

文章编号: 1001-4322(2006)12-1987-04

# 光纤光栅 F-P 标准具选模单频环形腔光纤激光器\*

伍 波, 刘永智, 刘 爽, 代志勇

(电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

摘 要: 讨论了光纤光栅法布里-珀罗(F-P)标准具选模光纤激光器的单频运转原理,并研制了全光纤结构单频掺 Er<sup>3+</sup> 光纤环形激光器。实验中采用两个 976 nm 激光二极管双向泵浦作为泵浦源,高掺杂浓度掺 Er<sup>3+</sup> 光纤作为增益介质,以行波腔消除空间烧孔效应,利用光纤光栅 F-P 标准具窄带选模特性,当泵浦光功率为 36 mW 时,得到了稳定的单频激光输出。实验中使用了长 5 和 3 m 的掺杂光纤,在泵浦光功率为 145 mW 时输出功率分别为 19 和 42 mW,光-光转换效率分别为 13 %和 29 %,斜率效率分别达到了 16 %和 33 %。输出谱线 3 dB 带宽 0.01 nm,无跳模现象。

关键词: 激光技术; 光纤激光器; 环形腔; 布里-珀罗标准具; 光纤光栅

中图分类号: TN248 文献标识码: A

光纤激光器以其卓越的性价比,以及抗电磁干扰能力强、转换效率高、线宽窄、输出光束质量好、可靠性高等优点,在光纤通信、激光加工、激光医疗、激光雷达、结构测距、光纤传感等方面得到日益广泛的应用。在光纤激光器中,光纤光栅通常用来作为反射腔镜,产生窄带光谱输出<sup>[1-2]</sup>,它可以使激光器紧凑、简单。与光纤法布里-珀罗标准具相比,光纤光栅标准具有更好的窄带选模特性,可用对光纤激光器选纵模。文献[3-4]理论分析了光纤光栅标准具的透射特性及纵模特性,在掺铒环形腔光纤激光器腔内引入光纤光栅标准具作为选频器件,得到 3.16 mW 单频激光输出<sup>[5]</sup>。采用掺铒镜双层光纤作为增益介质,在光环形器上以光纤光栅标准具选频的光纤激光器得到了 1 W 的单频高功率激光输出<sup>[6]</sup>。这两种激光器的共同缺点是结构复杂,能量转换效率低,文献[5]得到的效率为 3 %,文献[6]使用了 19 W 泵浦功率,效率为 5.3 %。国内也研究了在增益光纤上相隔极近距离写入两个光纤光栅,从而构成超短腔光纤激光器实现单纵模输出<sup>[7-8]</sup>,但是由于增益区太短,同样导致了输出功率小、效率低的问题。

为了得到高效率的单频光纤激光器,本文分析了光纤光栅标准具选模光纤激光器单频运转原理,并采用环形波腔结构,将光纤光栅标准具作为外腔选模器件,进行了相应的实验研究,得到了稳定的单频激光输出。

## 1 激光器单频运转原理

光纤光栅的反射、透射特性可用耦合模理论描述。设后向传播和前向传播的光波电场分别表示为

$$a(z) = A(z)\exp(iz) \tag{1}$$

$$b(z) = B(z)\exp(-iz) \tag{2}$$

式中:  $A(z)$ ,  $B(z)$  分别为后向和前向传播光波电场的振幅;  $k = 2\pi/\lambda$  为传播常数。光纤光栅反射系数  $r_g = |r_g| \exp(i\phi)$ , 透射系数  $t_g = |t_g| \exp(i\phi)$ , 其中

$$|r_g| = \frac{k \sinh(SL)}{[k^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh^2(SL)]^{1/2}} \tag{3}$$

$$\phi = \arctan \frac{S \cosh(SL)}{\sinh(SL)} \tag{4}$$

$$|t_g| = \frac{S}{[k^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh^2(SL)]^{1/2}} \tag{5}$$

$$\phi = -\frac{\pi}{2} - \phi_0 L + \arctan \frac{S \cosh(SL)}{\sinh(SL)} \tag{6}$$

式中:  $L$  为光栅长度; 耦合系数  $k = 2\pi n_m/\lambda$ , 折射率调制强度  $n_m = 10^{-4} \sim 10^{-5}$ ;  $\phi_0 = \pi - \phi_0 = 2\pi/\lambda - 2\pi/\lambda_B$ ,

\* 收稿日期: 2006-06-15; 修订日期: 2006-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(60377021)

作者简介: 伍 波(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器与放大器及光纤传感方面的研究工作; w\_bo @sohu.com。

$\lambda_B$  为布拉格波长;  $S = (k^2 - \beta^2)^{1/2}$ ; 光纤光栅的光强反射率和透射率分别为  $R_g = |r_g|^2$  和  $T_g = |t_g|^2$ ;  $r_g$  和  $\phi_r$  分别为反射系数的幅度和相位;  $t_g$  和  $\phi_t$  分别为透射系数的幅度和相位。

同一根光纤上的两个布拉格波长相同的光栅便构成光纤光栅法布里-珀罗标准具,如图 1 所示,图中光栅长度分别表示为  $L_1, L_2$ ,腔长为  $h$ 。可得光纤光栅标准具光强透射率和反射率为<sup>[3-4]</sup>

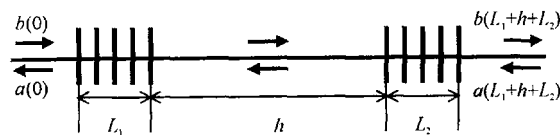


Fig. 1 Schematic of FBG F-P etalon  
图 1 光纤光栅法布里-珀罗标准具结构图

$$T_{F-P} = \frac{1}{1 + F \sin^2(\beta h - \phi_r)} \tag{7}$$

$$R_{F-P} = \frac{F \sin^2(\beta h - \phi_r)}{1 + F \sin^2(\beta h - \phi_r)} \tag{8}$$

式中:  $F = 4R_g / (1 - R_g)^2$ 。

根据(7)式进行相应的数值计算,得到腔长分别为 20 和 2 mm 的光纤光栅标准具的透射谱曲线如图 2 所示,其中光栅长度  $L = 10$  mm,布拉格波长  $\lambda_B = 1535$  nm,折射率调制  $n_m = 2 \times 10^{-5}$ ,光栅峰值反射率 50%,3 dB 反射带宽 0.1 nm。从图 2 可见,光纤光栅标准具腔长  $h = 20$  mm 时有 4 条输出谱线,而随着标准具腔长的减短,输出谱线的数目越来越少,当标准具腔长  $h = 2$  mm 时,只有一条输出谱线,标准具实现了单模运转,同时透射谱线带宽增大。光纤光栅法布里-珀罗标准具理论分析表明<sup>[3-4]</sup>,光纤光栅只为其反射带宽以内的光波提供反馈,光纤光栅标准具的输出谱线数目由标准具的腔长和光纤光栅的反射带宽决定,当光纤光栅标准具的腔长越短,其输出谱线间距越大,光纤光栅的反射带宽越窄,标准具所能容纳的模式数目越少。

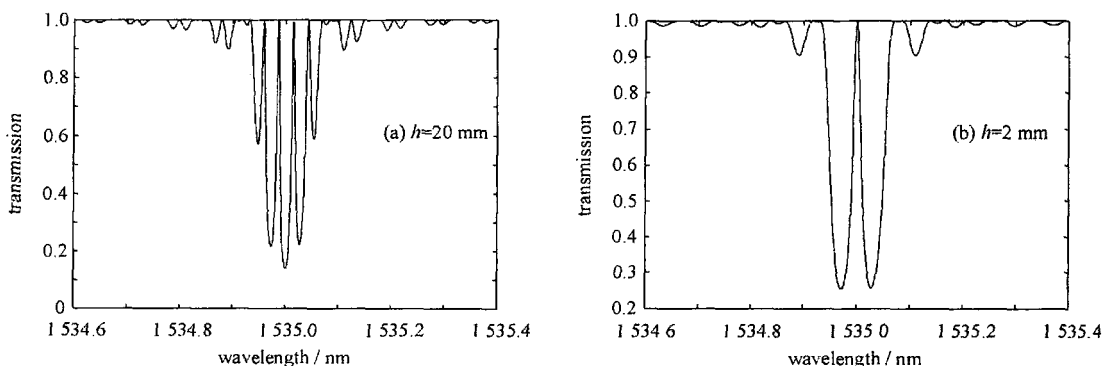


Fig. 2 Transmission spectra of FBG F-P etalons  
图 2 光纤光栅标准具透射谱

由于作为增益介质的掺杂光纤长度通常为数 m,腔模间隔小,而光纤光栅的 3dB 反射带宽为 0.1 nm 左右,得到的激光输出一般为多纵模,要想得到单纵模输出,需要采用相应的选模方法。法布里-珀罗标准具法是激光器中常用的选纵模方法,光纤光栅标准具利于实现激光器的全光纤化,且光纤光栅标准具的输出谱线数目由标准具的腔长和光纤光栅的反射带宽共同决定,选模特性优于普通法布里-珀罗标准具。由于掺  $Er^{3+}$  光纤荧光谱线很宽,在使用一个光纤光栅标准具选模时难以保证单纵模振荡,此时可以考虑使用行波腔结构以消除空间烧孔效应的影响,使被选择的少数几个纵模通过模式竞争实现单纵模振荡。行波腔中光纤光栅标准具选模原理如图 3 所示。如果输出激光线宽小于光纤光栅标准具的纵模间隔,而且在较长的观察时间内没有出现跳模现象,那么激光器就是单纵模运转的。

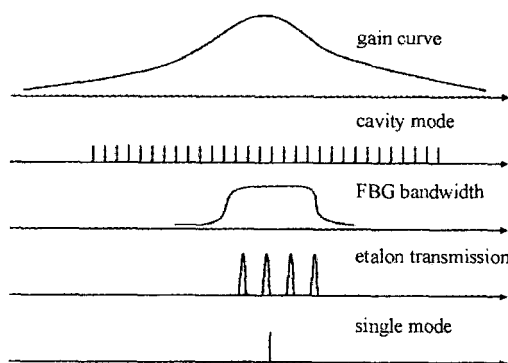


Fig. 3 Principle of FBG F-P etalon selecting longitudinal modes of cavity is 2 mm  
图 3 光纤光栅标准具选模原理示意图

## 2 实验结果

光纤激光器结构如图 4 所示,由泵浦激光二极管(LD)、高掺杂  $Er^{3+}$  光纤、980/1550 nm 波分复用器

(WDM)、光纤隔离器、2 ×2 耦合器和光纤光栅法布里-珀罗标准具组成。其中增益介质为高掺 Er<sup>3+</sup> 光纤,长 5 m,该光纤在 978 nm 波长处峰值吸收系数为 17 dB/m,在 1 530 nm 波长的峰值吸收系数为 30 dB/m;实验采用双向泵浦方式,泵浦光源为中心波长 976 nm 的单模输出激光二极管(LD),LD<sub>1</sub> 与 LD<sub>2</sub> 的最大泵浦功率分别为 76 和 69 mW;耦合器分束比为 1 : 1;光纤光栅标准具刻蚀在普通单模光纤上,布拉格中心波长 1 535 nm,光栅之间的距离为 20 mm,光栅反射率均为 50%,标准具的反射率为 80%。实验得到的光纤光栅标准具透射谱如图 5 所示,由图可知,光纤光栅标准具的带宽约为 0.17 nm,各透射谱线的纵模的间隔大于 0.03 nm。

在激光器中,振荡光束经环形腔放大后,部分能量从端口 2 经耦合器从端口 4 形成激光输出,其余部分进入端口 3,然后进入光纤光栅 F-P 标准具结构中,经过标准具选频后,振荡光束反射回端口 1,进入环形腔。隔离器保证振荡光束处于行波状态,不会形成驻波,引起空间烧孔。

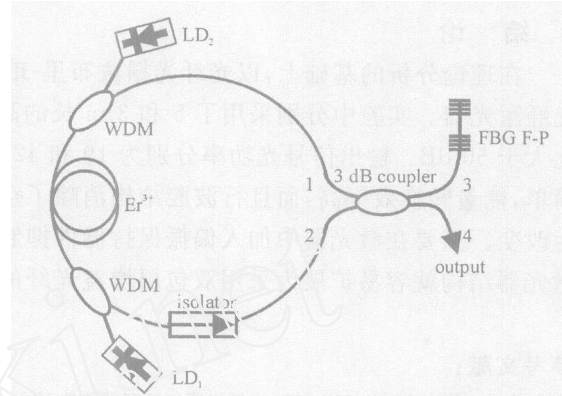


Fig. 4 Experimental setup of fiber ring laser

图 4 环形腔光纤激光器实验原理图

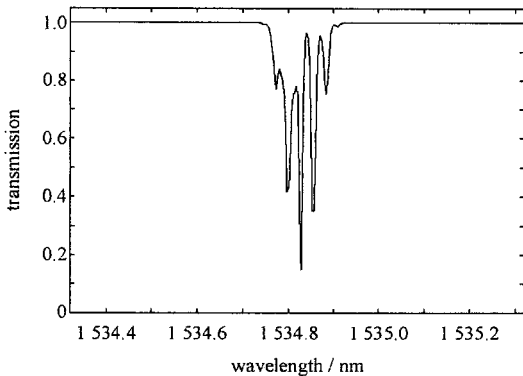


Fig. 5 Transmission spectrum of FBG F-P etalon

图 5 光纤光栅标准具透射谱

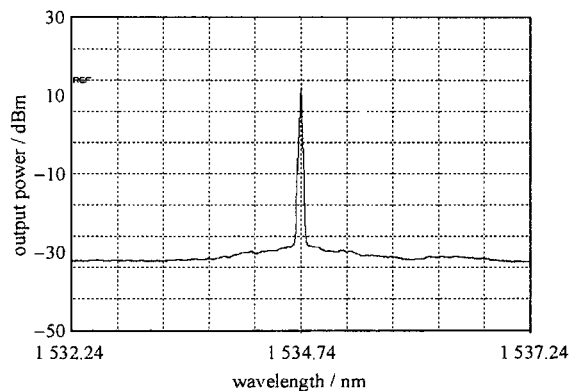


Fig. 6 Output spectrum of fiber laser

图 6 光纤激光器输出光谱图

实验采用 Ando6319 光谱分析仪进行实验记录,光谱仪最高精度为 0.01 nm。当泵浦光功率为 25 mW 时,激光器开始起振,此时可以观察到几个纵模的竞争。随着泵浦功率的增加,其中一个纵模得到加强,激光谱线趋于稳定。当泵浦功率为 36 mW 时,开始得到稳定的光谱线,且谱线的 3 dB 线宽不受泵浦光功率增加的影响。图 6 为输出光谱图,扫描范围为 5 nm,精度为 0.01 nm。光谱仪分析得输出激光中心波长为 1 534.74 nm,3 dB 线宽为 0.01 nm(光谱仪最高精度),信噪比大于 50 dB。在 2 h 的连续观察时间内,波长漂移范围小于 0.01 nm。由于激光器输出激光 3 dB 线宽为 0.01 nm,小于光纤光栅标准具透射谱线的纵模间隔(0.03 nm),且长时间无跳模现象,所以我们认为此激光器输出为单纵模。

当泵浦光功率为 145 mW 时,输出信号光功率为 19 mW,光-光转换效率为 13%,斜率效率为 16%,此时激光器输出功率未达到饱和,因此泵浦光已经被充分吸收,且试验中采用的增益光纤过长,激光器的性能没有达到最佳。如果减小增益光纤的长度,可以降低激光器泵浦阈值光功率,同时提高输出信号光功率。我们将高掺 Er<sup>3+</sup> 光纤截短至 3 m,进行了试验研究。此时,激光器的泵浦阈值光功率下降为 18 mW,当泵浦光功率为 145 mW 时,输出信号光功率为 42 mW,光-光转换效率为 29%,斜率效率为 33%。输出激光中心波长仍为 1 534.74 nm,3 dB 线宽为 0.01 nm,信噪比大于 50 dB,激光器同样无跳模现象发生,波长漂移范围小于 0.01 nm。图 7 为增益光纤长度分别为 5 和 3 m 时激光器输出功率随总泵浦功率变化的曲线。

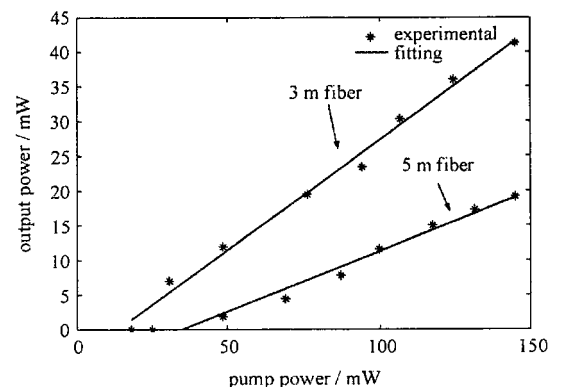


Fig. 7 Output power vs pump power

图 7 输出功率随泵浦功率的变化

### 3 结 论

在理论分析的基础上,以光纤光栅法布里-珀罗标准具为外腔选纵模器件,构造了高效的环形行波腔单频光纤激光器。实验中分别采用了 5 和 3 m 长的高掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤,得到了稳定的单频激光,无跳模现象发生,信噪比大于 50 dB。输出信号光功率分别为 19 和 42 mW,斜率效率分别为 16%和 33%。本文的光纤激光器结构简单,能量转换效率高,而且行波腔结构消除了空间烧孔效应的影响,随着泵浦功率的增加,输出特性也不会发生改变。只要在激光器中加入偏振保持器件抑制由于高功率激光偏振模耦合引起的功率波动<sup>[9]</sup>,我们的光纤激光器结构就容易扩展为采用双包层增益光纤的高效率、高功率单频光纤激光器。

#### 参考文献:

- [1] 宁鼎,黄榜才,李朝辉,等. 光纤光栅选频环形腔掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器[J]. 光学学报, 2004, **24**(2):190-194. (Ning D, Huang B C, Li Z H, et al. Ring cavity  $\text{Yb}^{3+}$  doped fiber laser with frequency selecting by fiber Bragg grating. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 190-194)
- [2] 陈香梅,江毅,刘莉. 可调谐环形腔掺铒光纤激光器[J]. 光学技术, 2006, **32**(1): 17-19. (Chen X M, Jiang Y, Liu L. Tunable erbium-doped ring fiber laser. *Optical Technique*, 2006, **32**(1): 17-19)
- [3] 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. (Guan B O, Yu Y L, Ge C F, et al. Theoretical studies on transmission characteristics of fiber grating Fabry-Perot cavity. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1):34-38)
- [4] 吕昌贵,崔一平,王著元,等. 光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔纵模特性研究[J]. 物理学报, 2004, **53**(1):145-150. (L ü C G, Cui Y P, Wang Z Y, et al. A study on the longitudinal mode behavior of Fabry-Perot cavity composed of fiber Bragg grating. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(1):145-150)
- [5] L ü C G, Wang Z Y, Yun B F, et al. Stable single frequency Er-doped all-fiber ring laser with fiber Bragg grating Fabry-Perot filter[J]. *Chin Opt Lett*, 2005, **3**(4):212-214.
- [6] Polynkin A, Polynkin P, Mansuripur M, et al. Single-frequency fiber ring laser with 1 W output power at 1.5  $\mu\text{m}$ . *Opt Express*, 2005, **13**(8):3179-3184.
- [7] 薛亦元,安宏林,傅立斌,等. 单频窄线宽分布布拉格反射光纤激光器研究[J]. 光学学报, 2000, **20**(9):1251-1254. (Xue Y Y, An H L, Fu L B, et al. Narrow-linewidth single-mode DBR fiber lasers. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9):1251-254)
- [8] 王天枢,郭玉彬,李军,等. 全光纤型 Er/ Yb 共掺光纤短腔激光器[J]. 中国激光, 2004, **31**(10): 1161-1164. (Wang T S, Guo Y B, Li J, et al. All fiber type short cavity Er/ Yb co-doped fiber laser. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**(10): 1161-1164)
- [9] Takushima Y, Yamashita S, Kikuchi K, et al. Polarization-stable and single-frequency fiber lasers[J]. *J Lightwave Technol*, 1998, **16**(4): 661-669.

## Single frequency fiber ring laser with mode selection by FBG F-P etalon

WU Bo, LIU Yong-zhi, LIU Shuang, DAI Zhi-yong

(School of Opt-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054 China)

**Abstract:** The principle of single frequency operation of the fiber laser with mode selected with fiber Bragg grating Fabry-Perot etalon is presented. The all-fiber single frequency  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber ring laser has been designed in which two 976 nm laser diodes are used as the pump sources, the high concentration  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber as the gain medium, the travelling cavity is adopted to eliminate the spatial hole burning effect. The designed etalon can discriminate and select laser longitudinal modes efficiently and a stable single-frequency laser is obtained. The experiment using 5 m and 3 m long  $\text{Er}^{3+}$ -doped fibers respectively is presented. When the maximum pump power is 145 mW, the output powers are 19 mW and 42 mW respectively and the optical-optical conversion efficiency are 13% and 29%, the slope efficiency are 16% and 33%, the 3 dB bandwidths of the laser are 0.01 nm, and no mode hoppings are observed. The fiber laser has the advantages of simple structure, high efficiency and high reliability and it can be used to build single-frequency, high-efficiency and high-power fiber laser.

**Key words:** Laser technology; Fiber laser; Ring cavity; F-P etalon; Fiber Bragg grating