

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461. 2013.03.006

一种基于 FBG 宽调谐的复合环形腔单纵模 光纤激光器

田允允¹, 冯素娟¹, 马 龔¹, 毛庆和^{1,2}

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031 ;
2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230022)

摘 要: 报道了一种宽调谐单纵模光纤激光器。该光纤激光器采用环形器确保腔内激光的单向传输, 可以有效消除空间烧孔效应; 采用复合腔的 Vernier 效应选取单个纵模; 利用未泵浦掺杂光纤的可饱和吸收效应, 有效抑制光纤激光器的跳模现象; 同时, 利用自行研制的光纤光栅调谐装置, 调谐激光器振荡波长。测试结果表明, 该单纵模光纤激光器输出激光的线宽为 0.7 kHz, 功率为 10 mW, 波长调谐范围为 20 nm, 且调谐过程中始终保持单纵模特性。

关键词: 激光技术; 单纵模; 复合腔; 光纤布拉格光栅

中图分类号: TN424 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5461(2013)03-0288-05

A wide-tunable single-longitudinal-mode fiber laser based on compound ring cavity and tunable fiber Bragg grating

TIAN Yun-yun¹, FENG Su-juan¹, MA Yan¹, MAO Qing-he^{1,2}

(1 Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China ;
2 University of Science and Technology of China, Hefei 230022, China)

Abstract: A wide-tunable single-longitudinal-mode fiber laser based on ring cavity structure was presented. The unidirectional propagation of light controlled by the circulator in the ring cavity can eliminate the spatial hole burning effect effectively. For realizing single-longitudinal-mode operation in fiber laser, the compound cavities designed based on Vernier effect were adopted. For suppressing the mode hopping, the saturable absorber effect of an unpumped doped fiber was considered. Meanwhile, the fiber Bragg grating filter with a widely tuning range was used to select oscillation wavelength. With these configurations, a stable single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser with 10 mW output power, 0.7 kHz linewidth and 20 nm tuning range was achieved.

Key words: laser techniques; single-longitudinal-mode; compound cavity; fiber Bragg grating

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划)(2011AA030203)、安徽省重点实验室建设项目和中科院创新基金 (CXJJ-10-M54) 资助项目

作者简介: 田允允 (1989 -), 女, 研究生, 主要从事激光技术方面的研究。 **E-mail:** fiber_optics@aiofm.ac.cn

导师简介: 毛庆和 (1963 -), 研究员, 博士生导师, 主要从事纤维光学, 激光物理与激光器件等方面的研究。

E-mail: mqinghe@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2012-04-30; **修改日期:** 2012-05-08

1 引言

单频光纤激光器在相干光通信、光传感、以及高精度光谱等方面有重要的应用^[1,2]。单频光纤激光器分为分布反馈 (Distributed feedback Bragg, DFB)^[3]、分布布拉格反射 (Distributed Bragg reflection, DBR)^[4]、线性腔和环形腔等多种结构方案^[5], 其中 DBR 与 DFB 光纤激光器为短腔结构, 利于实现单纵模激光振荡, 但输出功率相对较低; 线形腔光纤激光器因存在驻波烧孔效应不利于单纵模振荡, 而环形腔光纤激光器则克服了驻波烧孔效应, 利于单纵模运转, 且还可通过增加掺杂光纤长度来提高输出功率, 是单频光纤激光器的一个重要实现方案。但是, 环形腔单频光纤激光器的腔长相对较长, 纵模间隔小, 受外界温度、声波、振动等噪声因素的干扰, 同时, 稀土掺杂光纤具有一定的非均匀加宽效应, 且增益谱局域平坦性好, 也易导致跳模发生。为此, 人们已设计出了不同结构的辅腔, 包括带阻型与带通型, 并利用辅腔的类 F-P 腔效应与复合腔 Vernier 效应^[6,7] 扩大纵模间隔、抑制高频光波噪声, 实现了环形腔光纤激光器的单纵模输出。另一方面, 随着光纤布拉格光栅 (FBG)^[8] 宽带调谐技术的发展, 人们已将可调 FBG 用作光纤激光器的波长调谐器件以实现光纤激光的宽带调谐功能^[9,10], 但是, 如何利用可调 FBG 实现单纵模单频光纤激光器的宽调谐输出依然值得深入研究。

本文报道一种基于环形腔的宽调谐单纵模掺铒光纤激光器, 该光纤激光器采用带通与带阻型辅腔构成复合环形腔结构, 获得了线宽为 0.7 kHz 单纵模激光输出。利用可调 FBG 作为选频器件, 实现了光纤激光器的宽带调谐, 调谐范围达 20 nm, 且在整个调谐过程中依然保持单纵模输出特性。

2 结构方案

图 1 为设计的宽调谐复合环形腔单纵模光纤激光器的结构示意图。所用掺铒光纤 (EDF1) 在 975 nm 处的吸收系数为 21.6 dB/m, 长度为 4 m, 该段 EDF 由输出功率 220 mW、中心波长 975 nm 的激光二极管 (LD) 经波分复用器 (WDM) 进行泵浦。采用耦合系数为 50:50 的耦合器 (OC1) 构成带阻型辅腔 1, 耦合系数均为 90:10 的耦合器 OC2 和 OC3 构成带通型辅腔 2, 再利用辅腔 1 与辅腔 2 对主腔构成复合环形腔结构, 利用 Vernier 效应选取出该复合环形腔光纤激光器的单个纵模。为克服驻波烧孔效应, 主腔内插入了环行器 (CIR), 以保证激光器腔内的单向传输, 同时, CIR 公共臂 2 与偏振控制器 (PC)、6 m 未泵浦的低浓度 EDF2 以及可调 FBG 相连。实验中, 采用实验室自行研制的基于轴向压缩的可调光纤光栅, 其带宽小于 0.2 nm, 在 1560 nm 附近的调谐宽度达 20 nm。40:60 光纤耦合器 (OC4) 的 40% 端口用作光纤激光器的输出端。

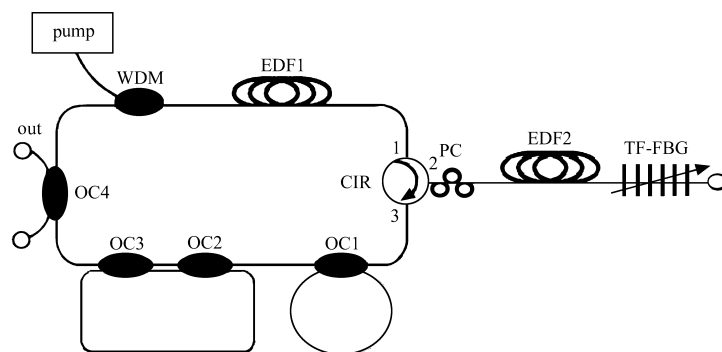


Fig.1 Schematic diagram of the single-longitudinal-mode fiber laser with ring cavity

图 1 所示光纤激光器的单纵模运转主要基于三个机制。第一, 通过在主腔内插入 CIR 有效避免了

EDF1 的空间烧孔效应; 第二, 考虑到因主腔总长度约 20 m, 其 FSR 约为 10 MHz, 从而极易跳模, 为此, 辅腔 1 和辅腔 2 分别设计成带阻和带通型, 并且, 将腔长分别设计为 0.4 m 和 0.6 m, 对应的 FSR 分别为 500 MHz 和 330 MHz, 这样, 由 Vernier 效应, 由主腔和两个辅腔所构成复合腔的 FSR 增大至 16.5 GHz, 从而有利于获得单纵模振荡; 第三, 通过调整 PC, 使 EDF2 内双向传输的光波在 EDF2 内形成可饱和吸收光栅, 从而在跳模刚发生时就进行有效抑制^[11], 利于提高单纵模运转的稳定性, 且对外界环境变化影响也有抵御能力。

在对图 1 所示的光纤激光器测试中, 输出光谱采用光谱分析仪 (型号为 Agilent 86140B, 最小分辨率为 0.06 nm) 来进行测量, 输出功率由 EXFO FPM300 功率计测量, 激光线宽则由实验室自行搭建的基于马赫-曾德光纤干涉仪和频谱仪 (Agilent E4402B, 最小分辨率为 10 Hz) 构成的零拍法激光线宽测量系统检测, 马赫-曾德光纤干涉仪由 2 只 3 dB 光纤耦合器构成, 所用光纤延迟线为 50 km。

3 结果和讨论

当泵浦光功率达 10 mW 时, 光纤激光器开始起振, 随着泵浦光的逐渐提升, 输出激光的光谱逐渐稳定。图 2 为光谱分析仪测得一段时间内可调 FBG 在自由状态下激光器的输出光谱, 可见, 输出激光的中心波长为 1559.968 nm, 因光谱分析仪分辨率的限制 (0.06 nm), 测得的输出激光线宽约为 0.058 nm。在连续 1.5 h 的观测时间范围内, 输出激光中心波长的漂移量小于 0.05 nm, 功率的波动范围小于输出激光功率的 0.4%。

图 3 为利用零拍法激光线宽测量系统测得的拍频信号的频谱图, 其中图 3(a) 和 (b) 分别为 0 ~ 1.5 GHz 和 0 ~ 10 kHz 频率范围内的拍频信号频谱特性。由图 3(a) 可见, 除了零频附近的拍频信号外, 经光纤干涉仪传输后的激光拍频信号在 0 ~ 1.5 GHz 内均极低, 边模抑制比 (SMSR) 大于 60 dB。并且, 实际测量中, 经 1 h 观察, 该频率范围内的拍频信号也未出现瞬态峰, 表明光纤激光器无跳模现象, 保持单纵模运转。由图 3(b) 可知, 输出激光的线宽约为 0.7 kHz。

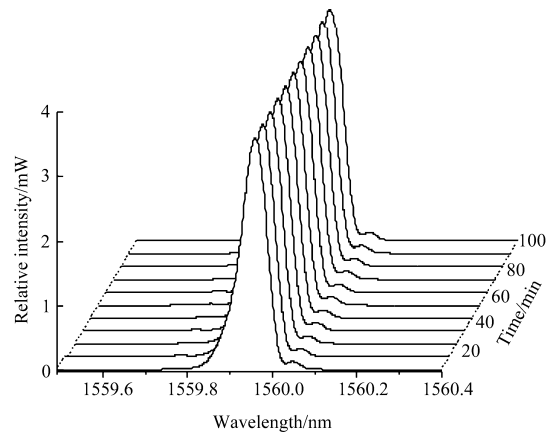


Fig.2 Measured output spectra of the fiber laser at different times

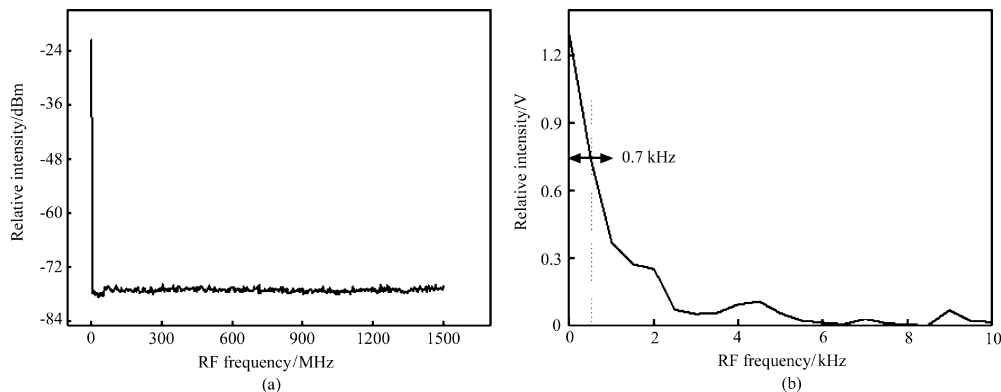


Fig.3 Measured beating frequency properties of the output for the fiber laser (a) 0 ~ 1.5 GHz frequency range, (b) 0 ~ 10 kHz frequency range

图 4(a) 和 (b) 分别为实验测得的光纤激光器经可调 FBG 调谐时的输出光谱和拍频信号频谱特性。由图可见, 该光纤激光器的中心波长可在 1558 ~ 1578 nm 范围调谐。并且, 当光纤激光器调谐至不同波长处, SMSR 均大于 60 dB, 并均可保持单纵模运转。同样, 实际测量时, 在每种调谐状态下对拍频信号的频谱均进行了 1 h 的观察, 未发现瞬态拍频谱峰, 表明无多纵模或跳模发生。由图 4(b) 可见, 调谐过程中, 由于受外界环境的影响, 激光线宽发生改变, 但改变量小于 0.1 kHz。以上这种宽带调谐输出时依然能保持单纵模特性的原因是该光纤激光器的选模特性并不受 FBG 中心波长的影响, 同时, 掺铒光纤具有较宽的增益谱特性^[11], 且构成光纤激光器所用的光纤无源器件均具有宽带特性, 最终使得该光纤激光器在宽调谐的同时保持了单纵模输出。

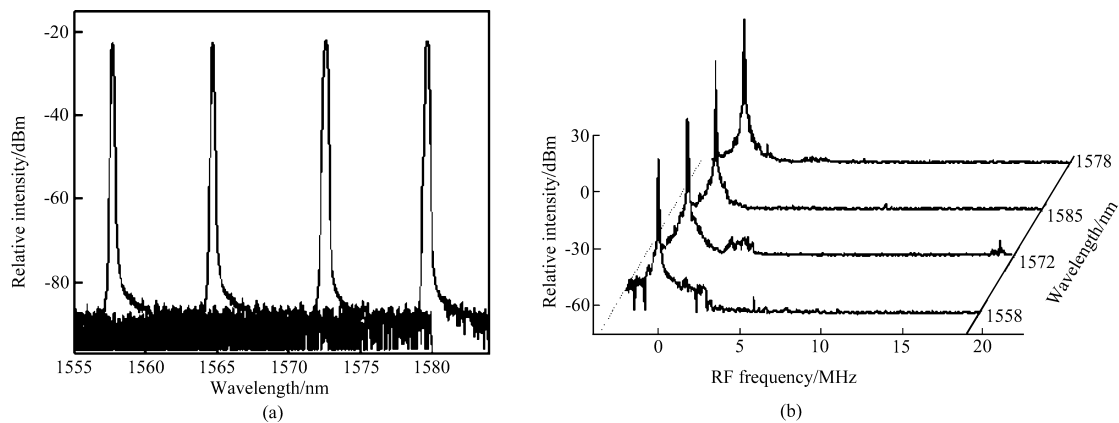


Fig.4 Measured tuning properties of the single-longitudinal-mode fiber laser (a) output optical spectra, (b) frequency spectra of beating signal

图 5 为 160 mW 泵浦光功率下单纵模光纤激光器的调谐输出功率特性。可见, 在波长 1568 ~ 1578 nm 间 10 nm 调谐范围内, 单纵模光纤激光器输出功率基本不变, 当激光输出波长调谐到小于 1568 nm 时, 输出功率下降, 造成这种现象的原因可能源于可调谐 FBG 在调谐量增加时其周期改变量也相应增大, 使得 FBG 反射率下降, 进而造成了激光器输出功率的下降。

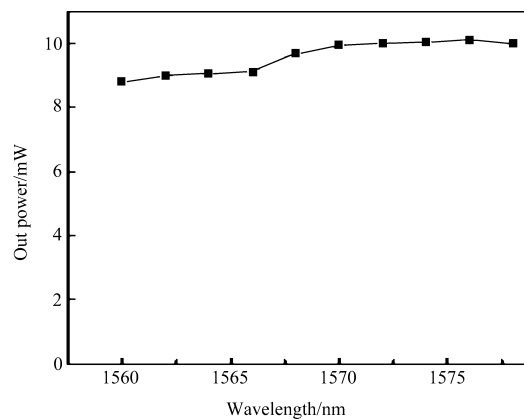


Fig.5 Power fluctuation versus the tuning wavelength of the single-longitudinal-mode fiber laser

4 结 论

本文采用复合环形腔结构和波长可调光纤光栅构建了宽调谐单纵模光纤激光器。此激光器通过环形器消除环形腔结构的空腔烧孔效应, 利用带通和带阻型辅腔与主环形腔构成复合腔并由复合腔的 Vernier 效

应进行选模, 实现光纤激光器的单模运转, 同时利用未泵浦掺杂光纤的饱和吸收效应, 有效抑制光纤激光器的跳模现象, 提高单纵模激光器的稳定性, 最终获得了线宽 0.7 kHz, 功率 10 mW 的单纵模激光输出。并且, 利用自行研制的光纤光栅宽调谐装置, 实现了单纵模光纤激光器在 1558 ~ 1578 nm 波长范围内的调谐, 调谐范围达 20 nm, 调谐过程中保持单纵模运转, 激光线宽改变量小于 0.1 kHz。

参考文献:

- [1] Voraberger H, Ribitsch V, Janotta M, *et al.* Application of mid-infrared spectroscopy: Measuring hydrogen peroxide concentrations in bleaching baths [J]. *Appl. Spectr.*, 2003, 57(5): 574-579.
- [2] Lorusso G F, Leunissen P, Ercken M, *et al.* Spectral analysis of line width roughness and its application to immersion lithography [C]. *SPIE*, 2006, 5(3): 033003.
- [3] Babin S A, Churkin D V, Ismagulov A E. Single frequency single polarization DFB fiber laser [J]. *Las. Phys. Lett.*, 2007, 432(6): 428-432.
- [4] Guo Tuan, Allan C L, Liu Weisheng, *et al.* Beat-frequency adjustable Er^{3+} -doped DBR fiber laser for ultrasound detecton [J]. *Opt. Expr.*, 2011, 19(3): 2485-2492.
- [5] Chou S Y, Yeh C H, Chi S. Unitizations of double-ring structure and erbium-doped waveguide amplifier for stable and tunable fiber laser [J]. *Las. Phys. Lett.*, 2007, 4(5): 382-384.
- [6] Yang X X, Zhan L, Shen Q S, *et al.* High-power single-longitudinal-mode fiber laser with a ring Fabry-Pérot resonator and a saturable absorber [J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 2008, 20(11): 879-881.
- [7] Yeh C H, Huang T T, Chien H C. Tunable S-band erbium-doped triple-ring laser with single-longitudinal-mode operation [J]. *Opt. Expr.*, 2007, 15(2): 382-386.
- [8] Buric M, Falk J, *et al.* Piezo-electric tunable Bragg grating diode laser for chemical sensing using wavelength modulation spectroscopy [J]. *Opt. Expr.*, 2006, 14(6): 2178-2183.
- [9] Yeh C H, Lee C C, Chi S. A tunable S-band erbium-doped fiber ring laser [J]. *IEEE Photon. Tech.*, 2003, 15: 1053-1054.
- [10] Song Y W, Havstad S A, Starodubov D. 40-nm-wide tunable fiber ring laser with single-mode operation using a highly stretchable FBG [J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 2001, 13(11): 1167-1169.
- [11] Dyroff C, Weibring P, Fried A, *et al.* Stark-enhanced diode laser spectroscopy of formaldehyde using a modified Herriott-type multipass cell [J]. *Appl. Phys. B*, 2007, 88: 117-123.