光电器件

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20250310004

基于可饱和吸收体的复合腔窄线宽掺铒光纤激光器

薛明昆,高兰兰*,王 蓟,许丕禹,乔鑫瑶
(长春理工大学 物理学院,长春 130000)

摘 要: 文章提出一种基于复合腔结构的1 550 nm窄线宽光纤激光器。通过主腔和子腔之间形成的游标效应,拓宽了腔内纵模间隔。采用一段5 m长的低掺杂未泵浦掺铒光纤作为饱和吸收体,借助环形器和光纤光栅(FBG)的反射作用,在吸收体内形成相向传输激光并产生驻波,进而形成动态光栅以实现滤波。在FBG、复合腔和可饱和吸收体的共同滤波作用下,有效消除了多纵模振荡并抑制了模式跳变。当泵浦功率为200 mW时,激光器输出中心波长为1 550.15 nm、功率为8 mW的窄线宽激光,经延时自外差法测得线宽为784 Hz。

关键词: 激光器;光纤激光器;窄线宽;复合腔;可饱和吸收体
中图分类号: TN248 **文章编号:** 1001－5868(2025)05－0830－05

A Composite-Cavity Narrow-Linewidth Erbium-Doped Fiber Laser Based on A Saturable Absorber

XUE Mingkun, GAO Lanlan, WANG Ji, XU Piyu, QIAO Xinyao
(**School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, CHN**)

Abstract: In this study, we analyzed the performance of a 1 550 nm narrow-linewidth fiber laser with an innovative compound-cavity configuration. The system was designed to take advantage of the Vernier effect generated between primary and subsidiary cavities to extend the frequency spacing of longitudinal modes. The laser incorporates an unpumped 5-m-long lightly erbium-doped fiber segment that functions as a saturable absorber in which counterpropagating beams formed via reflection through a circulator and a fiber Bragg grating create standing wave effects. This interaction generates dynamic gratings that suppress mode hopping and eliminate multi-longitudinal-mode operation. Under a pump power of 200 mW, the system operated stably with a single longitudinal mode at a wavelength of 1 550.15 nm with an output power of 8 mW. The laser exhibited exceptional spectral purity, with a linewidth of 784 Hz as measured via delayed self-heterodyne detection.

Key words: laser; fiber laser; narrow-linewidth laser; composite-cavity laser; saturable absorber

0 引言

窄线宽光纤激光器是近几年光纤激光领域的研究热点之一,其具有相干性高、输出光束质量好、抗电磁干扰、输出光谱线宽窄、单色性高等特点[1],在相干光通信、光纤传感[2-4]、激光雷达[5-7]、光纤时频同步传递[8-10]、太赫兹波产生[11]等领域,有广阔的应用前景。

2012年,中国电子科技集团蔡冰涛等通过在低掺铒浓度光纤中形成的自写入瞬态光栅来压缩线宽,获得了波长为1 552.18 nm、最大输出功率为23 mW、线宽小于8 kHz的窄线宽低噪声光纤激光[12]。2019年,北京交通大学白燕等使用未泵浦的

收稿日期:2025－03－10.
* 通信作者:高兰兰

掺铥保偏光纤作为饱和吸收体，结合光纤光栅 F-P 波器，实现了激光器的单纵模运转和超窄线宽输出，基于频率噪声的线宽测量方法测得在 0.01 s时间下的线宽为 300 Hz[13]。2023 年，北京交通大学高娇等使用 3 个耦合器组成的复合双环腔抑制腔内多纵模，结合未泵浦的掺铥光纤作为饱和吸收体，实现了波长为 2 050 nm、线宽为 9.17 kHz 的窄线宽掺铥光纤激光器[14]。2023 年，Huang 等采用随机分布布拉格光栅阵列的透射和反射相结合的方法，压缩了掺铒光纤激光器的输出激光线宽，得到输出功率为 6 mW、线宽为 570 Hz 的窄线宽激光，当激光功率放大至 25 mW，线宽为 830 Hz[15]。

本文基于二波混频原理，利用未泵浦掺铒光纤作为饱和吸收体，结合复合腔增大腔内纵模间隔，成功压缩了线宽并抑制了模式跳变，使激光器实现了 754 Hz 的窄线宽激光输出，该系统结构设计简洁且全光纤化，相较于文献[12]中采用环形腔饱和吸收体系统获得的 8 kHz 的线宽宽度，线宽小了 1 个数量级。

1　实验装置

图 1 是基于可饱和吸收体的复合腔窄线宽掺铒光纤激光器结构图，采用了环形腔结构组成窄线宽光纤激光器的主腔。泵浦源是一个 980 nm 的光纤耦合半导体激光器，泵浦光经过波分复用器（WDM）进入到掺铒光纤（EDF）中进行增益放大。掺铒光纤型号为 EDFL-980-HP，在 1 530 nm 处的吸收系数为 26.1 dB/m，长度为 5 m。环形器（CIR）的作用是保证激光信号的单向传输，激光信号由环形器的 1 端口进入到 2 端口，在 2 端口中，一段未泵浦的掺铒光纤 EDFC-980-HP 和光纤布拉格光栅（FBG）组成滤波装置。未泵浦掺铒光纤作为可饱和吸收体，其在 980 nm 处的吸收系数为 3.3 dB/m，长度为 5 m。FBG 的中心波长为 1 550.2 nm，3 dB 带宽为 0.45 nm，反射率大于 98%。通过 FBG 的反射，在可饱和吸收体中形成由相向传输激光产生的驻波效应，从而得到周期性变化的增益和折射率空间分布，即增益光栅和折射率光栅，用这种方法可以消除激光信号的多模振荡并达到滤波效果。滤波后的激光信号从环形器的 3 端口导出，最终经过耦合器 OC-2 输出，OC-2 的耦合比为 10∶90，90% 的端口用于输出。在整个激光器的谐振腔中又加入一个子腔，通过主腔和子腔之间的游标效应拓展激光信号的纵模间隔，子腔由一个 50∶50 的 3 dB 耦合器 OC-1 和一段 0.7 m 长的单模光纤所构成。

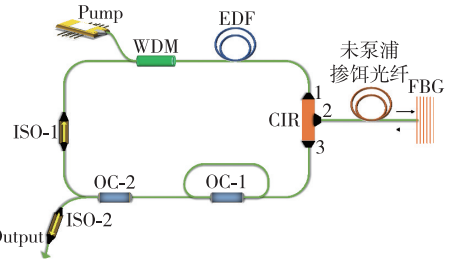
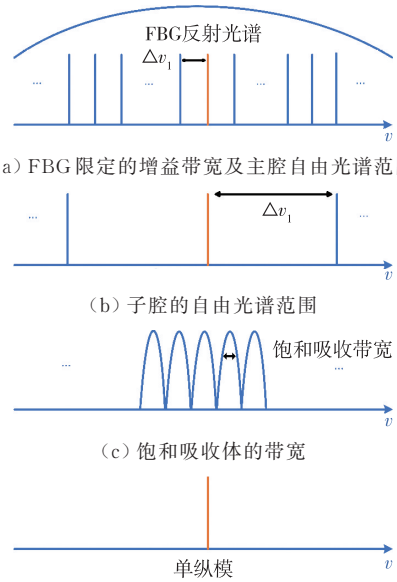


图 1　基于可饱和吸收体的复合腔窄线宽掺铒光纤激光器结构图

2　复合腔及饱和吸收体滤波原理

基于可饱和吸收体的复合腔窄线宽光纤激光器包含了三种滤波结构：首先是 FBG 对整个增益介质的增益谱进行限定，对腔内模式进行粗滤波；其次采用复合腔结构，利用游标效应来扩大激光器的自由光谱范围；最后，利用在可饱和吸收体中形成的动态光栅压窄带宽。三种滤波结构对腔内纵模的共同控制如图 2 所示。



（a）FBG 限定的增益带宽及主腔自由光谱范围

（b）子腔的自由光谱范围

（c）饱和吸收体的带宽

（d）FBG、复合腔及饱和吸收体共同作用选出单纵模

图 2　窄线宽光纤激光器选模运行原理示意图

图 2（a）和（b）所示，分别是窄线宽光纤激光器主腔和子腔的纵模分布，主腔和子腔的自由光谱范围（FSR）分别为：

$$\Delta v_1 = \frac{c}{nL_1} \tag{1}$$

$$\Delta v_2 = \frac{c}{nL_2} \tag{2}$$

式中，主腔腔长L_1为20 m，子腔腔长L_2为0.7 m，c为光速，n为石英光纤折射率。主腔的自由光谱范围$\Delta\nu_1$为10.4 MHz，子腔的自由光谱范围$\Delta\nu_2$为298 MHz，由于游标效应[16]，主腔和子腔的最小公倍数是复合腔腔内的FSR，为1 490 MHz，可见加入子腔后对于筛选单一纵模具有极大帮助。图3显示了主腔和子腔的游标效应拓展复合腔FSR的原理。

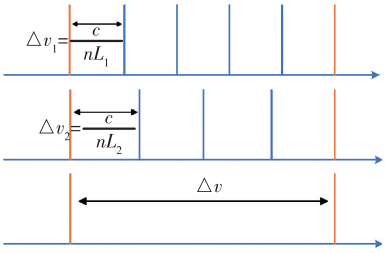


图3 复合腔游标效应示意图

3 实验结果分析与讨论

窄线宽光纤激光器输出功率随泵浦功率的变化如图4所示。当泵浦功率为200 mW时，输出功率为8 mW。由于系统中使用了环形器，具有较大的插入损耗，导致阈值较高。当泵浦功率由70 mW增加到200 mW时，掺铒光纤激光器均可实现窄线宽激光输出，未发生跳模现象。

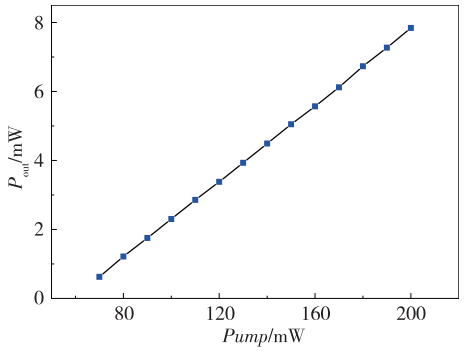


图4 窄线宽光纤激光器的输出功率

窄线宽光纤激光器的输出光谱如图5所示，由于受到光纤光栅反射中心波长的限制，窄线宽光纤激光器的工作波长为1 550.15 nm，光学信噪比（OSNR）为64.2 dB。

室温环境下，1 h内、以10 min为间隔测量窄线宽光纤激光器的波长稳定性，如图6所示。由图6可知，光谱中心波长没有发生显著变化，1 h的中心波长漂移偏量小于0.01 nm，光学信噪比波动小于0.568 dB，该波长偏移与光学信噪比波动是由泵浦功率与环境温度的变化引起的。

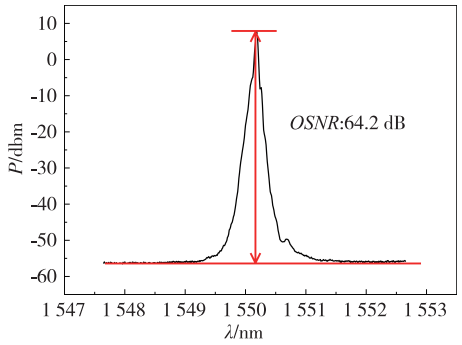


图5 窄线宽光纤激光器的光谱图

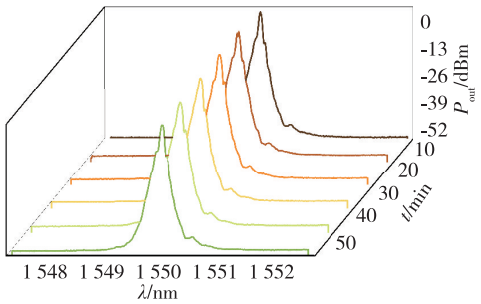


图6 1 h内窄线宽光纤激光器的波长稳定性

紧接着通过延迟自外差方法测量窄线宽光纤激光器的输出线宽，使用50 MHz的声光频移器，将拍频信号从0 Hz移频到50 MHz处方便观察。

在延时自外差系统中，延时光纤长度往往需要超过1 000 km才能使测量线宽。然而实际测量过程中长距离的延时光纤会带来巨大的损耗和谱线展宽，无法实现测量。根据已有实验结果表明[17]，50 km的延时光纤可以用于测量亚千赫兹量级的窄线宽激光，如图7所示。

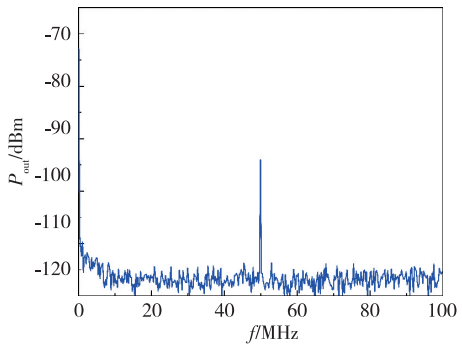


图7 窄线宽光纤激光器0～100 MHz频谱

从图7可以看出，在0～100 MHz的范围内，除了声光频移器的50 MHz频移信号外没有其他的拍频信号，表明激光器处于单纵模状态。当泵浦功率为200 mW时，窄线宽光纤激光器的线宽如图8所示，20 dB线宽为754 Hz。

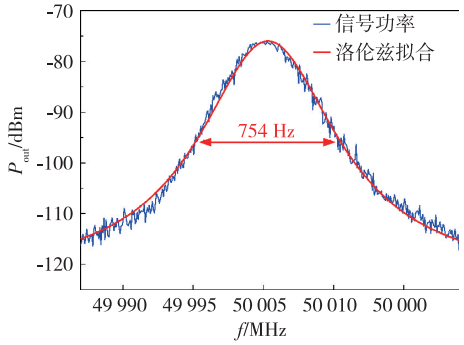


图 8　窄线宽光纤激光器线

当采用延时自外差法进行线宽测量时，延迟光纤的长度越长，可以有效避免光电流谱中附加的周期性波动，使测量的激光线宽更为准确。但在实际应用中，过长的延迟光纤长度会增加 1/f 噪声并导致光功率的过度损耗。为使测量的线宽更准确，使用拍频谱峰值下降 20 dB 处的带宽来计算激光器的线宽，窄线宽激光器的洛伦兹线宽就等于拍频谱 20 dB 线宽的 $1/2\sqrt{99}$[18]。从图 8 中可以看出，低于最大值 20 dB 处的线宽为 15.05 kHz，即激光器的实际线宽为 754 Hz。

在该实验条件下，实验测量了该激光器在室温条件下，1 h 内、每隔 10 min 的线宽变化，如图 9 所示。可以看出，该激光器在 1 h 内的频谱线宽基本没有变化，平均线宽为 755.4 Hz。

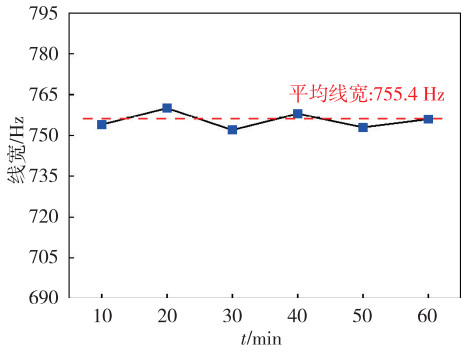


图 9　窄线宽光纤激光器 1 h 的线宽图

为比较复合腔及可饱和吸收体对压窄线宽及抑制跳模的影响，在分别去掉复合腔及可饱和吸收体的情况下做了对比实验。在如图 1 所示的窄线宽光纤激光器结构中，去掉 CO-1 组成的子腔，得到未加复合腔，只保留 FBG 和可饱和吸收体滤波的光纤激光器。图 10 为仅饱和吸收体的激光器输出频谱。在频谱范围 0～100 MHz 内，存在 30 个以上的混频信号，此时激光器是多纵模工作状态。在声光频移器的频移信号 50 MHz 处的激光线宽为 1.279 kHz，如图 10 中子图所示。

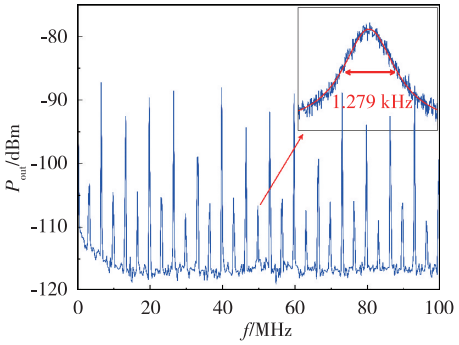


图 10　仅饱和吸收体的窄线宽激光器频谱

在如图 1 所示的窄线宽光纤激光器结构中，去掉作为可饱和吸收体的未泵浦掺铒光纤，得到无饱和吸收体仅复合腔滤波的激光频谱，如图 11 所示。可见，除去 50 MHz 的声光频移器的频移信号外，还有两个的纵模信号，此时激光器仍处于多纵模状态。50 MHz 处的信号线宽为 4.37 kHz。

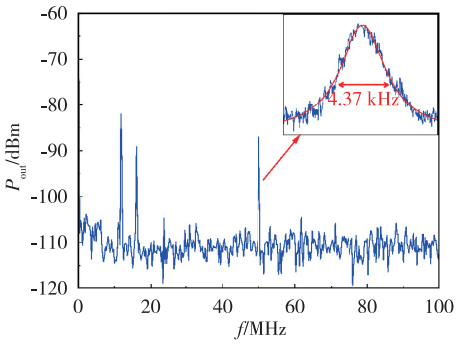


图 11　仅复合腔的窄线宽激光器频谱图

由对比实验可知，加入复合腔可以有效扩大自由光谱范围，减少腔内的纵模数量，加入饱和吸收体可以压窄线宽、避免跳模现象的发生。在可饱和吸收体、复合腔和 FBG 的共同滤波作用下，可以实现环形器掺铒光纤激光器的窄线宽输出。

4　结论

本文搭建了一个基于复合腔与可饱和吸收体的 1 550 nm 窄线宽光纤激光器，复合腔增大了腔内纵模间隔，饱和吸收体减小了增益带宽。在泵浦功率取 70～200 mW 范围，均可实现窄线宽激光输出，中心波长为 1 550.15 nm，光学信噪比为 64.2 dB，最大输出功率为 8 mW。通过延时自外差法测量的 20 dB 线宽为 754 Hz，1 h 的平均线宽为 755.4 Hz，1 h 内的中心波长偏移小于 0.01 nm，信噪比波动小于 0.568 dB。

参考文献：

[1] Ran S, Hou J, Li J, et al. The introduction of special issue on technology and application of advanced mid-infrared lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101000.

[2] Wang Y Y, Wang C, Zhao S W, et al. Distributed feedback fiber laser-based broadband air acoustic sensor using PI film and PEEK shell structure[J]. Optical Review, 2022, 29(2): 118-125.

[3] Murray J B, Cerjan A, Redding B. Distributed Brillouin fiber laser sensor[J]. Optica, 2022, 9(1): 80-87.

[4] Qin Q, Yan F, Liu Y, et al. Twelve-wavelength-switchable thulium-doped fiber laser with a multimode fiber Bragg grating[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(3): 7100710.

[5] 刘芳华，贺 岩，罗 远，等. 基于光子计数激光雷达的运动小目标测距测速系统[J]. 中国激光，2021，48(13)：1310001.
Liu Fanghua, He Yan, Luo Yuan, et al. Moving target distance and velocity measurement system based on photo-counting lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1310001.

[6] Oertel S, Eggert M, Gutsmuths C, et al. Validation of three-component wind lidar sensor for traceable highly resolved wind vector measurements[J]. Journal of Sensors and Sensor Systems, 2019, 8(1): 9-17.

[7] Dong Y, Zhu Z, Tian X, et al. Frequency-modulated continuous-wave LIDAR and 3D imaging by using linear frequency modulation based on injection locking[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(8): 2275-2280.

[8] 吴 磊. 相干光通信系统中光源的研究[D]. 武汉：华中科技大学，2011.
Wu Lei. The research on the laser source for coherentoptical communication system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

[9] 白 冰. 光纤传输系统中光纤激光器关键技术研究[D]. 长春：吉林大学，2013.
Bai Bing. Research on key technology of fiber lasers in optical fiber transmission systems[D]. Changchun: Jilin University, 2013.

[10] 胡智勇. 宽带光纤放大器技术与光通信光源技术[D]. 天津：天津大学，2004.
Hu Zhiyong. Broad-band fiber amplifiers and light sources for optical communication [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.

[11] Shi W, Schulzgen A, Amezcua R, et al. Fiber lasers and their applications: introduction[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(3): FLA1.

[12] 蔡冰涛，杨文奎，魏一兵. 基于FBG选频的低噪声窄线宽单频光纤激光器[J]. 光纤与电缆及其应用技术，2012(1)：14-17.
Cai Bingtao, Yang Wenkui, Wei Yibing. Low noise narrow-linewidth single-frequency fiber laser based on frequency decided by fiber Bragg grating[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2012(1): 14-17.

[13] 白 燕，延凤平，冯 亭，等. 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[J]. 中国激光，2019，46(1)：64-72.
Bai Yan, Yan Fengping, Feng Ting, et al. Ultra-narrow-linewidth fiber laser in 2 μm band using saturable absorber based on PM-TDF[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 64-72.

[14] 高 娇，延凤平，冯 亭，等. 基于复合双环腔及饱和吸收体的单纵模窄线宽掺铥光纤激光器[J]. 中国激光，2023，50(23)：2301002.
Gao Jiao, Yan Fengping, Feng Ting, et al. Single longitudinal mode narrow linewidth thulium-doped fiber laser based on compound double-ring cavity and saturable absorber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(23): 2301002.

[15] Huang J, Yang F, Zhang Y, et al. Stable tunable narrow-linewidth fiber laser based on random distributed feedback[J]. Optical Fiber Technology, 2023, 81: 103576.

[16] 王大量，王翠云，徐连宇，等. 光纤激光器共腔法纵模选择技术[J]. 红外与激光工程，2011，40(6)：1044-1048.
Wang Daliang, Wang Cuiyun, Xu Lianyu, et al. Fiber laser longitudinal mode selection using common resonant cavity[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(6): 1044-1048.

[17] 陈方元. 基于受激瑞利散射的窄线宽光纤激光器实验研究[D]. 重庆：重庆大学，2013.
Chen Fangyuan. Experimental study on the narrow linewidth fiber ring laser based on stimulate rayleigh scanttering[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.

[18] 唐丽华. 基于多光纤环的单纵模光纤激光器研究[D]. 北京：北京邮电大学，2020.
Tang Lihua. Research on single longitudinal mode fiber laser based on multiple fiber rings[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.

作者简介：

薛明昆(2000—)，男，吉林省通化市人，硕士研究生，主要研究方向为窄线宽光纤激光器；

高兰兰(1975—)女，河北省邯郸市人，博士，教授，主要从事激光及其物质的相互作用方面的研究。