

文章编号: 0258-7025(2005)04-0441-04

一种新型结构的单纵模光纤激光器

杨 敬, 瞿荣辉, 孙国勇, 韩秀友, 庞拂飞, 耿健新, 蔡海文, 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 单纵模掺铒光纤激光器在光通信和光传感等方面有着广泛的应用前景。设计了一种新型的光纤激光器, 在光纤环结构中嵌入未抽运的掺铒光纤作为可饱和吸收体以抑制多纵模, 用光纤环谐振腔作为滤波器抑制拍频噪声, 用光纤光栅作为波长选择器件, 最终得到了单纵模输出并消除了拍频噪声。使用零拍法测量其线宽小于频谱仪的低频极限 5 kHz。实验结果证明了可饱和吸收体和光纤环的功能。

关键词 激光器; 单纵模掺铒光纤激光器; 线宽; 光纤环

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

A Novel Single Longitudinal Mode Fiber Laser

YANG Jing, QU Rong-hui, SUN Guo-yong, HAN Xiu-you, PANG Fu-fei,
GENG Jian-xin, CAI Hai-wen, FANG Zu-jie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Single-longitudinal-mode (SLM) fiber lasers are attractive for optical communications and optical sensors. The fiber laser usually operates in multimode and beating noises are a serious problem due to beat between laser mode and amplified spontaneous emission mode. A novel Er-doped single-mode fiber ring laser was demonstrated. In this laser, an unpumped Er-doped fiber was served as a saturable absorber to ensure the SLM operation, and a fiber ring resonator filter was used to suppress the beating noise. With a fiber Bragg grating (FBG) as a selective wavelength component, single mode output without beating noise is obtained experimentally. Measured linewidth is narrower than 5 kHz by using a homodyne setup, which is limited by the radio-frequency (RF) analyzer. The functions of saturable absorber and fiber ring resonator are proved.

Key words lasers; single-longitudinal-mode fiber lasers; linewidth; fiber ring

1 引 言

光纤激光器具有与光纤系统天然的兼容性、输出线宽窄和宽范围调谐等优点, 使其在光纤通信、光纤传感等方面具有很好的应用前景。很多实际应用需要强度稳定的单频光源, 但是由于掺铒光纤激光器需要较长的腔长(数米到数十米), 导致纵模间隔很窄, 在铒离子的增益谱范围内纵模数极多, 使得强度稳定的单频输出难以实现。

在理论上, 如果采用单向运转的环形腔结构则可以避免空间烧孔效应, 模式竞争机制最终将使激光器运转在单模。但由于纵模间隔极窄导致模式间增益和损耗差别极小, 即使使用窄带滤波器, 如光纤布拉格光栅(FBG), 光纤激光器一般也运转在随机

的多纵模状态。一个显而易见的解决方案是缩短腔长, 比如使用双掺杂的增益介质可使有源区缩短到 1 mm 的情况下仍然有激光输出, 这时由于均匀展宽效应会比较容易获得单纵模输出, 但是这样会降低输出功率, 并且减小其调谐范围($< 5 \text{ nm}$)^[1]。用可饱和吸收体实现单纵模输出, 结构简单且不影响激光器在调谐方面的性能, 是一个很好的解决方案^[2~4]。同时, 相对于激光器的纵模间隔, 很多光学滤波器的带宽都会高几个量级, 导致腔内符合纵模条件的模式数目很大, 即使只有单纵模最终形成激光振荡, 其他相邻纵模也能在腔内循环, 最终形成较强而且稳定的放大自发辐射(ASE)光, 放大自发辐射光场与振荡的激光相差拍, 会形成拍频噪声^[5]。

收稿日期: 2004-07-05; 收到修改稿日期: 2004-11-08

作者简介: 杨 敬(1979—), 男, 湖北十堰人, 中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: jyang@mail.siom.ac.cn

拍频噪声使激光输出强度随时间抖动,因此在很多应用中必须加以抑制。在光纤激光器中使用半导体光放大器可以抑制拍频噪声,主要原理是利用半导体光放大器的高通滤波器效应^[5];也有使用复杂的控制反馈电路抑制这种强度的抖动^[6]。

本文针对以上问题,设计了一个环形掺铒光纤激光器,通过使用光纤环滤波器抑制拍频噪声,使用可饱和吸收体得到单纵模输出,得到了好的结果。

2 基本原理及结构

如图 1,实验中的光纤激光器是基于环形器的单向运转的环形腔结构,使用掺铒光纤作为增益介质,用 980 nm 半导体激光器抽运,环形器的 2 端口接反射率为 77% 的光纤布拉格光栅,为了简化整个腔的结构,用光纤布拉格光栅的透射作为激光输出。2 端口光纤布拉格光栅前接入光纤环,以提供抑制拍频噪声的机制,3 端口接入一个嵌入掺铒光纤的 Sagnac 环,作为可饱和吸收装置,以抑制多纵模。

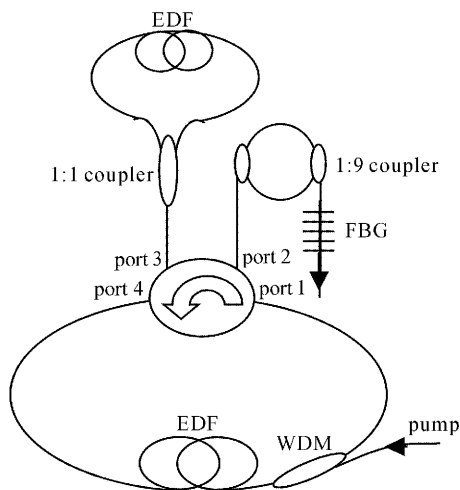


图 1 使用可饱和吸收体和光纤环的光纤激光器
Fig. 1 Fiber laser using saturable absorber and FBG along with a fiber ring resonator

用可饱和吸收体实现光纤激光器的单纵模输出,它的基本原理是:未被抽运的掺铒光纤对信号光存在吸收作用,当信号光构成驻波时,由于波腹和波节处光强不同,吸收饱和效应会在掺铒光纤中形成吸收系数调制光栅,即吸收系数在掺铒光纤上周期性变化。这个光栅能够抑制除形成驻波的纵模以外的其他纵模,从而抑制了激光器多纵模振荡。将掺铒光纤置于光纤 Sagnac 环中,输入光被 3 dB 耦合器分成强度相等、传播方向相反的两束光,从而在掺铒

光纤中形成驻波,达到可饱和吸收的目的。两束光经过掺铒光纤后在输入端口干涉相长然后输出。

近 20 年来光纤环及其组合的文献报道很多^[7,8],在波导的研究中也有类似结构。光纤环的滤波特性类似于法布里-珀罗干涉仪,即它的透射谱中符合谐振条件的频率处存在峰值,谐振条件为 $\beta L = 2m\pi$, m 为整数, L 为环的周长, β 为谐振光在光纤中的波矢大小。由于光纤环的长度比光纤激光器的腔长小一个量级,从而增加了自由光谱范围,减少了可以振荡的纵模数,从而抑制了拍频噪声。实验采用的光纤环是用两个 1:9 耦合器熔接而成的,输入光 10% 耦合到环内。不计损耗时,理论计算表明它的精细度可以达到 14.87。环的周长大约为 5 m,对应的自由谱区宽度约为 40 MHz,尽管光纤环仍然较长,但从实验结果来看已经收到了明显的效果。在起到选频作用的前提下保持光纤环较长的长度是有好处的,这样在对激光器进行调谐时可以使调谐频率相对来说较为连续。

当使用了以上两个器件以后,得到了消除拍频噪声的单纵模输出。实验中尝试了不加入和有选择地加入这两个器件,对它们的输出谱进行对比,证明了这两个器件起到的作用。

3 实 验

当图 1 所示的光纤激光器去掉光纤环和可饱和吸收体,即仅在环形器 2 端口使用光纤布拉格光栅作为波长选择器件时,为一个基本的分布式布拉格反射 (DBR) 激光器。将输出光经过光电转换输入频谱仪,得到图 2。图中频率范围为 200 MHz ($-100 \sim 100$ MHz),最大相对强度为 80 dB。可以看出零频位

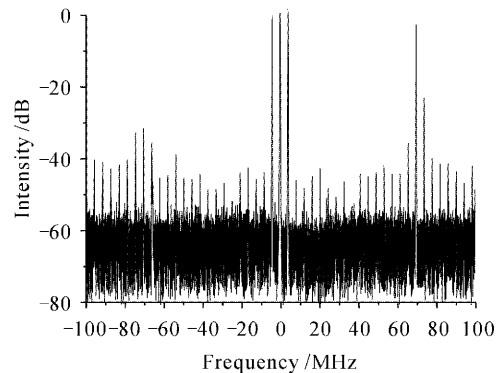


图 2 在仅使用 FBG 作为波长选择器件的情况下频谱仪的输出情况

Fig. 2 RF spectrum with a span of 200 MHz of the output from the laser only using FBG as a wavelength selector

置两侧存在高达70 dB以上的信号,这说明激光器运转在多纵模状态,相互差拍。这些信号是不稳定的,说明了多纵模运转的不稳定性。还存在大量等间距的30~40 dB的信号,这就是由激光与符合纵模间隔的放大自发辐射噪声相差拍形成的拍频噪声^[1]。这一点可以从它们的频率间隔得到验证,从图中可以看出差拍信号之间的间距大约为4.16 MHz,理论上这一间距等于纵模间隔,对应腔长48 m,这与实验装置的实际情况基本相符。这里的拍频噪声形成的原因是,光纤光栅反射谱范围内允许很多纵模存在,虽然并不是所有的纵模都能形成激光振荡,但是都能在腔内循环,其中一部分形成激光,另外的形成较强的放大自发辐射光,与激光差拍形成拍频噪声。

当图1所示的光纤激光器仅在2端口使用光纤布拉格光栅和光纤环,而不使用可饱和吸收体时,从频谱仪观测输出如图3(a)。零频位置以外仍然存在强度较高的差拍信号,表明激光器仍然处于多纵模运转状态。差拍信号大约位于160 MHz处,为光纤环纵模间隔40 MHz的整数倍,验证了前面理论分析的正确性。长时间的实验观察表明,虽然同为多

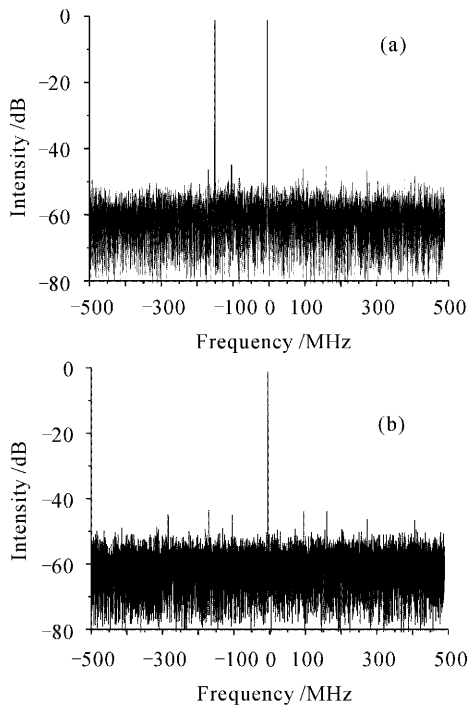


图3 (a) FBG结合光纤环使用时激光器的输出在频谱仪上的显示,频率范围为1 GHz,(b)频谱仪自身噪声,频率范围为1 GHz

Fig.3 (a) RF spectrum with a span of 1 GHz of the output from the laser using FBG along with a fiber ring resonator; (b) Noise of the RF spectrum analyzer itself with a span of 1 GHz

纵模运转,这时的情况与先前有所不同。表现为零频以外的差拍信号仍然存在但数目已经大大减少,而且不会如图2那样出现在零频附近的位置。这是因为光纤环增大了自由光谱范围,减少了可能得到振荡的多纵模数目。这表明光纤环也能在一定程度上抑制多纵模,倘若环的周长足够短以至于纵模间隔超过激光振荡谱的范围则可以实现单纵模,否则不能完全抑制多纵模。同时还发现,原本存在的拍频噪声几乎完全被抑制,这主要得益于光纤环有自己的纵模模式,与整个谐振腔的纵模模式形成了游标效应,对本来大量存在的放大自发辐射纵模形成了很大的插入损耗。图中仅存的几条短竖线并不是拍频噪声的表现而是频谱仪自身噪声,这是为了更好地观察拍频噪声,频谱仪的参考电平设置得很低,因此频谱仪自身的噪声也被显示出来,可以从频谱仪没有信号输入时的屏幕输出看出这一点,如图3(b)。图中零频处出现很高的竖线,是因为实验中使用的频谱仪即使在没有信号输入的情况下,在零频处也总是存在一个具有一定频谱宽度的峰,这个峰的宽度往往决定了频谱仪可以测量的最低频率。

当进一步加入可饱和吸收体后,整个光纤激光器的结构如图1,通过光谱仪观测激光输出如图4,可见在1555.54 nm附近有边模抑制比达到50 dB的激光输出。考虑到是用光纤布拉格光栅的透射作为输出,引入了光纤布拉格光栅反射谱以外的自发辐射光,所以腔内激光的边模抑制比应当大于50 dB,当在腔内使用耦合器输出后,得到了边模抑制比大于60 dB的激光输出。进一步用频谱仪观测,以便与前面的实验结果作比较,激光输出谱如图5。可以看出此图和图3(b)很相像。这是因为当激光只有单纵模输入时,不会有不同纵模相互差拍形成的差拍信号,而拍频噪声也已经被环抑制,所以形成了这

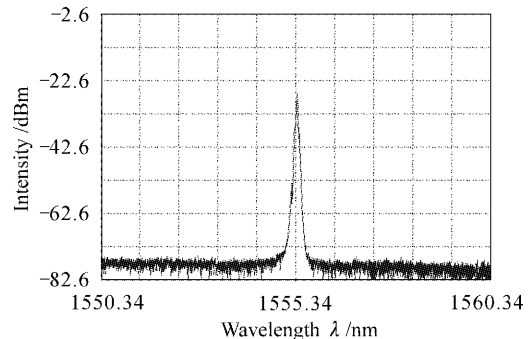


图4 使用可饱和吸收体和光纤环的激光器的输出光谱
Fig.4 Output spectrum of the laser using saturable absorber and fiber ring resonator

种效果。单模激光的线宽可以用零拍法测量。将频谱仪的频率范围设置为100 kHz,它的输出如图6,由于实验中使用的频谱仪在5 kHz以下的频率范围有很强一个噪声峰值(即图6中零频位置的尖峰),所以不能正确显示5 kHz以下的信号。对图像进行平滑处理后可以看出3 dB带宽在5 kHz以下。

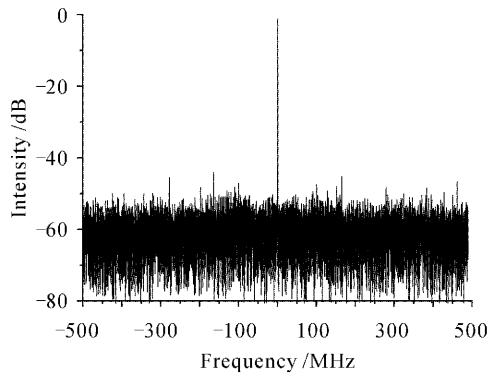


图5 使用可饱和吸收体和光纤环的激光器的输出在频谱仪上的显示,频率范围为1 GHz

Fig.5 RF spectrum of the laser output from the laser using saturable absorber and fiber ring resonator, with a span of 1 GHz

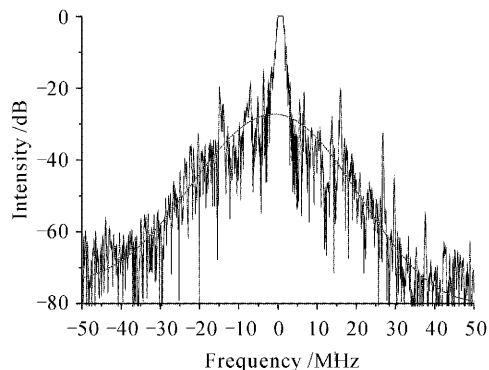


图6 用零拍法做线宽测量。频率范围为100 kHz。被测线宽在5 kHz以下

Fig.6 Homodyne measurement of laser linewidth. The measured linewidth is narrower than 5 kHz, with a span of 100 kHz

4 结 论

光纤激光器因为纵模间隔窄,纵模数多,导致了随机的多纵模运转,并伴随着拍频噪声使输出强度不稳定。使用光纤环扩大纵模间隔,减少能够获得振荡的纵模数,抑制拍频噪声;通过可饱和吸收体的自写入光栅效应抑制多纵模,在实验中收到了良好的效果,得到了单纵模、消除拍频噪声的激光输出。这种单模光纤激光器在传感方面有很好的应用前景^[9]。

参 考 文 献

- 1 Kevin Hsu, Calvin M. Miller, J. Thomas Kringlebotn *et al.*. Single-mode tunable erbium: ytterbium fiber Fabry-Perot microlaser [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(12): 886~888
- 2 Y. Cheng, J. T. Kringlebotn, W. H. Loh *et al.*. Stable single-frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 875~877
- 3 Yu Benli, Qian Jingren, Luo Jiatong *et al.*. Stable single frequency fiber ring laser with linewidth smaller than 0.5 kHz [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 2001, **18**(4): 345~347
俞本立,钱景仁,罗家童等. 线宽小于0.5 kHz稳态的单频光纤环形腔激光器 [J]. *量子电子学*, 2001, **18**(4): 345~347
- 4 Chen Bai, Fan Wei, Li Xuechun *et al.*. Single frequency Yb³⁺-doped fiber laser operating at 1053 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(7): 583~585
陈 柏,范 薇,李学春等. 运行于1053 nm的单纵模掺Yb光纤激光器研究 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(7): 583~585
- 5 Lei Xu, Ivan Glesk, Darren Rand *et al.*. Suppression of beating noise of narrow-linewidth erbium-doped fiber ring lasers by use of a semiconductor optical amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(10): 780~782
- 6 G. de Geronimo, S. Taccheo, P. Laporta. Optoelectronic feedback control for intensity noise suppression in a codoped erbium-ytterbium glass laser [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(15): 1336~1337
- 7 L. F. Stokes, M. Chodorow, H. J. Shaw. All-single-mode fiber resonator [J]. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(6): 288~290
- 8 A. Yariv. Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(4): 321~322
- 9 Huang Wencai, Ming Hai, Chen Xiyao *et al.*. Experimental studies of single frequency DBR fiber laser and temperature sensing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 695~697
黄文财,明 海,陈曦曜等. 单频分布布拉格反射光纤激光器及温度传感实验研究 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 695~697