

# 基于多模干涉效应的全正色散被动锁模掺镜 光纤激光器

谭方舟 刘 江 孙若愚 王 璞

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 报道了一种全光纤结构耗散孤子被动锁模光纤激光器。激光器中使用了一种基于多模干涉原理的光纤滤波器,它由两段单模光纤和一段多模光纤组成。通过合理的选取多模光纤的长度,制作了中心波长在 1067 nm 处、3 dB 带宽为 7.5 nm 的光谱滤波器并将其应用于全正色散被动锁模掺镜光纤激光器中。实验中使用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 作为锁模元件,在抽运功率为 865 mW 时,获得重复频率为 18.5 MHz 的稳定锁模啁啾脉冲串,脉冲宽度为 21 ps,平均输出功率为 8 mW,单脉冲能量为 0.43 nJ。输出脉冲光谱半峰全宽为 4.32 nm,光谱边缘有明显陡沿。

**关键词** 激光器;光纤激光器;光纤滤波器;全正色散

**中图分类号**           **文献标识码** A           **doi:** 10.3788/CJL201340.0402010

## All-Normal-Dispersion Passively Mode-Locked Yb-Doped Fiber Laser with Multimode Interference Effect

Tan Fangzhou Liu Jiang Sun Ruoyu Wang Pu

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** An all-fiber dissipative-soliton passively mode-locked fiber laser is reported. A filter based on multimode interference is used, which consists of two segments of single-mode fiber (SMF) and a segment of multimode fiber (MMF). By proper selection of the MMF length, a band-pass filter with central wavelength of 1067 nm and band width of 7.5 nm is fabricated. The filter for spectral filtering in an all-normal dispersion mode-locked ytterbium-doped fiber laser is used. A semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) is used as a saturable absorber in the laser cavity. With the pump power of 865 mW, stable pulse train which is highly chirped with average repetition rate of 18.5 MHz and pulse width of 21 ps is obtained. The average output power is 8 mW, so the single pulse energy is 0.43 nJ. The full width at half maximum (FWHM) of output pulse is 4.32 nm. The spectrum has a steep edge.

**Key words** lasers; fiber lasers; fiber filter; all-normal-dispersion

**OCIS codes** 140.3510; 140.4050; 140.3615

## 1 引 言

近年来被动锁模光纤激光器因其低成本、高效可靠及结构紧凑等优点得到了广泛研究<sup>[1]</sup>。传统光孤子的产生是非线性效应与反常群速度色散作用的结果。然而,由于孤子面积定理和频谱边带效应的

限制,孤子脉冲能量最大只能达到 0.1 nJ 量级<sup>[2]</sup>。近年来人们提出了一些新的光纤激光器设计方案来提高锁模激光器的脉冲输出能量。例如在激光谐振腔中使用正负色散两种光纤进行色散管理,使激光器运转在靠近零色散点的正色散区域,通过对脉冲

**收稿日期:** 2012-11-26; **收到修改稿日期:** 2013-01-01

**基金项目:** 北京市自然科学基金重点项目(KZ2011100050011)资助课题。

**作者简介:** 谭方舟(1990—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。

E-mail: tanfangzhou1990@emails.bjut.edu.cn

**导师简介:** 王 璞(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

展宽来降低峰值功率,从而控制激光腔中的非线性效应,这种展宽脉冲激光器可以产生纳焦量级的飞秒脉冲<sup>[3]</sup>。最近研究人员在没有采用任何色散补偿元件的全正色散光纤激光器中实现了稳定的锁模运转,比如2006年Chong等<sup>[4]</sup>实验获得了工作在全正色散区的飞秒脉冲掺镱光纤激光器,谐振腔中未加入色散补偿元器件,而是加入了一个光谱滤波器,其输出脉冲带有很强的啁啾,可压缩获得飞秒脉冲。该激光器中滤波器的光谱滤波效应对耗散孤子的形成起了决定性作用。其中耗散孤子的形成是非线性效应、光纤正色散、增益饱和效应以及光谱滤波效应共同作用的结果。

光学滤波器,特别是全光纤滤波器,作为关键部件广泛应用于光纤通信系统中的波分复用技术以及光纤传感中。实现光纤滤波的方法有多种,目前商用光纤滤波器主要包括光纤布拉格光栅(FBG)<sup>[5]</sup>、长周期光纤光栅(LPG)<sup>[6]</sup>以及基于啁啾相移的光纤光栅(C-FBG)<sup>[7]</sup>等。但这些滤波器制作工艺难度大、结构复杂且价格昂贵。如何设计制作一种简单便宜的全光纤滤波器仍是一个研究热点。

早在2004年,Mohammed等<sup>[8]</sup>报道了一种基于光纤的波长可调谐的聚光棱镜,它由单模光纤(SMF)和一段多模光纤(MMF)组成。他们在实验中发现输入波长和焦点位置轴向间存在线性关系。2006年,Mohammed等<sup>[9]</sup>基于自成像效应预测将多模光纤两端与单模光纤熔接后,通过理论分析和实验证实了这种半单模-多模-单模(SMS)的结构能够形成一个带通滤波器。这种滤波器是通过改变MMF的长度,或对光纤施加应力而改变其相对长度,可以对滤波器的滤波中心波长进行选择,同时滤波器的滤波带宽也随MMF的纤芯直径的改变而变化。由于具有结构简单、制作方便以及成本低廉等优点,这种SMS结构的全光纤滤波器引起了研究人员的广泛关注。此后,研究人员对SMS结构滤波器的研究主要集中在可调谐滤波器、位移传感器、温度传感器、带通滤波器以及边缘滤波器等方向<sup>[10]</sup>。彭石军等<sup>[11]</sup>将MMF的一端与SMF熔接,另一端不熔接,在SMF与MMF的中间加入折射率匹配液,通过微小移动SMF和MMF之间的距离达到改变MMF长度的目的,从而改变滤波中心波长,实现波长可调谐,调谐范围为5 nm。郝艳萍等<sup>[12]</sup>将MMF缠绕在偏振控制器上,两段熔接上SMF,通过调节偏振控制器实现了掺铒光纤激光器的波长可调输出,调谐范围为18 nm。王洁玉等<sup>[13]</sup>将SMS结构滤

波器与长周期光纤光栅级联,实现了温度和折射率的同时测量,该装置测量灵敏度高,不易受电磁干扰。本课题组制作了SMS结构的滤波器并将其应用于全正色散光纤激光器中,实现了激光器的全光纤结构,使用半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模,获得了重复频率为18.5 MHz,单脉冲能量为0.43 nJ的啁啾脉冲输出。

## 2 单模-多模-单模结构滤波器滤波原理

基于多模干涉原理的SMS结构的光纤滤波器由两段SMF和一段MMF熔接而成,其工作原理如下<sup>[12]</sup>:当入射光由SMF耦合进入MMF时,在熔接点处会激发一系列MMF支持的高阶模式,高阶模式在MMF中传输,产生干涉效应使得能量重新分布。当光再由MMF进入SMF时,在多模到单模的熔接点处,MMF出射端面上只有部分光强较大模式的光可以进入SMF传输,此时SMF起到了空间滤波的作用。当MMF的长度和入射波长之间满足一定条件时,可能发生自映像效应,即入射光自身的再现,此时耦合效率最高。MMF的长度与滤波中心波长存在如下关系:

$$\lambda_0 = p \left( \frac{n_{\text{MMF}} D_{\text{MMF}}^2}{L} \right), \quad p = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中 $L$ 为MMF长度, $p$ 为自成像点个数, $n_{\text{MMF}}$ 为MMF折射率, $D_{\text{MMF}}$ 为MMF纤芯直径, $\lambda_0$ 为自由空间波长。MMF确定时,即光纤折射率一定,此时可得出滤波中心波长同MMF长度的关系。实验中使用的MMF由THORLab公司生产,光纤型号为AFS 50/125Y,其纤芯直径为50  $\mu\text{m}$ ; SMF由Nufern公司生产,光纤型号为1060-XP(6/125),纤芯直径为6  $\mu\text{m}$ 。MMF折射率约为1.4495。由此可以计算出对应于确定中心波长的一系列MMF的长度值,见图1。

由图1可知自成像在MMF内周期性地形成,MMF长度随 $p$ 的增大而线性增加。在一个自成像点内( $p$ 一定时),滤波中心波长随着MMF长度的增大而向短波长方向移动,且在一个自成像点内MMF长度随滤波中心波长的变化很小,例如 $p=1$ 时,中心波长范围改变10 nm,MMF长度改变0.032 mm。考虑到MMF同SMF熔接问题以及光在MMF中的耦合效率等,确定所用MMF长度为40.68 mm( $p=12$ 时),采用双程后向结构组成的放大自发辐射(ASE)光源作为宽带光源检测滤波器的

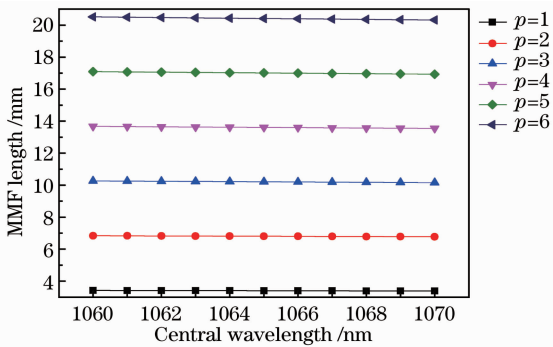


图1 50/125 MMF 中心波长同光纤长度的关系

Fig.1 Relationship between central wavelength and fiber length of 50/125 MMF

滤波特性(ASE 光谱范围 1020~1100 nm),制作出的带通滤波器的中心波长为 1067 nm,滤波带宽为 7.5 nm。该滤波器的中心波长可通过对 MMF 施加应力而进行调谐,但本文内容未涉及可调谐滤波器,故不予以讨论。

### 3 实验装置

被动锁模掺镱环形光纤激光器实验装置如图 2 所示,与文献[14]报道的石墨烯锁模激光器的结构基本相同,激光器总腔长约为 10 m,主要包括:5 m 长的双包层掺镱光纤(YDF)、光耦合器、 $(2+1) \times 1$  合束器、自制带通滤波器、环形器以及作为锁模器件的 SESAM。其中,所用增益光纤是双包层掺镱光纤,型号为 Coractive DCF-YB-7/125,纤芯直径为 6.5  $\mu\text{m}$ ,其 976 nm 波长处的吸收系数为 5 dB/m;光耦合器耦合比为 30:70,30%端作为输出端口,70%端为反射端口, $(2+1) \times 1$ 合束器将抽运光和反

馈光耦合进腔内;SESAM 由 BATOP 公司生产,恢复时间为 1 ps,调制深度为 10%。抽运源(Lumics LU09XXT100)的中心波长为 976 nm,最大输出功率为 10 W。除 5 m 长的双包层掺镱光纤外,腔内其他光纤均为标准 SMF。

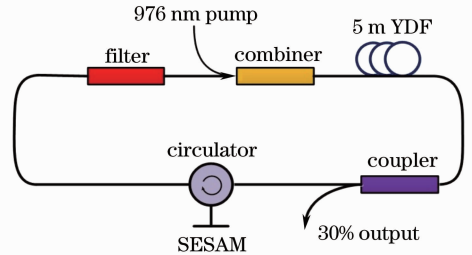


图2 全正色散掺镱环形光纤激光器装置示意图

Fig.2 Experimental setup of all-normal-dispersion Yb-doped fiber ring laser

### 4 实验结果与讨论

通过适当调节 SESAM,在抽运功率为 794 mW 时可得到重复频率为 18.5 MHz 的稳定激光锁模脉冲;继续增加抽运功率,脉冲宽度略微变窄;在抽运功率为 865 mW 时,平均输出功率达到最大,最大值为 8 mW;进一步增大抽运功率脉冲将分裂形成稳定的双脉冲。脉冲未分裂时,最大稳定输出脉冲的单脉冲形状、脉冲串分别如图 3(a)、(b)所示。实验中通过 25 GHz 高速示波器(Agilent DSO-X 92504A)和 25 GHz 光电探头测得输出脉宽  $\omega_p$  为 28.57 ps,如图 3(a)所示。假设输出脉冲形状具有高斯型轮廓,测得输出脉冲脉宽为 21 ps,时间带宽积为 37.6,这表明输出脉冲具有很大的正啁啾。

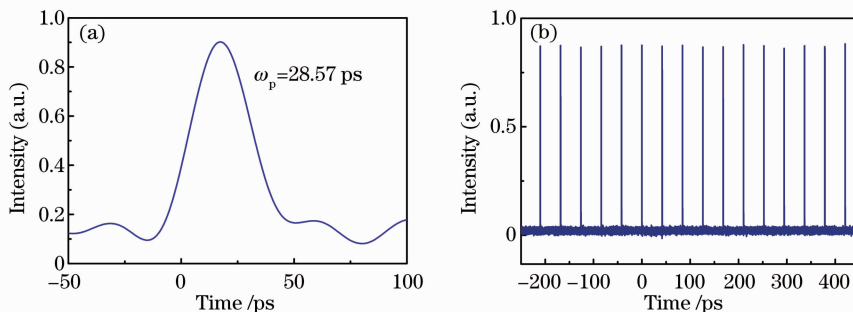


图3 加滤波器的锁模光纤激光器脉冲输出特性。(a)单脉冲;(b)脉冲串

Fig.3 Output characteristics of the mode-lock fiber laser with filter. (a) Single pulse; (b) pulse train

输出脉冲的光谱如图 3(a)所示。图 3(a)中的光谱有明显陡沿,为典型的全正色散耗散孤子脉冲的光谱输出特性。通过分辨率为 0.02 nm 的光谱仪(YOKOOGAWA 6370B)测得输出光谱中心波长约为 1067 nm,其半峰全宽(FWHM)为 4.32 nm。

由于加入的带通滤波器产生光谱滤波效应,输出脉冲在时域和频域都被窄化。在正常群速度色散腔内,脉冲光谱被展宽并具有很强的频率啁啾。利用光谱滤波器对啁啾脉冲进行光谱滤波,可降低脉冲边缘能量,有效压缩脉冲,从而产生新的脉冲自振幅

调制。实验中光谱滤波器的滤波效应在耗散孤子形成中起到了不可或缺的关键作用。激光输出单脉冲能量为 0.43 nJ,这是传统孤子锁模光纤激光器所能得到的单脉冲能量的 4 倍,但这比文献[5]报道的工作在全正色散区通过非线性偏振旋转(NPR)锁模获得 20 nJ 的单脉冲能量低,其原因一方面是基于多模干涉原理制作的滤波器以及环形器损耗较大,另一方面是锁模机制影响的差异,但文献[5]报道的激光谐振腔型并非全光纤结构。实验中输出的啁啾脉冲串因功率较低未能实现进一步压缩。

实验中激光器工作十分稳定,工作台的微小振动不会影响激光器的锁模运行。在锁模运行状态下,直接关闭抽运源电源再重新开启,激光器可自动恢复到相同的锁模状态,输出功率、中心波长以及光谱宽度不发生变化。

为了验证产生耗散孤子的关键因素是有效滤波带宽限制效应,实验中将自制滤波器移除谐振腔,腔内其他器件和参数均不变,总腔长略微减小,移除自制滤波器后,腔内总损耗减小,激光器在抽运功率为 665 mW 时可得到稳定锁模,当抽运功率增加到 730 mW 时,获得最大输出功率为 18.4 mW,进一步增加抽运功率脉冲将分裂。稳定锁模脉冲串同

图 3(b)一致,此时激光器的重复频率为 19.2 MHz,输出脉冲的单脉冲形状如图 4 所示。

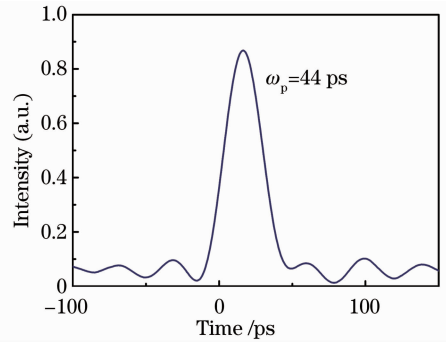


图 4 未加滤波器时锁模光纤激光器单脉冲  
Fig. 4 Single pulse of the mode-lock fiber laser without filter

图 5 为锁模光纤激光器的输出脉冲光谱图,其中图 5(b)为未加滤波器时的光谱图,光谱中心波长为 1076.2 nm,FWHM 为 3.5 nm。输出稳定脉冲串时,使用 25 GHz 高速示波器检测其脉宽为 44 ps,单脉冲能量为 0.96 nJ。由于缺少有效滤波带宽限制输出脉冲的时域和频域,所获得的锁模脉宽比加入滤波器时的脉宽宽,其光谱的边缘没有明显陡沿。

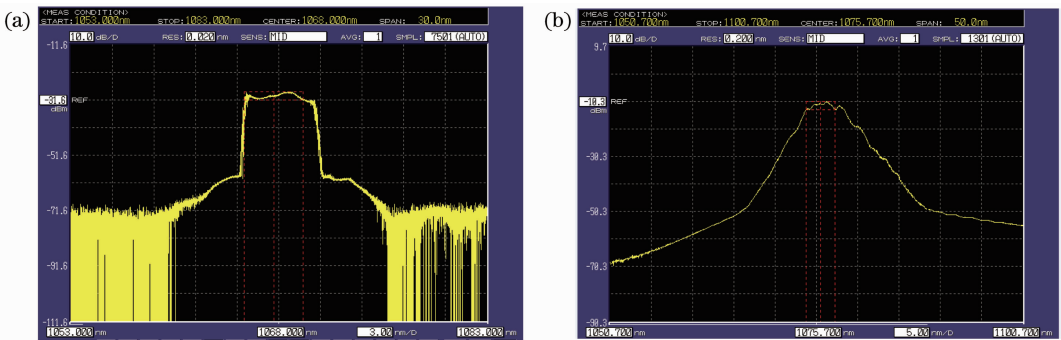


图 5 (a)加入和(b)未加滤波器时锁模光纤激光器的光谱图

Fig. 5 Optical spectrum of the mode-lock fiber laser (a) with filter and (b) without filter

## 5 结 论

基于多模干涉效应制作了中心波长为 1068 nm,FWHM 为 7.5 nm 的带通滤波器,并将其应用于全正色散光纤激光器中,实现了激光器的全光纤结构,获得了工作在 1 μm 附近的全光纤耗散孤子光纤激光器,激光腔内无色散补偿器件,耗散孤子的形成是非线性效应、光纤正色散、增益饱和效应以及光谱滤波效应共同作用的结果。实验中得到重复频率为 18.5 MHz,脉宽为 21 ps,单脉冲能量为 0.43 nJ 的脉冲输出。输出脉冲带有很强的线性啁啾,时间带

宽积为 37.6,但受限于低输出功率,脉冲未能被压缩。

## 参 考 文 献

- Zhong Yihui, Zhang Zuxing, Tao Xiangyang. Research progress of passively mode-locked fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(8): 46~51
- 钟义晖, 张祖兴, 陶向阳. 被动锁模光纤激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(8): 46~51
- K. Tamura, L. E. Nelson, H. A. Haus *et al.*. Soliton versus nonsoliton operation of fiber ring lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(2): 149~151
- K. Tamura, E. P. Ippen, H. A. Haus. Pulse dynamics in

- stretched-pulse fiber lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(2): 158~160
- 4 A. Chong, W. H. Renninger, F. W. Wise. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser with pulse energy above 20 nJ[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(16): 2408~2410
- 5 B. S. Kawasaki, K. O. Hill, D. C. Johnson *et al.*. Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1978, **3**(2): 66~68
- 6 Fang Hong, Qin Xi, Pei Li *et al.*. Designing of tunable optical filter based on long-period fiber grating[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(1): 6~9  
方宏, 秦曦, 裴丽等. 基于长周期光纤光栅的可调谐光滤波器设计[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(1): 6~9
- 7 Lu Shaohua, Xu Ou, Feng Suchun *et al.*. Design and application of optical fibers based on chirped phase-shifted fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1675~1680  
鲁韶华, 许欧, 冯素春等. 基于啁啾相移光纤光栅的滤波器设计及应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1675~1680
- 8 W. S. Mohammed, A. Mehta, E. G. Johnson. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(2): 469~477
- 9 W. S. Mohammed, Peter W. E. Smith. All-fiber multimode interference band-pass filter[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(17): 2547~2549
- 10 Yiggit O. Yilmaz, Alok Mehta, Waleed S. Mohammed *et al.*. Fiber-optic beam shaper based on multimode interference[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(21): 3170~3172
- 11 Peng Shijun, Liu Yanan, Xue Jinlai *et al.*. Design of multi-mode fiber tunable optical filter based on strain[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505004  
彭石军, 刘亚南, 薛金来等. 基于应变的多模光纤可调谐光纤滤波器设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0505004
- 12 Hao Yanping, Zhang Shumin, Wang Xinzhan *et al.*. Tunable erbium-doped fiber laser based on multi-mode fiber filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0814006  
郝艳萍, 张书敏, 王新占等. 基于多模光纤滤波器的可调谐掺铒光纤激光器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0814006
- 13 Wang Jieyu, Tong Zhengrong, Yang Xiufeng *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and refraction index based on multimode interference and long-period fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(9): 0905003  
王洁玉, 童峥嵘, 杨秀峰等. 基于多模干涉和长周期光纤光栅的温度及折射率同时测量[J]. *中国激光*, 2012, **39**(9): 0905003
- 14 Liu Jiang, Wu Sida, Wang Ke *et al.*. Passively mode-locked and Q-switched Yb-doped fiber lasers with graphene-based saturable absorber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0802001  
刘江, 吴思达, 王科等. 基于石墨烯可饱和吸收体的被动锁模、被动调Q掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0802001

栏目编辑: 张腾