

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.01.007

基于光纤光栅选频的近单频输出环形腔光纤激光器设计与仿真

果鑫, 陈涛, 张振鹤, 张威, 韩林桀, 赵海龙

(湖南工业大学 计算机学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 近单频光纤激光在相干合成、光通信、激光测量及光谱分析等领域具有独特的优势。目前, 采用环形腔光纤激光器实现近单频输出被科研工作者们广泛关注。环形腔光纤激光器中主要使用可调谐光纤光栅滤波器、可调谐带通滤波器、可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器以及可饱和吸收体等实现更好的近单频输出, 输出激光的光谱受到滤波器带宽以及环形腔数量的影响。因此, 基于光纤光栅选频, 使用Optisystem软件进行仿真, 通过改变环形腔数量和光纤光栅的3 dB带宽, 得到了边模抑制比为88.20 dBm的近单频激光输出。

关键词: 近单频光纤激光器; 环形腔; 双环腔法; 光纤光栅; 游标效应; Optisystem 仿真

中图分类号: TN242

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2024)01-0048-07

引文格式: 果鑫, 陈涛, 张振鹤, 等. 基于光纤光栅选频的近单频输出环形腔光纤激光器设计与仿真[J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(1): 48-54.

Design and Simulation of Near-Single Frequency Output Ring Cavity Fiber Laser Based on Fiber Grating Frequency Selection

GUO Xin, CHEN Tao, ZHANG Zhenhe, ZHANG Wei, HAN Linjie, ZHAO Hailong

(College of Computer Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Due to the fact that the near single frequency fiber laser is characterized with its unique advantages in coherent synthesis, optical communication, laser measurement and spectral analysis, the use of ring cavity fiber laser to achieve near single frequency output has become one of the research focuses for current researchers. Tunable fiber grating filters, tunable bandpass filters, tunable Fabry Perot (F-P) filters, and saturable absorbers are mainly used in ring cavity fiber lasers for a better near single frequency output, with the spectrum of the output laser affected by the filter bandwidth and the number of ring cavities. Therefore, based on fiber Bragg grating frequency selection and simulation, and by using Optisystem software, a near-single frequency laser output with a side mode suppression ratio of 88.20 dBm can be obtained by changing the number of ring cavities and the 3 dB bandwidth of the fiber grating.

Keywords: near-single frequency fiber laser; annular cavity; double ring cavity method; fiber Bragg grating (FBG); cursor effect; Optisystem simulation

收稿日期: 2022-11-16

基金项目: 湖南省自然科学省市联合基金资助项目(2022JJ50067, 2021JJ50049); 湖南省教育厅科学研究基金资助项目(21C0405, 20C0589, 19C0578)

作者简介: 果鑫, 男, 湖南工业大学教师, 主要研究方向为光子技术与现代光通信, 激光技术及智能光纤传感,

E-mail: 578713735@qq.com

0 引言

单频光纤激光器因其线宽较窄、结构较紧凑、体积较小、抗噪声性能较好和相干性较好等优点^[1-6],在光谱分析、激光雷达、非线性光学、大功率相干合成以及激光冷却等领域被广泛应用^[7-9],并成为激光领域的研究热点之一。影响激光器单频输出的因素众多,如多纵模振荡、空间烧孔效应以及增益介质的谱线加宽等。多纵模振荡以及增益介质的谱线加宽,可以通过选频机制滤除多个纵模,并保留一个纵模。激光器腔内驻波场的空间烧孔效应可以通过构建环形腔而被抑制。环形腔是行波腔,激光在腔内以行波的方式传播,抑制不利于单频输出的空间烧孔效应^[10-12]。目前已报道的复合环形腔结构,主要有 Yeh Chienhung 等^[13]提出的结合两个法布里-珀罗可调滤波器的双环结构,此方案结构简单,但操作时需要把两个法布里-珀罗精密调节至相同波长,并保证波长不发生漂移,这有一定难度;F. Liégeois 等^[14]提出的光纤布拉格光栅与若干马赫-曾德模式滤波器结合的方案,不仅结构复杂而且需要精密调节,还可能引入很大的损耗;Lee C. C. 等^[15-16]提出了多环形腔结构,但系统结构较为复杂。

本文拟基于双环形腔结构,并采用光纤光栅选频,通过控制光纤光栅的 3 dB 带宽,实现光纤激光近单频输出。文中主要采用了 980 nm 的泵浦源、泵浦耦合器、掺铒光纤 (erbium doped fiber, EDF)、隔离器、环形器,以及光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 作为滤波器,构建双环形腔结构的光纤激光器,并将该双环形腔结构光纤激光器在 Optisystem15.0 平台进行仿真实验,同时控制 FBG 的 3 dB 带宽为 0.05 nm,仿真实验结果表明,其实现了边模抑制比为 88.20 dBm 的近单频激光输出。

1 理论基础

1.1 环形腔掺铒光纤激光器理论基础

环形腔掺铒光纤激光器是行波腔,相比于驻波腔,能够有效地抑制烧孔效应。环形腔掺铒光纤激光器的谱线加宽是由均匀加宽和非均匀加宽造成的。均匀加宽主要有自然加宽、碰撞加宽和晶格振动加宽;其中,自然加宽是因为处于激发态的原子发生自发辐射,造成谱线加宽;碰撞加宽是由大量原子(分子、离子)之间的无规则“碰撞”所引起的,主要发生在气体物质中;晶格振动加宽,则是由于固体增益物质的激活离子镶嵌在晶体中,而周围的晶格场将影响其能级的位置而引起的。由于激活离子周围的晶格场会

随着时间的变化而周期性变化,因此也会引起激活离子的能级位置随时间发生变化,这种能级位置变化引起了晶格振动谱线加宽。对于固体激光工作物质,自发辐射和无辐射跃迁造成的谱线加宽很小,晶格振动加宽是主要的均匀加宽因素。而环形腔掺铒光纤激光器的工作物质为掺铒光纤,属于固体工作物质,因此,晶格振动加宽在均匀加宽中占主导地位。

掺铒光纤中铒离子在玻璃基质的荧光光谱中是由于晶格振动引起的均匀加宽和二氧化硅晶体非周期特性引起的非均匀加宽叠加而成的。这种非均匀加宽的主要原因是:每个铒离子都处于二氧化硅晶体所构成的不同网格中,使得不同的铒离子在周围二氧化硅网格的作用下,其能级位置产生了微小偏移。各铒离子在跃迁过程中形成了以某一频率为中心的光谱线型,这种线型为分立的洛伦兹线型^[17],这些分立的谱线是均匀加宽的,函数关系式如下:

$$g(\nu) = \frac{\Delta\nu}{2\pi} \cdot \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu/2)^2} \quad (1)$$

式中: ν 为谱线频率; ν_0 为谱线中心频率; $\Delta\nu$ 为谱线宽度。

而总的荧光光谱(或包络线)则是这些独立的洛伦兹线型的叠加,遵循高斯函数分布,因此形成了非均匀加宽的总荧光光谱。

已有掺铒光纤一般主要掺杂 Er_2O_3 。在其物质的量掺杂量为 0.2% 的掺铒光纤荧光光谱中,各谱线成分如图 1 所示。图中曲线 a、b、c、d 分别为中心频率不同的掺铒光纤洛伦兹线型光谱,曲线 e 为其归一化荧光发射谱。

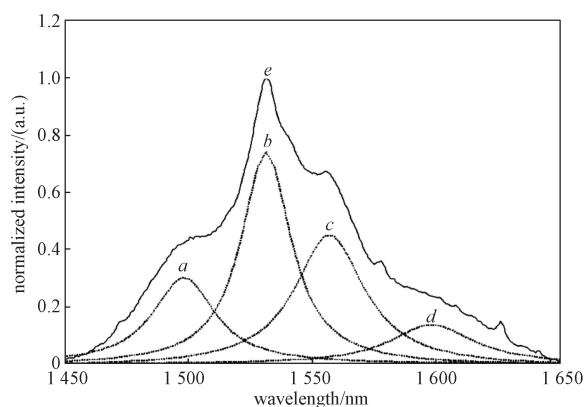


图1 掺铒光纤的归一化荧光发射谱及其洛伦兹谱线成分
Fig. 1 Normalized fluorescence emission spectra with its Lorentz line compositions

图1显示,铒离子 $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 能级间跃迁的荧光光谱主要由4条洛伦兹谱线成分组成,其峰值位置分别对应于1497,1532,1558,1599 nm附近,谱线

宽度分别为 30.5, 23.7, 33.9, 40.7 nm, 总的荧光光谱如图 1 中曲线 *e* 所示^[18]。

1.2 环形腔的游标效应选频机制

复合腔（多环形腔）由两个或两个以上的环形腔通过耦合器连接，主要包括隔离器、耦合器、泵浦源、掺铒光纤和光纤布拉格光栅。在复合腔中，每个腔中的模式必须满足相应腔的谐振条件，输出模式需要满足所有腔的谐振条件。由于每个腔的长度不同，只有同时满足各个腔谐振条件的光才能在腔内放大，否则该纵模就会被抑制。

以两个环形腔组成的双环腔为例，设主腔的腔长为 L_1 ，子腔的腔长为 L_2 ，则他们所对应的自由光谱范围（free spectral range, FSR；或被称为“纵模间隔”）分别为

$$FSR_1 = \frac{c}{n_1 L_1}, FSR_2 = \frac{c}{n_2 L_2} \quad (2)$$

式中： c 为光速； n_1 和 n_2 分别为两个环形腔（主腔和辅腔）的光纤纤芯折射率。

为保证复合腔中的模式，必须同时满足主腔和辅腔的谐振条件，因此复合腔的 FSR 为

$$FSR = pFSR_1 = qFSR_2 \quad (3)$$

式中： p 和 q 均为满足等式的最小正整数。

可见，复合腔结构的 FSR 是主腔和辅腔的最小公倍数。因此，环形复合腔的 FSR 相比单环的 FSR 明显增大。这种选频效应即称之为复合腔激光器的游标效应。以上游标效应的选频过程如图 2 所示。通过游标效应，FSR 增大，纵模间隔被拓宽，最后在 FBG 的 3 dB 带宽内只有一个纵模被选出，即只有一个纵模被 FBG 反射，从而得到单频激光输出。

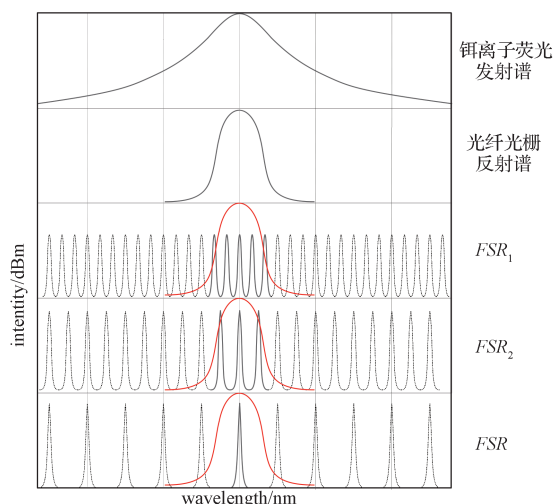


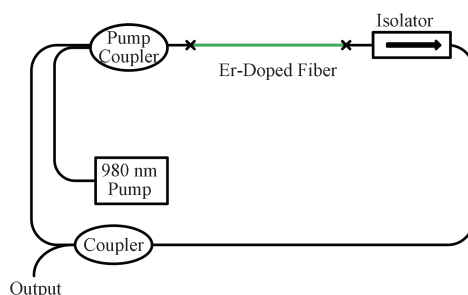
图 2 游标效应选频过程示意图

Fig. 2 Diagram of the frequency selection process of cursor effect

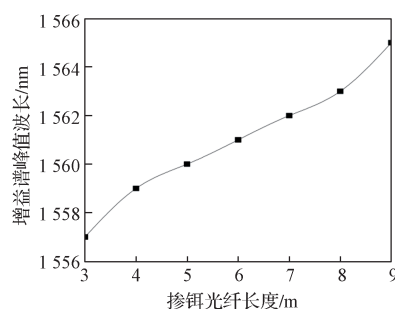
2 仿真实验及结论分析

2.1 单环形腔掺铒光纤激光器光纤长度对增益谱峰值波长的影响

为选择合适的增益光纤长度，首先在单环形腔中研究增益谱峰值波长与掺铒光纤长度的关系。基于图 3a 所示的单环形腔掺铒光纤激光器，在 Optisystem 平台上进行仿真实验，改变掺铒光纤的长度，通过光谱分析仪观察增益谱峰值对应的波长，得到增益谱峰值波长与掺铒光纤长度的关系，如图 3b 所示。



a) 单环形腔掺铒光纤激光器结构示意图



b) 增益谱峰值波长与掺铒光纤长度的关系曲线

图 3 单环形腔掺铒光纤激光器的结构及其增益谱峰值波长与掺铒光纤长度关系图

Fig. 3 Structure and gain spectrum peak wavelength of a single ring cavity erbium-doped fiber laser as a function of erbium-doped fiber length

因后面的仿真实验所使用的光纤光栅反射中心波长均为 1 559 nm，且该增益峰值波长对应的掺铒光纤长度为 4 m（如图 3b 所示），因此后续的仿真实验均采用长度为 4 m 的掺铒光纤。

2.2 未经 FBG 选频的掺铒光纤激光器振荡超模分析

首先，基于图 4a 所示的单环形腔掺铒光纤激光器的结构，在 Optisystem 平台构建如图 5a 图所示的仿真图。该环形腔激光器由 980 nm 泵浦源、泵浦耦合器、4 m 长的掺铒光纤（EDF）、隔离器（Isolator）和耦合器（Coupler）组成。980 nm 泵浦源激光器的输出功率为 100 mW，经泵浦耦合器输入掺铒光纤，为确保腔内激光单向运转，在掺铒光纤之后插入一个

隔离器。

其次,保持图 4a 的结构和所有参数不变,成为主腔,再利用光纤耦合器、一段 3 m 长的普通单模光纤以及确保激光器单向运转的隔离器构成辅腔,该辅腔与主腔共同构成双环形腔掺铒光纤激光器(未经 FBG 选频),如图 4b 所示。图 5b 所示为该双环形腔掺铒光纤激光器的仿真结构图。

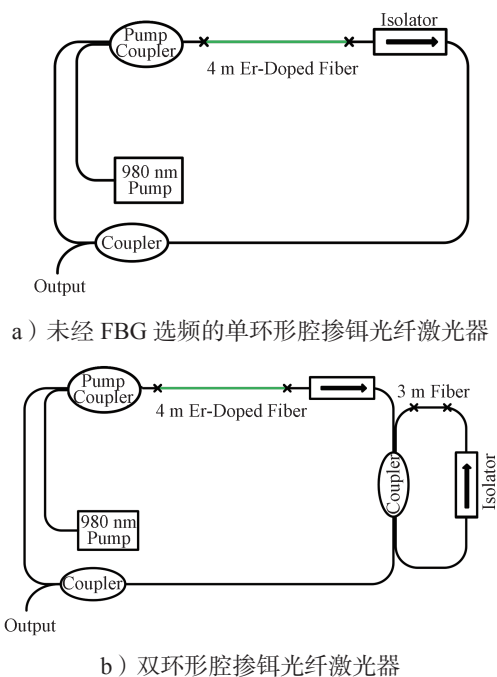


图 4 掺铒光纤激光器的结构图

Fig. 4 Structure diagram of erbium-doped fiber laser

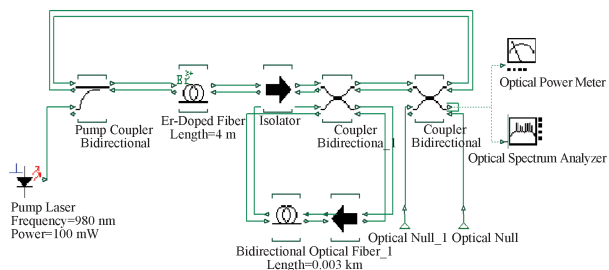
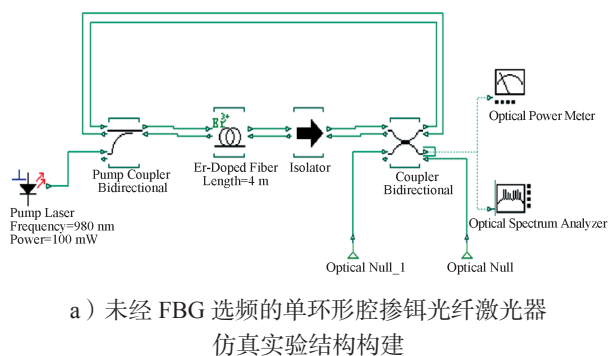


图 5 掺铒光纤激光器的仿真实验结构构建

Fig. 5 Simulation construction of Erbium-doped fiber laser

仿真实验中所用的环形腔长度为 4 m (Optisystem 默认各无源器件之间的连接线长度为 0), 对应的 FSR (纵模间隔) 为 51.11 MHz, 单环形腔的 FSR 很小, 很显然无法得到近单频输出。通过光谱分析仪观察到的光谱如图 6a 所示。

根据多环形腔选频的游标效应理论, 在主腔中加入一个辅腔能够拓宽 FSR , 增大纵模间隔。通过计算可得辅腔的 FSR 约为 68.96 MHz (波长间隔约等于 0.000 5 nm), 由游标效应可知, 双环形腔的 FSR 约为 206.90 MHz (波长间隔约等于 0.001 7 nm), 此为理论计算得到的纵模间隔拓宽值。为验证此结果, 在 Optisystem 软件中进行仿真实验, 得到图 6b 所示双环形腔激光器光谱。

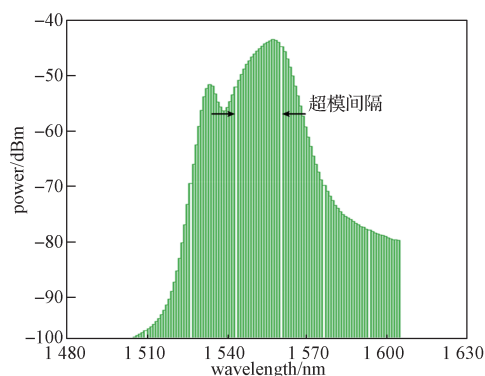
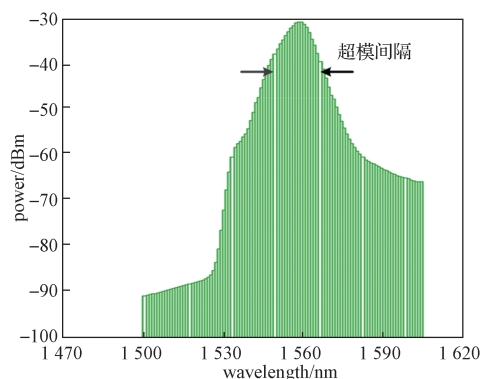


图 6 未经 FBG 选频的单环形腔掺铒光纤激光器和双环形腔掺铒光纤激光器自发辐射仿真实验光谱图

Fig. 6 Spectra of spontaneous emission simulation experiment of single ring cavity erbium-doped fiber laser and double ring erbium-doped fiber laser without FBG frequency selection

如图 6 所示, 在等间距位置出现了模式的周期性抑制。这一周期性实质是未经 FBG 选频的单环腔掺铒光纤激光器仅靠环形腔选频而输出的梳状滤波谱。由于仿真软件中的光谱分析仪分辨率有限, 无法直接观察到相邻纵模间隔, 因此仿真得到的光谱间隔实为超模 (多个相差恒定的纵模叠加形成一个超模^[19])

间隔,而非纵模间隔。

分析图 6a,可以得知单环形腔掺铒光纤激光器的超模光谱间隔约为 18.02 nm ($\sim 2.24\text{ THz}$),此时并没有得到近单频输出;分析图 6b,可发现双环形腔掺铒光纤激光器的超模间隔为 17.55 nm ($\sim 2.19\text{ THz}$),相对于单环形腔,双环形腔有一定的抑制作用。通过对超模间隔的分析可知,双环形腔结构相对于单环形腔结构,超模间隔缩小了约 0.47 nm ($\sim 0.05\text{ THz}$)。因此每个超模中的纵模数量有所减少,但是输出光谱 3 dB 带宽接近 10 nm ,与极窄线宽近单频输出差之甚远。

2.3 经 FBG 选频的单环形腔和双环形腔掺铒光纤激光器设计与仿真实验

为了实现近单频输出,保持图 4b 的所有参数不变,在主腔中加入一个 FBG 进行选频。FBG 的中心波长为 $1\,559\text{ nm}$, 3 dB 带宽为 0.05 nm 。相应单环形腔激光器的结构图、仿真实验构建以及对应的仿真输出激光光谱如图 7a、8a 和 9a 所示。

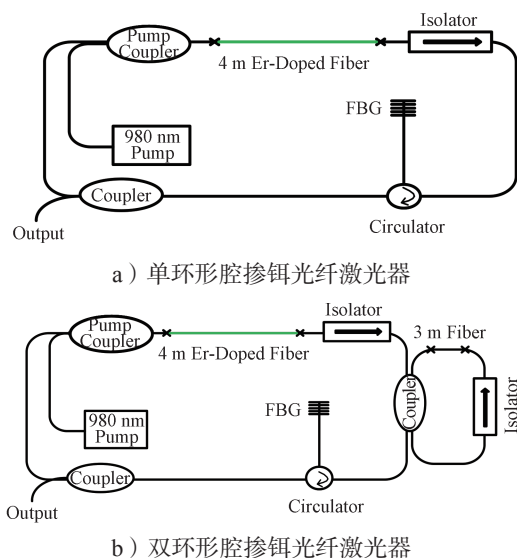


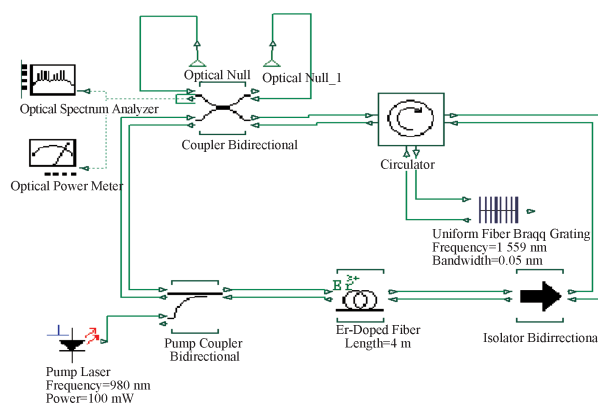
图 7 经 FBG 选频的掺铒光纤激光器结构图

Fig. 7 Structure diagram of erbium-doped fiber laser after FBG frequency selection

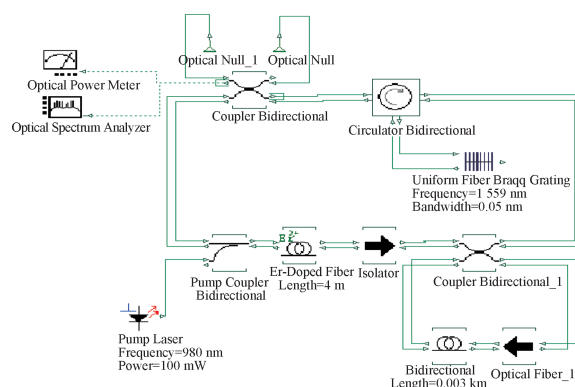
基于图 7a 的环形腔激光器结构(称之为主腔),引入一个由光纤耦合器、隔离器以及一段 3 m 长的普通单模光纤构成的辅腔进行选模。上述双环形腔掺铒光纤激光器结构、仿真实验构建以及仿真实验输出激光光谱分别如图 7b、8b 和 9b 所示。

从仿真实验输出激光光谱图(见图 9)可看出,当 FBG 的 3 dB 带宽为 0.05 nm (此为刻写 FBG 时能达到的带宽极限)时,单环形腔掺铒光纤激光器得到了边模抑制比约为 58.27 dBm 的超窄线宽输出(如图 9a 所示)。而加入辅腔的双环形腔掺铒光纤激光器输出激光的功率有所降低(因加入辅腔引入一部分损耗,

此时输出功率约 -9.16 dBm),但是通过放大光谱图可发现(如图 9b 所示),经过 FBG 选频的双环形腔激光器,其激光输出光谱的边模抑制比相对单环形腔大幅提高,约为 88.20 dBm ,接近单频输出值。仿真实验结果表明,双环形腔的超模抑制作用显著。通常,边模抑制比在 60 dB 以上,可以视为近单频输出。因此,图 9b 所示经过 3 dB 带宽为 0.05 nm 的 FBG 选频双环形腔激光器激光输出为近单频输出,且后续实验均采用基于此 FBG 选频的双环形腔结构来进行仿真。



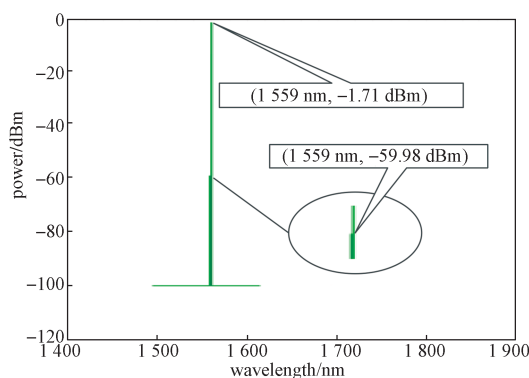
a) 单环形腔掺铒光纤激光器



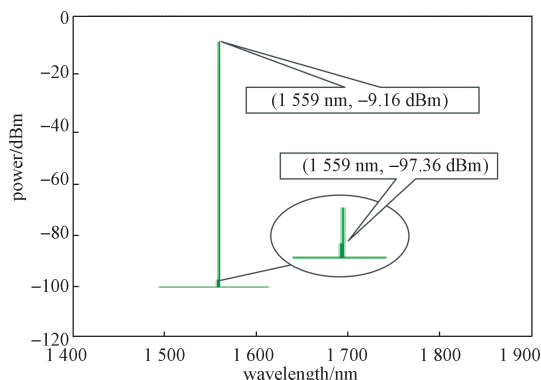
b) 双环形腔掺铒光纤激光器

图 8 经 FBG 选频的掺铒光纤激光器仿真实验构建

Fig. 8 Simulation experiment construction of erbium-doped fiber laser after FBG frequency selection



a) 单环形腔掺铒光纤激光器



b) 双环形腔掺铒光纤激光器

图9 经FBG选频的掺铒光纤激光器仿真实验输出激光光谱

Fig. 9 Simulation experiment output laser spectrum of erbium-doped fiber laser after FBG frequency selection

2.4 光纤光栅 3 dB 带宽对激光器输出的影响

采用经 FBG 选频的双环形腔掺铒光纤激光器结构来讨论 FBG 的 3 dB 带宽对激光器输出的影响。通过改变 FBG 的 3 dB 带宽,测得不同 3 dB 带宽下的输出功率和边模抑制比。FBG 的 3 dB 带宽与输出功率以及边模抑制比的关系如图 10 所示。

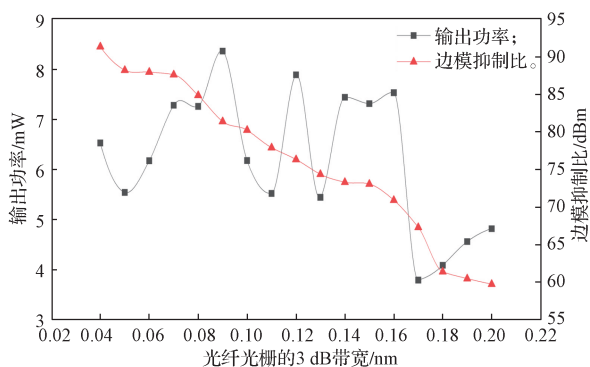


图10 输出功率与FBG的3dB带宽关系图

Fig. 10 Diagram of the relationship between output power and the 3 dB bandwidth of the FBG

深入分析图 10, 所得结论分两方面阐述:

1) 光纤光栅的 3 dB 带宽对激光器输出功率的影响。当 FBG 的 3 dB 带宽在 0.14 nm 之内变化时, 因 FBG 的 3 dB 带宽极窄, 纵模数较少, 各纵模之间形成很强的模式竞争, 激光器的输出功率有一定的波动 (在 3 mW 以内); 随着 FBG 的 3 dB 带宽继续增加, 在 0.16 nm 以前, 参与模式竞争的纵模增多, 形成了相对稳定的超模振荡, 输出功率也趋于稳定; 而在 0.16 nm 之后, 随着 FBG 的 3 dB 带宽进一步增加, 激光器腔内起振的纵模更多, 受激辐射减弱, 自发辐射增强, 难以形成很强的激光输出。因此, 在实际应用中, 应该根据介质增益水平选用合适的 FBG 3 dB 带宽, 以使得激光

器在近单频输出的同时, 得到更高的输出功率。

2) 光纤光栅的 3 dB 带宽对激光器激光输出边模抑制比的影响。当 FBG 的 3 dB 带宽逐渐增加, 光谱的边模抑制比逐渐减小, 这是由于 FBG 的 3 dB 带宽增加, 更多纵模加入模式竞争, 输出激光光谱被加宽, 所以边模抑制比下降。

3 结论

由于晶格振动和二氧化硅晶体的非周期特性, 掺铒光纤中铒离子的荧光光谱被加宽, 使得环形腔激光器腔内发生多纵模振荡, 而双环形腔激光器由于游标效应拓宽纵模间隔, 对多纵模有着很好的抑制作用。因此设计基于 FBG 选频的双环形腔掺铒激光器并利用 Optisystem 平台进行仿真实验, 实验中 FBG 的 3 dB 带宽设定为 0.05 nm (此为刻写 FBG 时能达到的带宽极限)。最终实现了边模抑制比为 88.20 dBm 的近单频输出。研究表明, 光纤光栅的 3 dB 带宽在 0.16 nm 以内变化时, 由于光纤光栅的 3 dB 带宽较小, 起振的纵模数量较少, 模式竞争较弱, 激光输出功率只会在较小范围内浮动。在 0.16 nm 之后, 更多纵模加入模式竞争, 而模式竞争加强, 受激辐射减弱, 激光输出功率降低。此外, 随着光纤光栅的 3 dB 带宽增加, 激光器腔内的纵模数量增多, 输出激光的边模抑制比随之减小。以上结论对单频环形腔激光器的设计具有一定的指导价值。

参考文献:

- [1] 丁建一, 陈浩伟, 白晋涛. 基于环形滤波器可调谐单频光纤激光器的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 366-371.
DING Jianyi, CHEN Haowei, BAI Jintao. Research on Tunable Single-Frequency Fiber Lasers Based on Ring Filter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 366-371.
- [2] 丁建永, 于广礼, 张雷, 等. 全固态窄线宽单频激光器研究进展与应用 [C]//2018 年光学技术与应用研讨会暨交叉学科论坛. 桂林: 上海市红外与遥感学会, 2018: 142-150.
DING Jianyong, YU Guangli, ZHANG Lei, et al. Research Progress and Application of All-Solid-State Narrow-Width Single-Frequency Lasers[C]//2018 Symposium on Optical Technology and Applications and Interdisciplinary Forum. Guilin: China Conference & Exhibition, 2018: 142-150.
- [3] 靳丕钰. 连续可调谐单频激光器的研究 [D]. 太原: 山西大学, 2018.

- JIN Pixian. Study on Continuous Tunable Single Frequency Laser[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2018.
- [4] 方思远. 2.0 微米 DBR 单频脉冲光纤激光技术研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- FANG Siyuan. Research on 2.0 μm DBR Single Frequency Pulsed Fiber Laser Technology[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [5] 程 鑫, 姜华卫, 冯 衍. 高功率单频掺铒光纤激光技术研究进展 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(6): 99–110.
- CHENG Xin, JIANG Huawei, FENG Yan. Research Progress of High-Power Single-Frequency Erbium-doped Fiber Laser Technology (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(6): 99–110.
- [6] 史 伟, 付士杰, 盛 泉, 等. 高性能单频光纤激光器研究进展: 2017—2021(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 57–70.
- SHI Wei, FU Shijie, SHENG Quan, et al. Research Progress on High-Performance Single-Frequency Fiber Lasers: 2017—2021(Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 57–70.
- [7] 李 灿, 周 朴, 马鹏飞, 等. 单频光纤激光技术的研究进展 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(6): 33–46.
- LI Can, ZHOU Pu, MA Pengfei, et al. Research Progress of Single-Frequency Fiber Laser Technology (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(6): 33–46.
- [8] 杨昌盛, 岑 旭, 徐善辉, 等. 单频光纤激光器研究进展 [J]. 光学学报, 2021, 41(1): 201–217.
- YANG Changsheng, CEN Xu, XU Shanhui, et al. Research Progress of Single-Frequency Fiber Laser[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 201–217.
- [9] 许云鹏. 基于增益光栅注入锁定的单频自调 Q 激光器及其线宽测量的研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- XU Yunpeng. Study on Single-Frequency Self-Q-Switched Laser and Its Linewidth Measurement Based on Gain Grating Injection Locking[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018.
- [10] ZYSKIND J, SULHOFF J, SUN Y, et al. Singlemode Diode-Pumped Tunable Erbium-Doped Fibre Laser with Linewidth Less than 5.5 kHz[J]. Electronics Letters, 1991, 27(23): 2148–2149.
- [11] 宁 鼎, 黄榜才, 李朝辉, 等. 光纤光栅选频环形腔掺 Yb^{3+} 光纤激光器 [J]. 光学学报, 2004, 24(2): 190–194.
- NING Ding, HUANG Bangcai, LI Zhaozhui, et al. Ring Cavity Yb^{3+} -Doped Fiber Laser with Frequency Selecting by Fiber Bragg Grating[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(2): 190–194.
- [12] 赵桂娟, 王雨雷, 陈 彬, 等. LD 侧面泵浦被动调 Q 环形腔单纵模激光器 [J]. 光学学报, 2022, 42(19): 125–129.
- ZHAO Guijuan, WANG Yulei, CHEN Bin, et al. LD Side-Pumped Passively Q-Switched Ring Cavity Single-Longitudinal-Mode Laser[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(19): 125–129.
- [13] YEH Chienhung, CHI Sien. A Wavelength-Tunable Erbium-Doped Fiber Double-Ring Laser with Stabilized Single-Frequency Operation[J]. Japanese Journal of Applied Physics Part Regular Papers Brief Communications & Review Papers, 2005, 44(7A): 5003–5005.
- [14] LIÉGEOIS F, HERNANDEZ Y, PEIGNÉ G, et al. High-Efficiency, Single-Longitudinal-Mode Ring Fibre Laser[J]. Electronics Letters, 2005, 41(13): 729–730.
- [15] LEE C C, CHEN Y K, LIAW S K. Single-Longitudinal-Mode Fiber Laser with a Passive Multiple-Ring Cavity and Its Application for Video Transmission[J]. Optics Letters, 1998, 23(5): 358–360.
- [16] LEE C C, CHI S. Single-Longitudinal Mode Operation of a Grating-Based Fiber-Ring Laser Using Self-Injection Feedback[J]. Optics Letters, 2000, 25(4): 1774–1776.
- [17] 杨祥林. 光放大器及其应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 4–6.
- YANG Xianglin. Optical Amplifier and Its Application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000: 4–6.
- [18] 周亚训. 多组分宽带掺铒玻璃光谱性质及光纤放大特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- ZHOU Yaxun. Study on Spectral Properties and Fiber Amplification Characteristics of Multi-Component Broadband Erbium-Doped Glass[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [19] 胡智勇, 丁永奎, 贾东方, 等. 复合腔抑制主动锁模光纤激光器超模噪声的理论与实验研究 [J]. 天津大学学报, 2003, 36(5): 645–647.
- HU Zhiyong, DING Yongkui, JIA Dongfang, et al. Supermode Noise Suppression in Harmonically Mode-Locked Fiber Lasers with Composite Cavity[J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(5): 645–647.

(责任编辑: 廖友媛)