基于F-P滤波器和饱和吸收体的单纵模掺铥激光器

白燕[1,2],延凤平[1,2],孙景辉[1,2],尹智[1,2]

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

摘要 提出一种基于法布里-珀罗滤波器和饱和吸收体的单纵模掺铥光纤激光器。利用窄带法布里-珀罗滤波器和未泵浦掺铥光纤的饱和吸收体来实现激光的单纵模输出。在室温条件下,实现中心波长1941.6 nm、信噪比32 dB的稳定激光输出。通过100 min的连续观测,激光器的中心波长偏移小于0.04 nm,激光输出功率抖动小于1.5 dB,证明单纵模掺铥光纤激光器可以在一段时间内稳定工作。

关键词 掺铥光纤激光器;法布里-珀罗滤波器;饱和吸收体;单纵模

2 μm波段激光处于低损耗大气光传输窗口附近(2~2.5 μm),在大气传输、激光雷达、非接触化学探测等方面有很大应用。利用掺铥光纤激光器设计的雷达系统可以探测地球或火星表面大气层的水蒸汽分布[1];Petzar等设计了一种波长2 μm的相干多普勒雷达用于风测,测试结果表明,这种雷达适用于大气边界层和自由对流层[2];Koch等利用2 μm波长相干多普勒雷达绘制了三维的风矢量地图[3];利用2 μm波段激光可以精确测量呼吸过程中碳同位素的比值[4];Pal等设计了一种稳定、波长可调谐、窄线宽全光纤型掺铥光纤激光器,用于二氧化碳气体的检测[5]。此外,水分子在2 μm波段附近有一个较强的吸收峰,高功率的2 μm激光可以使人体组织迅速凝固、迅速止血。相比于常用的二氧化碳激光刀,2 μm激光器具有较窄的线宽、较小的光束发散角及所使用波段对人眼安全等优点,因此在生命科学和激光医疗中有广泛的应用前景。Massaki等对2 μm激光祛斑效果进行了跟踪调查,验证了2 μm激光是安全、有效的治疗手段[6];Fried等用高功率的、波长1940 nm的掺铥光纤激光器进行泌尿组织消融[7];Somunyudan等利用波长1940 nm的掺铥光纤激光器进行腔内激光消融[8]。由此,2 μm波段激光在微创手术等方面有很大的应用前景。

近年来,已有很多对单纵模掺铥光纤激光器的研究报道。2004年,Agger等制作了腔长只有5 cm的分布式反馈单频掺铥光纤激光器,采用泵浦源为790 nm的钛宝石激光器,激光中心波长为1735 nm[9];2007年,Gapontsev等实现了输出功率20 W、输出激光波长1.93 μm的单频掺铥光纤激光器[10];2008年,Zhang等用792 nm泵浦源激励82 cm长的掺铥光纤,获得中心波长1936.4 nm的窄线宽激光[11];2011年,Zhang等研制了一种高功率单频分布式布拉格反射掺铥光纤激光器,采用的泵浦源为1.565 μm的铒镱共掺光纤激光器[12];2013年,He等研制出1.95 μm掺铥单频光纤激光器,最大输出功率为200 mW,激光信噪比高于68 dB[13]。

本研究组设计一种基于法布里-珀罗(F-P)滤波器和饱和吸收体的单纵模掺铥光纤激光器。利用F-P滤波器和均匀布拉格光栅构成激光器的2个腔镜,利用F-P滤波器的窄带滤波效果和未泵浦掺铥光纤的饱和吸收效果来实现激光的单纵模输出。

1 单纵模掺铥光纤激光器结构

图1为设计的基于F-P滤波器和饱和吸收体的单纵模掺铥光纤激光器实验结构图。泵浦源采用1550 nm单模半导体激光器。1550 nm泵浦激光通过光纤放大器进行放大,经由波分复用器(WDM)注入激光腔内。激光腔左侧的腔镜为均匀光纤布拉格光栅,右侧光纤环镜由环形器(OC)和F-P滤波器组成。激光腔内的增益介质为单模掺

收稿日期:2016-06-30;修回日期:2016-07-11
基金项目:国家自然科学基金项目(61275091,61327006)
作者简介:白燕,博士研究生,研究方向为特种光纤及光纤激光器,电子信箱:13111023@bjtu.edu.cn;延凤平(通信作者),教授,研究方向为光纤激光器,电子信箱:fpyan@bjtu.edu.cn
引用格式: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: doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.16.012

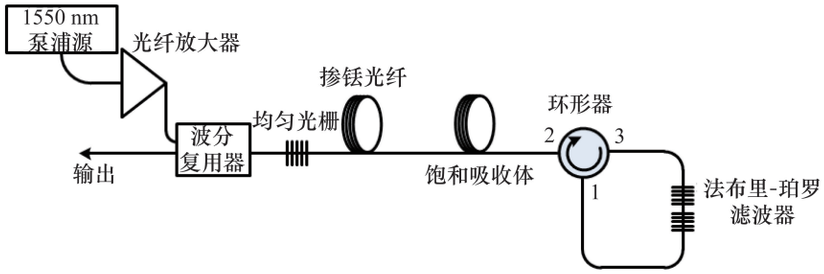

图1　基于F-P滤波器的单纵模掺铥光纤激光器实验结构

Fig. 1　Experimental setup of the single longitudinal mode thulium-doped fiber laser using F-P filter

铥光纤(Nufern公司生产),光纤长度1 m,纤芯直径9 μm,包层直径125 μm。为了保证激光的单纵模输出,在激光腔内加入20 cm自制的未泵浦掺铥光纤充当饱和吸收体,自制阶跃型掺铥光纤纤芯直径为8.6 μm。通过窄带F-P滤波器和饱和吸收体的共同作用,保证激光器输出单纵模激光,所产生的激光从波分复用器另一端输出。

图2为均匀布拉格光纤光栅的透射谱。实验用超连续谱光源(Koheras Co., SuperK)测量;光谱仪(AQ6375型,Yokogawa公司)测量精度为0.05 nm。实验中均匀布拉格光栅长度为2 cm,中心波长为1941.6 nm,透射谱深度为14 dB;均匀光纤光栅由KrF准分子激光器通过均匀相位掩模板扫描写入,KrF准分子激光器产生紫外光的中心波长为248 nm,均匀相位掩模板的周期为1347.3 nm。为了固化光栅的反射率和中心波长,在光栅制作完成后需要经过退火处理。

图3为F-P滤波器的透射谱。实验中用超连续谱光源通过光谱仪进行测量。F-P滤波器利用248 nm的紫外光、通过相位掩模法照射氢载光敏单模光纤制作而成,F-P滤波器包含一对完全相同的光栅。2个均匀光纤光栅在基本相同的条件下写入,即采用同一块均匀相位掩模板(周期为1347.3 nm),在制造2个光栅时严格控制KrF准分子激光器的脉冲能量及扫描速度,保证2个光栅具有相同的性能。通过合理设计,保证F-P滤波器的中心波长与均匀布拉格光栅一致,即1941.6 nm。

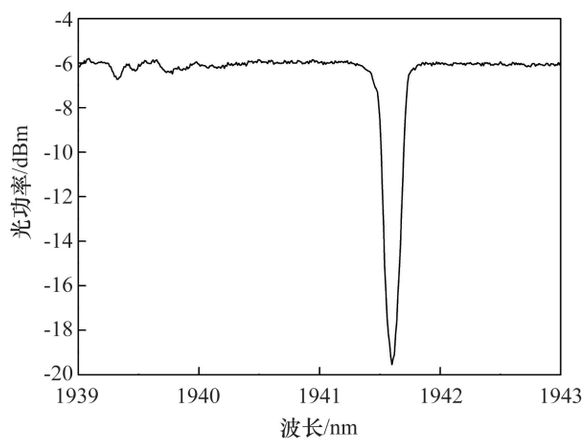

图2　均匀布拉格光栅的透射谱

Fig. 2　Transmission spectrum of the fiber Bragg grating

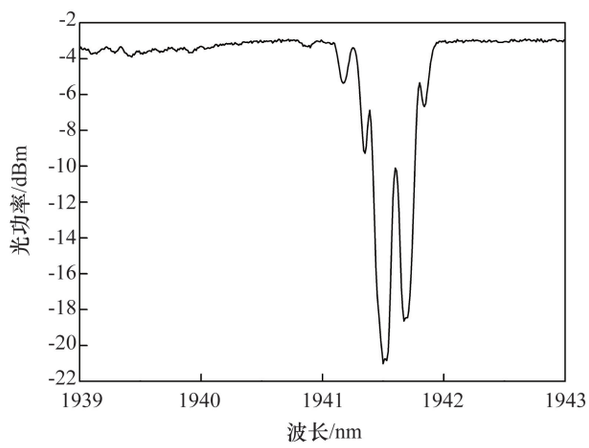

图3　F-P滤波器的透射谱

Fig. 3　Transmission spectrum of the F-P filter

2　结果及讨论

图4为基于F-P滤波器和饱和吸收体的单纵模掺铥光纤激光器的输出激光光谱图。通过放大器后,1550 nm泵浦激光功率为103 mW,采用分辨率为0.05 nm的光谱仪对输出激光特性进行测量。从图4可以看出,激光输出的中心波长为1941.6 nm,与F-P滤波器和均匀布拉格光纤光栅的中心波长相对应;激光输出的信噪比为32 dB。

为了验证基于F-P滤波器和饱和吸收体的单纵模掺铥光纤激光器的稳定状态,保持对激光光谱进行时间间隔10 min、总时长为100 min的连续扫描,得到扫描光谱如图5所示。由图5可以看出,连续测量过程中,激光的中心波长和峰值功率没有出现很明显的抖动。这说明在室温条件下,基于F-P滤波器和饱和吸收体的单纵模掺铥光纤激光器具有良好的稳定性。

为了进一步验证基于F-P滤波器和饱和吸收体的单纵模掺铥光纤激光器的稳定状态,图6给出100 min扫描时间内激光输出功率和中心波长的抖动情况。从图6可看出,激光器的中心波长偏移小于0.04 nm,激光输出功率抖动小于1.5 dB,这进一步说明所设计

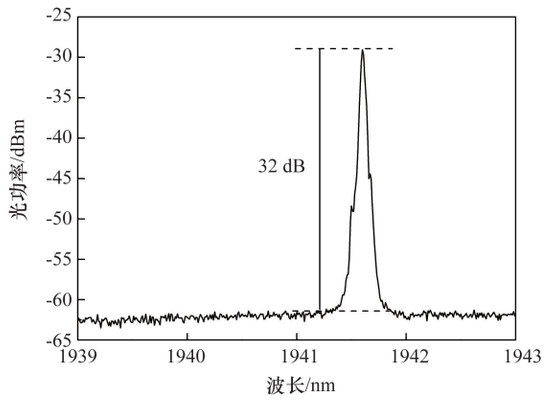

图4　激光器输出激光的光谱

Fig. 4　Spectrum of lasing operation

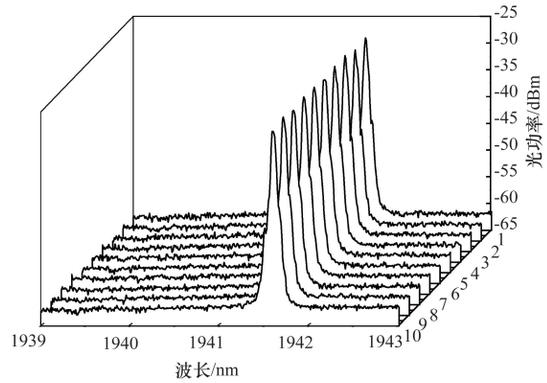

图5　激光器稳定输出激光的光谱,间隔10 min扫描10次

Fig. 5　Spectrum of lasing output with 10 repeated scans at 10 min intervals

的激光器输出稳定性很好。

为确保所提出的掺铥光纤激光器处于稳定的单纵模工作状态,采用自零差法对输出激光进行测量验证,即通过光电探测器将输出激光信号转化为电信号,用电谱仪扫描电信号的频谱分量。如果激光存在多个纵模,则两两纵模之间产生拍频信号,在频谱上就可以观测到非零的频率峰。光场在所设计的掺铥激光器腔内运转1周所经过的长度约5.52 m,对应纵模间隔1.2 MHz。为了分析未泵浦掺铥光纤对于激光器单模输出的影响,对激光腔内是否引入未泵浦掺铥光纤2种情况分别进行扫描,扫描范围为12 MHz,大于激光器的纵模间隔,结果如图7所示。移除激光腔内的饱和吸收体,在12 MHz的扫描范围内可以看到很明显的纵模间拍频产生的频率峰。由此可以知道,此时激光器处于多纵模运转状态。这是因为单独依靠窄带F-P滤波器无法完全抑制激光器的多纵模振荡,仅能保证激光器处于少纵模的运转状态,而在激光腔内加入未泵浦的掺铥光纤充当饱和吸收体之后,由于饱和吸收体和激光腔的腔镜共同作用,激光在其中形成驻波。饱和吸收体对激光中心频率外的光具有较强的抑制作用,实现激光器的单纵模运转,因此图7(b)显示的频谱十分纯净,没有任何明显的频率峰。

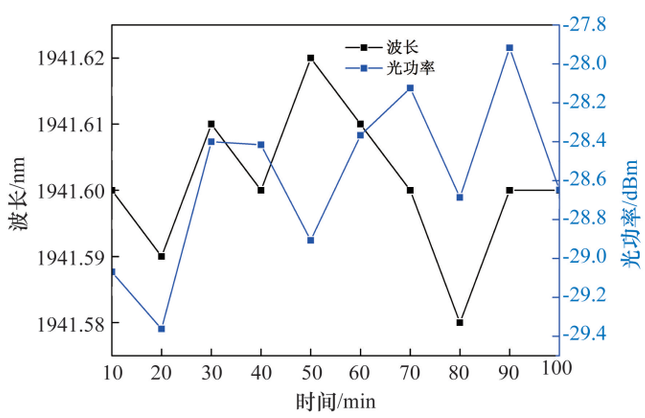

图6　激光输出功率和中心波长的抖动

Fig. 6　Fluctuations of the output power and the center wavelength

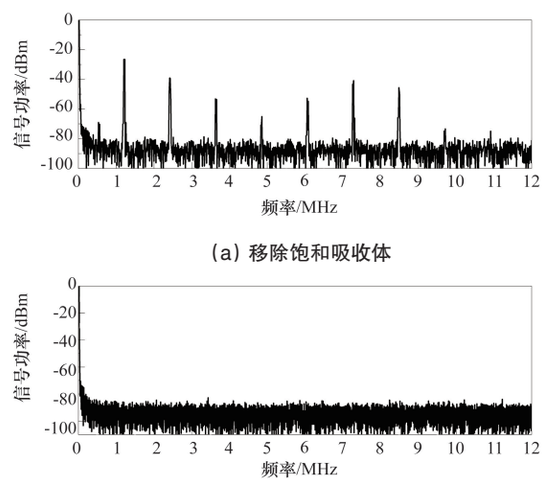

图7　激光器多纵模和单纵模工作电谱图

Fig. 7　Electrical spectrum at multiple longitudinal mode and single longitudinal mode operation

3 结论

提出了一种基于F-P滤波器和饱和吸收体的单纵模掺铥光纤激光器。利用F-P滤波器和均匀布拉格光栅构成激光器的2个腔镜。利用F-P滤波器的窄带滤波效果和未泵浦掺铥光纤的饱和吸收效果来实现激光的单纵模输出。在室温条件下,实现中心波长1941.6 nm、信噪比32 dB的稳定激光输出。通过100 min的连续观测,激光器的中心波长偏移小于0.04 nm,激光输出功率抖动小于1.5 dB。通过自零差法,验证了激光器处于单纵模运转状态。

参考文献(References)

[1] Young R J, Barnes N P. Profiling atmospheric water vapor using a fiber laser lidar system[J]. Applied Optics, 2010, 49(4): 562-567.

[2] Koch G J, Beyon J Y, Petzar P, et al. Field testing of a high-energy 2 μm Doppler lidar[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2010, 4(1): 043512-043512-13.

[3] Koch G J, Beyon J Y, Cowen L J, et al. Three-dimensional wind profiling of offshore wind energy areas with airborne Doppler lidar[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1): 083662-083662.

[4] Andreev S N, Mironchuk E S, Nikolaev I V, et al. High precision measurements of the $^{13}CO_2/^{12}CO_2$ isotope ratio at atmospheric pressure in human breath using a 2 μm diode laser[J]. Applied Physics B, 2011, 104(1): 73-79.

[5] Pal A, Sen R, Bremer K, et al. "All-fiber" tunable laser in the 2 μm region, designed for CO_2 detection[J]. Applied Optics, 2012, 51(29): 7011-7015.

[6] Massaki N, Eimpunth S, Fabi S G, et al. Treatment of melasma with the 1 927 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.

[7] Fried N M, Murray K E. High-power thulium fiber laser ablation of urinary tissues at 1.94 μm[J]. Journal of Endourology, 2005, 19(1): 25-31.

[8] Somunyudan M F, Topaloglu N, Ergenoglu M Ü, et al. Endovenous laser ablation (EVLA) with Tm-fiber laser[C]//Biomedical Engineering Meeting (BIYOMUT), 2010 15th National. Antalya, Turkey: IEEE, 2010: 1-3.

[9] Agger S, Povlsen J H, Varming P. Single-frequency thulium-doped distributed-feedback fiber Laser[J]. Optics letters, 2004, 29(13): 1503-1505.

[10] Gapontsev D, Platonov N, Meleshkevich M, et al. 20W single-frequency fiber laser operating at 1.93 μm[C]//Lasers and Electro-Optics, 2007. Washington, USA: Optical Society of America, 2007: 1-2.

[11] Zhang Y J, Yao B Q, Ju Y L, et al. LD-cladding-pumped 50 pm linewidth Tm^{3+}-doped silica fiber laser[J]. Optics Express, 2008, 16(11): 7715-7719.

[12] Zhang Z, Boyland A J, Sahu J K, et al. High-power single-frequency thulium-doped fiber DBR laser at 1943 nm[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2011, 23(7): 417-419.

[13] He X, Xu S, 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.

Single-longitudinal-mode thulium-doped fiber laser using Fabry-Perot filter and saturable absorber

BAI Yan[1,2], YAN Fengping[1,2], SUN Jinghui[1,2], YIN Zhi[1,2]

1. Key Lab of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing 100044, China

2. Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract A single-longitudinal-mode thulium-doped fiber laser using Fabry-Perot (F-P) filter and saturable absorber is proposed and experimentally demonstrated at the 2 μm band. In the structure, the combination of a narrowband F-P filter and a section of unpumped thulium-doped fiber ensures the single-longitudinal-mode lasing operation. A stable lasing operation is obtained at room temperature, with the central wavelength of 1941.6 nm and the optical signal-to-noise ratio of 32 dB. For an experimental period of 100 min, the output power fluctuates less than 1.5 dB and the center wavelength shifts less than 0.04 nm, indicating that the single-longitudinal-mode thulium-doped fiber laser possesses good long-term stability.

Keywords thulium-doped fiber laser; Fabry-Perot filter; saturable absorber; single longitudinal mode

(编辑 王志敏)