英单模光纤中的损耗较大, 这使得可使用的延迟线长度大大缩短, 会导致线宽的测量结果极不准确。而且, 传统的线宽测量方法由于测量时间较长, 得到的线宽结果只是线宽的一种笼统反映, 不能反映激光器的噪声特性。激光器的输出频率稳定性会受到温度、振动等低频因素的影响, 在一定时间内, 激光器输出的中心频率将会在一定范围内波动, 表现出的线宽实际上是本征线宽被展宽后的一个结果。

器应用的参考是合适的。这种通过在特定时间标定线宽的表达式已在商用光纤激光器中获得应用^[36]。此外, 这种基于频率噪声分析的线宽测量方法还可以获得频率噪声的频域分布特性。

这里采用一种基于频率噪声和 β 分割线来计算线宽的测量方法^[35], 所用到的光纤延迟线长度仅为 50 m。这种线宽测量方法得到的线宽会随测量时间的增加而增大, 这是由频率波动的功率谱密度中 $1/f$ 型噪声引起的。经过测量与分析计算得到了该激光器的频率噪声谱, 如图 10 所示。当测量时间很短(0.01 s)时, 受温度、振动等低频因素的影响较小, 最小线宽(本征线宽)约为 300 Hz, 此时对应的频率噪声为其白噪声的极限部分。线宽会随着测量时间的增加而增大, 这是由于频率噪声功率谱密度中的闪耀噪声部分会随测量时间的增加而发散。当测量时间为 0.1 s 时, 低频扰动因素对输出信号的影响较大, 此时线宽约为 3 kHz。对光纤激光器而言, 本课题组认为, 0.1 s 的测量时间已经足够衡量温度、振动等低频因素对测量结果的影响, 而且 0.1 s 对于大多数窄线宽激光的应用场合已是较长的时间, 因此在 0.1 s 测量时间下得到的激光线宽用于激

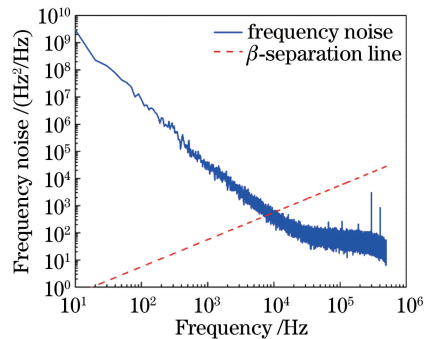


图 10 激光器的频率噪声谱

Fig. 10 Frequency noise spectrum of laser

4 结 论

本研究通过实验验证了基于 F-P 滤波器和未抽运的 PM-TDF 饱和吸收体共同作用在环形腔掺铥光纤激光器中实现单纵模窄线宽激光输出的方案。在室温条件下, 提出的光纤激光器系统获得了中心波长为 1942.03 nm、OSNR 为 63 dB 的稳定激光输出。在 100 min 的连续测量时间内, 激光器输出功率的波动小于 0.62 dB, 中心波长的波动小于 OSA 的最小分辨率 0.05 nm, 表明激光器输出具有良好的稳定性。通过自零差法测量验证了激光器的单纵模运转特性, 通过基于频率噪声分析的激光线宽测量方法测得激光器在 0.01 s 测量时间下的线宽为 300 Hz, 在 0.1 s 测量时间下线宽约为 3 kHz; 此

外,还得到了激光器频率噪声的频域分布特性。提出的光纤激光器可以满足对 $2\ \mu\text{m}$ 波段单纵模激光线宽特性有严格要求的领域的应用需求。

参 考 文 献

- [1] Niwa Massaki A B M, Eimpunth S, Fabi S G, *et al.* Treatment of melasma with the 1927-nm fractional thulium fiber laser: a retrospective analysis of 20 cases with long-term follow-up[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2013, 45(2): 95-101.
- [2] 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.
- [3] de Young R J, Barnes N P. Profiling atmospheric water vapor using a fiber laser lidar system [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(4): 562-567.
- [4] Li J F, Sun Z Y, Luo H Y, *et al.* Wide wavelength selectable all-fiber thulium doped fiber laser between 1925 nm and 2200 nm[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5387-5399.
- [5] Ma W Z, Wang T S, Su Y W, *et al.* Wavelength-spacing switchable dual-wavelength single longitudinal mode thulium-doped fiber laser at $1.9\ \mu\text{m}$ [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(6): 1-8.
- [6] He X, Xu S H, Li C, *et al.* 195 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.
- [7] Hanna D C, Jauncey I M, Percival R M, *et al.* Continuous-wave oscillation of a monomode thulium-doped fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 1988, 24(19): 1222-1223.
- [8] Frith G, Lancaster D G, Jackson S D. 85 W Tm^{3+} -doped silica fibre laser[J]. *Electronics Letters*, 2005, 41(12): 687-688.
- [9] Moulton P F, Rines G A, Slobodtchikov E V, *et al.* Tm-doped fiber lasers: fundamentals and power scaling [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(1): 85-92.
- [10] Kneis C, Donelan B, Berrou A, *et al.* Actively mode-locked Tm^{3+} -doped silica fiber laser with wavelength-tunable, high average output power[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1464-1467.
- [11] Tang Y L, Huang C Y, Wang S L, *et al.* High-power narrow-bandwidth thulium fiber laser with an all-fiber cavity[J]. *Optics Express*, 2012, 20(16): 17539-17544.
- [12] Liu Y Z, Xing Y B, Xu Z W, *et al.* Research progress in high power Tm^{3+} -doped silica fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 050004.
- 刘茵紫, 邢颖滨, 徐中巍, 等. 高功率掺铥石英光纤激光器研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 050004.
- [13] Agger S, Povlsen J H, Varming P. Single-frequency thulium-doped distributed-feedback fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(13): 1503-1505.
- [14] Geng J H, Wu J F, Jiang S B, *et al.* Efficient operation of diode-pumped single-frequency thulium-doped fiber lasers near $2\ \mu\text{m}$ [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(4): 355-357.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Shi W, Petersen E B, Nguyen D T, *et al.* 220 μm monolithic single-frequency Q-switched fiber laser at $2\ \mu\text{m}$ by using highly Tm-doped germanate fibers[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3575-3577.
- [18] Fang Q, Shi W, Tian X P, *et al.* 978 nm single frequency actively-switched all fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(9): 874-876.
- [19] Geng J, Wang Q, Jiang Z, *et al.* Kilowatt-peak-power, single-frequency, pulsed fiber laser near $2\ \mu\text{m}$ [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(12): 2293-2295.
- [20] Xu S H, Yang Z M, Liu T, *et al.* An efficient compact 300 mW narrow-linewidth single frequency fiber laser at $1.5\ \mu\text{m}$ [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1249-1254.
- [20] Xu S H, Yang Z M, Liu T, *et al.* An efficient compact 300 mW narrow-linewidth single frequency fiber laser at $15\ \mu\text{m}$ [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1249-1254.
- [21] Jiao M J, Wang X, Hu L L. Influences of Tm_2O_3 doping concentration on thermal stability and spectroscopic properties of germanate glass [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0603001.
- 焦孟珺, 王欣, 胡丽丽. Tm_2O_3 掺杂浓度对锗酸盐玻璃热稳定性及光谱性质的影响 [J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0603001.
- [22] Cheng X P, Shum P, Tse C H, *et al.* Single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser based on high finesse fiber Bragg grating Fabry-PÉrot etalon [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(12): 976-978.

- [23] Sun T G, Guo Y B, Wang T S, *et al.* Widely tunable wavelength spacing dual-wavelength single longitudinal mode erbium doped fiber laser [J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(3): 235-238.
- [24] Yeh C H, Chow C W, Chen K H, *et al.* Employing dual-saturable-absorber-based filter for stable and tunable erbium-doped fiber ring laser in single-frequency[J]. *Laser Physics*, 2011, 21(5): 924-927.
- [25] Xu P, Hu Z L, Ma M X, *et al.* Mapping the optical frequency stability of the single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring lasers with saturable absorber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 49: 337-342.
- [26] Feng S C, Lu S H, Peng W J, *et al.* Tunable single-polarization single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser employing a CMFBG filter and saturable absorber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 47: 102-106.
- [27] Bai Y, Yan F P, Sun J H, *et al.* Single-longitudinal-mode thulium-doped fiber laser using Fabry-Perot filter and saturable absorber [J]. *Science & Technology Review*, 2016, 34(16): 104-107.
白燕, 延凤平, 孙景辉, 等. 基于 F-P 滤波器和饱和吸收体的单纵模掺铥激光器 [J]. *科技导报*, 2016, 34(16): 104-107.
- [28] Okamura H, Iwatsuki K. A finesse-enhanced Er-doped-fiber ring resonator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(11): 1554-1560.
- [29] Erdogan T. Fiber grating spectra [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [30] Guan B O, Yu Y L, Ge C F, *et al.* Theoretical studies on transmission characteristics of fiber grating Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(1): 34-38.
关柏鸥, 余有龙, 葛春风, 等. 光纤光栅法布里-珀罗腔透射特性的理论研究 [J]. *光学学报*, 2000, 20(1): 34-38.
- [31] Kang M S, Lee M S, Yong J C, *et al.* Characterization of wavelength-tunable single-frequency fiber laser employing acoustooptic tunable filter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(4): 1812-1823.
- [32] Horowitz M, Daisy R, Fischer B, *et al.* Linewidth-narrowing mechanism in lasers by nonlinear wave mixing[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(18): 1406-1408.
- [33] Zhang K, Kang J U. C-band wavelength-swept single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser[J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 14173-14179.
- [34] 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.
- [35] di Domenico G, Schilt S, Thomann P. Simple approach to the relation between laser frequency noise and laser line shape[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(25): 4801-4807.
- [36] The lowest noise laser on earth [EB/OL]. <http://www.orbitslightwave.com/assets/pdf/ETH-x-1xxx-x-x%20laser%20module.pdf>