

基于 π 相移光纤布拉格光栅的窄线宽掺铒光纤激光器孙俊杰¹, 王泽锋^{1,2,3*}, 王蒙¹, 曹润秋^{1,2,3}, 陈金宝^{1,2,3}¹国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073;²大功率光纤激光湖南省协同创新中心, 湖南长沙 410073;³高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073

摘要 窄线宽掺铒光纤激光器具有线宽窄、噪声低等优点,在光纤通信、光纤传感、相干探测和合成等方面有广泛的应用。利用自行设计并制作的 π 相移光纤光栅和高反射率光纤布拉格光栅(FBG),搭建了环形腔掺铒光纤激光器,利用 π 相移光纤光栅的窄带滤波特性实现了 1.5 μm 波段的窄线宽掺铒光纤激光输出。当 980 nm 半导体激光抽运功率为 5 W 时,激光输出功率为 1.006 W,光-光转换效率大于 20%,中心波长为 1549.45 nm,激光线宽为 5.32 pm。输出光没有残余抽运光,表明继续增加抽运光功率可以进一步提升激光功率。通过优化设计 π 相移光纤光栅的透射峰带宽、FBG 的反射谱和激光腔结构,有望实现高效、高功率的单纵模激光输出。

关键词 激光器; π 相移光纤光栅; 光纤布拉格光栅; 窄线宽; 掺铒光纤激光器; 环形腔

中图分类号 TN24 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.081406

Narrow Linewidth Erbium-Doped Fiber Laser with a π Phase-Shifted Fiber Bragg GratingSun Junjie¹, Wang Zefeng^{1,2,3}, Wang Meng¹, Cao Jianqiu^{1,2,3}, Chen Jinbao^{1,2,3}¹College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;²Hunan Provincial Collaborative Innovation Center of High Power Fiber Laser, Changsha, Hunan 410073, China;³Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Erbium-doped fiber lasers have wide applications in fiber communication, fiber sensors, coherent detection and combination because of its narrow linewidth and low noise. An erbium-doped fiber laser with ring cavity is constructed by a self-designed π phase-shifted fiber grating and a high-reflective fiber Bragg grating (FBG), which can achieve narrow linewidth erbium-doped fiber laser output in 1.5 μm -band by utilizing the π phase-shifted fiber grating as a narrowband filter. When the pump power of 980 nm diode laser is 5 W, the laser output power is 1.006 W, the optical to optical efficiency is more than 20%, and the central wavelength is 1549.45 nm with laser linewidth of 5.32 pm. The output light is without residual pump, which indicates that the laser power can be further increased by increasing pump power. High-efficiency, high power, single-longitudinal-mode laser can be achieved by optimizing the bandwidth of transmission peak of π phase-shifted fiber grating, the reflectance spectrum of FBG, and the structure of the laser cavity.

Key words lasers; π phase-shifted grating; fiber Bragg grating; narrow linewidth; erbium-doped fiber laser; ring cavity

OCIS codes 140.3510; 140.3500; 140.3560; 050.5080; 060.3735

收稿日期: 2017-04-07; 收到修改稿日期: 2017-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(11274385)

作者简介: 孙俊杰(1994—),女,硕士研究生,主要从事光纤器件应用方面的研究。E-mail: 15143115236@163.com

导师简介: 陈金宝(1970—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事高能激光技术方面的研究。

E-mail: kdchenjinbao@aliyun.com

* 通信联系人。zefengwang_nudt@163.com

1 引言

作为光纤激光器一个重要的发展方向,窄线宽光纤激光器因具有线宽窄、噪声低等优点而成为热门研究课题,被广泛应用于光纤通信、光纤传感、相干探测和合成、微波光子学及功率光谱合成等领域^[1-5]。窄线宽光纤激光器主要分为线形腔和环形腔两种结构。其中,线形腔包括分布布拉格反射(DBR)光纤光栅激光器和分布反馈布拉格(DFB)光纤光栅激光器^[6],通常腔长较短,结构简单,但是输出功率有限,且由于驻波的存在会产生空间烧孔效应,不利于窄线宽激光输出。环形腔结构激光单向传输可以有效抑制空间烧孔效应,包括环形谐振腔、Sagnac 环形镜、环形器、复合腔等结构,通常腔长较长,有利于激光振荡,但是存在随机跳模现象,需要加入偏振控制器、滤波器等模式选择器件来压窄线宽。 π 相移光纤光栅存在一个透射窗口,具有高质量的波长选择特性,插入损耗低且与偏振态无关^[7-9]。 π 相移光纤光栅被用作窄带光纤激光器的滤波器时,系统全光纤化,有利于集成,且受环境影响小,与环形腔结构相结合,既能克服线形腔结构存在空间烧孔效应和功率受腔长限制的缺陷,又能通过精确控制 π 相移光纤光栅透射窗口的带宽实现有效选模,克服一般环形腔结构腔长过长、不利于线宽窄化的不足,进而获得窄线宽激光输出。1995年,Guy等^[10]利用相移光纤光栅作为窄带滤波器实现了1.55 μm 波段的窄线宽环形激光器,获得线宽小于2 kHz、功率约0.25 mW的单频激光输出。2005年,Chen等^[11]利用等效 π 相移光栅与环形腔结构相结合获得稳定的单纵模激光输出。2013年,Zhao等^[12]将 π 相移光纤光栅作为波长选择器件插入到光栅谐振腔中,获得线宽为900 Hz的单纵模激光输出。

本文利用自行设计和制作的 π 相移光纤光栅,与波长、带宽和其相匹配的高反射率光纤布拉格光栅(FBG)相结合,实现了全光纤结构的1.5 μm 波段的窄线宽环形腔掺铒光纤激光器的成功运转,获得了瓦级激光输出。耦合输出比为90%时,获得最高光-光效率20.12%,输出功率为1.006 W,此时激光线宽为5.32 pm,中心波长为1549.45 nm。所研究工作为下一步实现各种波段的高效率、高功率的单纵模激光器打下了良好基础。

2 π 相移光纤光栅的工作原理

π 相移光纤光栅是指纤芯的折射率在轴向的某点处存在大小为 π 的相位突变,示意图如图1所示。

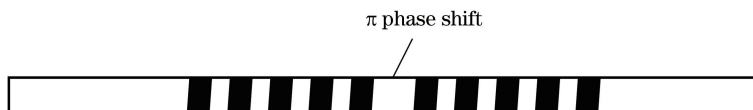


图1 π 相移光纤光栅示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a π phase-shifted fiber grating

目前较为常用的分析相移光纤光栅的反射特性和透射特性的方法主要有耦合模法^[13]、传输矩阵法^[14]和多层膜法^[15]。其中,传输矩阵法具有直观、简单、准确性高等特点,因此常以此来获得相移光栅的传输矩阵,进而对其特性进行分析。对于均匀FBG来说,可以将其看作一个四端口器件,根据耦合模理论和边界条件,反射系数 r ^[16]为:

$$r = \frac{E^-(0)}{E^+(0)} = \frac{-k \sinh(\alpha l)}{\sigma \sinh(\alpha l) + i\alpha \cosh(\alpha l)}, \quad (1)$$

式中 E^- 和 E^+ 分别为后向和前向传输光波的场强, k 为光栅耦合系数, $\alpha^2 = k^2 - \sigma^2$, σ 为距离布拉格波长的偏移量, l 为光栅长度。对于 π 相移光纤光栅而言,应用传输矩阵理论,可以将其视为由两个长度分别为 l_1 、 l_2 的均匀FBG g_1 、 g_2 级联而成,两光栅之间存在一个大小为 π 的相位突变 p ,则 π 相移光纤光栅的矩阵方程可以表示为:

$$\begin{bmatrix} E^+(0) \\ E^-(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E^+(L) \\ E^-(L) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = [g_1] \cdot [p] \cdot [g_2], \quad (3)$$

L 为 π 相移光纤光栅总长度,假设两级联子光栅 g_1 、 g_2 各参数相同,且 $l_1=l_2=l$,即相位突变 π 位于均匀 FBG 的中心位置,可以得到光强的反射率为:

$$R = |r^2| = \frac{4k^2\sigma^2 \sinh^4(al)}{(\sigma^2 - k^2)^2 + 4k^2\sigma^2 \sinh^4(al)} \quad (4)$$

由(4)式可得 π 相移光纤光栅的透射峰的线宽表达式为:

$$\sigma_h = [\sqrt{\sinh^4(kl) + 1} - \sinh^2(kl)] = k/2 \sinh^2(kl) \quad (5)$$

由此可见,当光栅长度 l 给定时, π 相移光纤光栅的透射峰线宽与耦合系数成正比,与 $\exp(2kl)$ 成反比。实际情况是透射峰的线宽随耦合系数 k 的增大而减小,当耦合系数 k 给定时,随光栅长度 l 的增加而减小。在 π 相移光纤光栅的设计与制作过程中,精确控制光栅参数即可获得目标透射峰线宽,在实际应用中具有重要意义,作为窄带滤波器应用在光纤激光器系统中即可获得窄线宽激光输出。

3 实验及结果

3.1 实验装置

基于 π 相移光纤光栅的窄线宽掺铒光纤激光器的实验装置如图 2 所示。其中,掺铒光纤放大器(EDFA)由中心波长为 980 nm 的激光二极管抽运;光纤耦合器中心波长为 1550 nm,耦合器 1 的分光比为 10:90,插入损耗分别为 9.85 dB 和 0.56 dB;耦合器 2 的分光比为 1:99,插入损耗分别为 20.80 dB 和 0.06 dB,分别连接光功率计(PM)和光谱仪(OSA),以便同时监测激光功率和激光光谱;光纤环形器中心波长为 1550 nm,激光从端口 1 到端口 2、端口 2 到端口 3 为单向传输,23 °C 下测试插入损耗分别为 0.32 dB 和 0.43 dB,反向隔离度为 57 dB,因此环形器除本身在系统中的功能以外,还起到光隔离器的作用,能够有效抑制空间烧孔效应;高反 FBG 的一端与环形器端口 2 相连,利用其反射特性进行初步滤波,另一端切斜角防止回光; π 相移光纤光栅的输入端与环形器端口 3 相连,输出端与 EDFA 的输入端相连,利用其极窄的透射窗口进行滤波,滤波后的激光作为 EDFA 的种子输入,构成环形腔结构。系统中全部器件采用熔接的方式相连,没有分立的光学元件,实现了系统的全光纤化,结构紧凑。

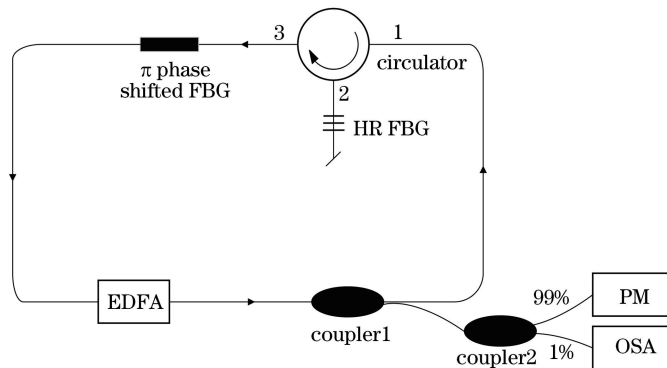


图 2 窄线宽掺铒光纤激光器实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of narrow linewidth erbium-doped fiber laser

由 EDFA 输出的激光经耦合器 1 分束后,一部分作为激光器的输出,另一部分作为环形腔的反馈由环形器端口 1 入射。高反 FBG 作为腔镜存在一定的反射带宽,只有在其反射带宽内的激光才会被反射进而入射到环形器端口 3,进入端口 3 的激光再通过 π 相移光纤光栅后入射进 EDFA。要想实现窄线宽激光输出,就必须保证高反 FBG 与 π 相移光纤光栅的中心波长相近,且高反 FBG 的带宽要小于 π 相移光纤光栅的带宽,即经由高反 FBG 反射的激光必须在 π 相移光纤光栅的透射带宽内且覆盖 π 相移光纤光栅的透射窗口。

实验中使用的 π 相移光纤光栅与高反 FBG 为采用紫外光、 π 相移相位掩模板法自行刻制,刻写系统见文献[17],采用 C+L 波段的放大自发辐射(ASE)光源进行测试得到的光谱图如图 3 所示。图 3 中,蓝色实线为高反 FBG 反射谱;蓝色虚线为加应力后的高反 FBG 反射谱;红色实线为 π 相移光纤光栅透射谱。高反 FBG 长度约为 35 mm,中心波长为 1547.96 nm,3 dB 带宽为 0.28 nm,透射深度大于 20 dB。 π 相移光纤光

栅长度约为 28 mm,中心波长为 1549.35 nm。如图 3 所示, π 相移光纤光栅透射峰测量结果受限于光纤光谱仪的分辨率(0.02 nm),使用可调谐窄线宽激光器测得的透射峰带宽约为 2.1 pm。为获得窄线宽激光的输出,要求两光栅中心波长对准。从图 3 可以看到两光栅中心波长存在一定的差值,因此在实验过程中,通过对高反 FBG 施加拉力,使其中心波长向长波方向移动直到与 π 相移光纤光栅相匹配。加拉力后高反 FBG 的反射谱如图 3 中蓝色虚线所示。

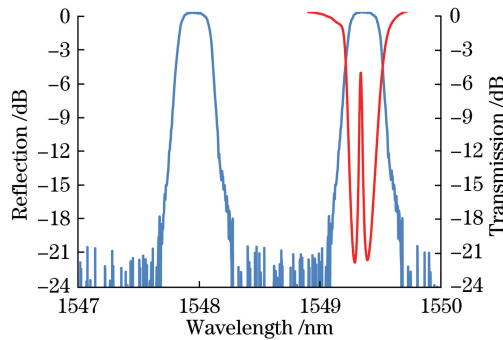


图 3 π 相移光纤光栅与高反 FBG 光谱图

Fig. 3 Spectra of π phase-shifted fiber grating and high-reflective FBG

3.2 结果与分析

实验中耦合器 1 的分光比为 10:90,10%输出端作为环形腔的反馈,90%输出端作为激光器输出,输出端耦合器 2 分光比为 1:99,1%输出端与光谱仪(横河, AQ6317)相连,改变 EDFA 的抽运功率,实时监测激光输出光谱,如图 4 所示。

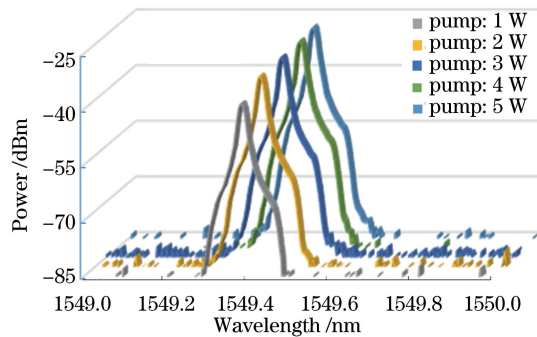


图 4 不同抽运功率下输出激光光谱

Fig. 4 Spectra of output laser with different pump powers

从图 4 中可以看到,不同抽运功率均可以获得稳定的激光输出。随着 EDFA 抽运功率的增大,输出激光中心波长向长波方向漂移,抽运功率为 5 W 时,输出激光的中心波长为 1549.45 nm,最大漂移量为 0.06 nm。这是因为随着抽运功率的增加,环形腔内传输的激光功率不断增加,使得 π 相移光纤光栅和高反 FBG 的纤芯温度有所升高,温度敏感性导致输出激光中心波长向长波方向漂移。受限于光谱分辨率,利用光纤光谱仪无法获得输出激光的精确光谱。实验中,采用扫描法布里-珀罗(F-P)干涉仪对输出激光的精确线宽进行了测量。F-P 干涉仪工作波段为 1275~2000 nm,自由光谱范围为 10 GHz,分辨率为 67 MHz。随着抽运功率的增加,激光器输出激光线宽展宽,不同抽运功率下得到的结果如表 1 所示。

表 1 激光线宽随抽运功率的变化

Table 1 Laser linewidth versus pump power

Pump power /W	1.5	3	5
$\Delta\nu$ /MHz	278.48	500	665
$\Delta\lambda$ /pm	2.228	4	5.32

功率计监测 99%输出端,拟合后的激光输出功率随 EDFA 抽运功率的变化如图 5 所示。激光阈值 300 mW,当抽运功率为 5 W 时,获得的最大输出功率约为 1.006 W,光-光效率为 20.12%。从图 5 中可以看

到,随着抽运功率的增加,激光斜率效率有所增加,这主要是由于随着抽运功率的增加,环形腔中传输的激光功率增加,通过 π 相移光纤光栅的激光线宽在传输过程中有所展宽,进入EDFA后的放大效率会增加,最后耦合输出的激光线宽也会增加,与表1的测量结果一致。

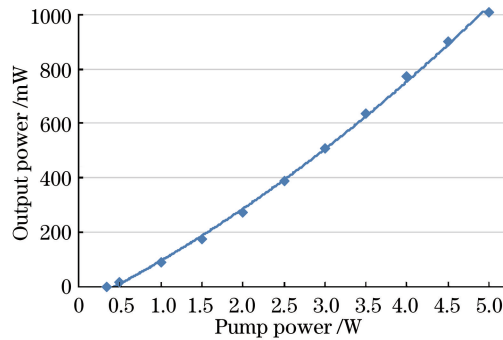


图5 输出功率随抽运功率变化曲线

Fig. 5 Output power versus pump power

4 结 论

本文利用自行设计并制作的 π 相移光纤光栅和高反射率FBG搭建了环形腔掺铒光纤激光器,利用FBG的窄带反射特性和与之相匹配的 π 相移光纤光栅的窄带滤波特性,实现了功率大于1 W、线宽小于700 MHz的 $1.55 \mu\text{m}$ 激光输出,光-光转换效率大于20%。输出光谱中没有观测到残余的抽运光,表明继续增加抽运光可以进一步提升激光功率。通过进一步优化设计 π 相移光纤光栅和FBG的结构参数,以及激光腔的结构,下一步有望实现高效的、高功率的单纵模激光输出,还可以利用光纤光栅对应力和温度的敏感性,实现输出激光的波长调谐。

致谢 感谢加拿大瑞尔森大学的顾锡嘉教授在光纤光栅刻写方面的指导。

参 考 文 献

- [1] Koshikiya Y, Fan X, Ito F. Long range and cm-level spatial resolution measurement using coherent optical frequency domain reflectometry with SSB-SC modulator and narrow linewidth fiber laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(18): 3287-3294.
- [2] Wan Hongdan, Lu Zhiming, Hu Taoping. A high power, single-frequency, narrow linewidth fiber laser based on an active double-ring cavity[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 071401.
万洪丹, 鲁志明, 胡涛平. 基于注入式有源双环腔的高功率单频窄线宽光纤激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 071401.
- [3] Xu Dan, Lu Bin, Yang Fei, *et al.* Narrow linewidth single-frequency laser noise measurement based on a 3×3 fiber coupler[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(1): 0102004.
徐丹, 卢斌, 杨飞, 等. 基于 3×3 耦合器的窄线宽单频激光器噪声测量技术[J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0102004.
- [4] Zhang Xiaoqing, Jia Yudong, Dong Jianjing. Design of Brillouin frequency shifter based on ring cavity structure of optical fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1214007.
张晓青, 贾豫东, 董建晶. 基于光纤环形腔结构的布里渊频移器设计[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1214007.
- [5] Liu F N, Jia X J, Liu Y G, *et al.* Enhancing coherent combining efficiency via choosing appropriate lasing wavelength in a Michelson compound cavity based on two 3 dB fibre loop mirrors and one fibre Bragg grating[J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, 24(4): 929-932.
- [6] Kringlebotn J T, Archambault J L, Reekie L, *et al.* $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ -codoped fiber distributed-feedback laser[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(24): 2101-2103.
- [7] Wu L, Pei L, Liu C, *et al.* Research on tunable phase shift induced by piezoelectric transducer in linearly chirped fiber

- Bragg grating with the V-I transmission matrix formalism[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 79: 15-19.
- [8] Malara P, Campanella C E, de Leonardi F, *et al.* Enhanced spectral response of π -phase shifted fiber Bragg gratings in closed-loop configuration[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 2124-2126.
- [9] Guo J, Yang C. Highlystabilized phase-shifted fiber Bragg grating sensing system for ultrasonic detection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(8): 848-851.
- [10] Guy M J, Taylor J R, Kashyap R. Single-frequency erbium fibre ring laser with intracavity phase-shifted fibre Bragg grating narrowband filter[J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(22): 1924-1925.
- [11] Chen X, Yao J, Zeng F, *et al.* Single-longitudinal-mode fiber ring laser employing an equivalent phase-shifted fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(7): 1390-1392.
- [12] Zhao Y, Chang J, Wang Q, *et al.* Research on a novel composite structure Er^{3+} -doped DBR fiber laser with a π -phase shifted FBG[J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22515-22522.
- [13] Kogelnik H. Filter response of nonuniform almost-periodic structures[J]. *Bell Labs Technical Journal*, 1976, 55(1): 109-126.
- [14] Yamada M, Sakuda K. Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(16): 3474-3478.
- [15] Weller-Brophy L A, Hall D G. Analysis of waveguide gratings: Application of Rouard's method[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1985, 2(6): 863-871.
- [16] Zhou Shaoling. Theoretical analysis on characteristics of phased-shifted fiber grating [J]. *Optical Communication Technology*, 2003, 27(4): 47-49.
周少玲. 相移光纤光栅特性分析[J]. *光通信技术*, 2003, 27(4): 47-49.
- [17] Wang M, Zhang Y J, Wang Z F. Fabrication of chirped and tilted fiber Bragg gratings and suppression of stimulated Raman scattering in fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 1529-1534.