

文章编号: 0258-7025(2009)01-0100-04

# 简化腔结构的大模场面积光纤锁模激光器

张 驰<sup>1</sup> 胡明列<sup>1\*</sup> 宋有建<sup>1</sup> 柴 路<sup>1</sup> 王清月<sup>1</sup>

李进延<sup>2</sup> 蒋作文<sup>2</sup> 彭景刚<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室 天津 300072)

<sup>2</sup> 武汉烽火通信科技股份有限公司光纤研发部, 湖北 武汉 430074

**摘要** 实验研究了基于国产高增益掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层大模场面积(LMA)光纤的简化腔结构激光器的稳定锁模运转, 直接使用塌陷打磨之后的光纤端面作为线型腔中的一端腔镜, 利用打磨为 0°角之后的光纤端面 4% 的反射率, 在高增益的条件下获得了激光振荡, 并进一步利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)获得稳定的锁模输出, 得到了平均功率分别为 144 mW 和 120 mW, 重复频率均为 68 MHz(对应单脉冲能量分别为 2.1 nJ 和 1.8 nJ), 脉冲宽度分别为 9.9 ps 和 4.8 ps 的超短脉冲输出。通过增加抽运功率, 得到了功率分别为 150 mW 和 220 mW 的稳定多脉冲输出, 对应脉冲个数为两个和四个。进而通过激光谐振腔中的光栅对, 实现了波长 1020 ~ 1080 nm 宽带可调谐的超短脉冲输出。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 飞秒激光; 锁模; 大模场面积光纤; 可调谐波长

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0100

## Mode-Locked Large-Mode-Area Photonic Crystal Fiber Laser with Simple Cavity Configuration

Zhang Chi<sup>1</sup> Hu Minglie<sup>1</sup> Song Youjian<sup>1</sup> Chai Lu<sup>1</sup> WANG Chingyue<sup>1</sup>

Li Jinyan<sup>2</sup> Jiang Zuowen<sup>2</sup> Peng Jingang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University;  
Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science (Tianjin University),  
Ministry of Education, Tianjin, 300072 China  
<sup>2</sup>Fiber Home Telecommunication Technologies Co. Ltd., Wuhan, Hu bei 430074 China

**Abstract** An Yb-doped double clad large mode area(LMA) fiber laser with a novel simple cavity configuration is demonstrated. This fiber laser system applies one end face of the fiber directly as a cavity mirror, which is fine polished after collapsing. Laser is obtained with the 4% feedback of the end face which has been polished at an angle of 0°, and mode-locking is achieved by using a semiconductor saturable absorber as another cavity mirror. The average output powers are 144 mW and 120 mW with the repetition frequency of 68 MHz (the corresponding single pulse energies are 2.1 nJ and 1.8 nJ), and the pulse widths are 9.9 ps and 4.8 ps, respectively. By increasing the pump power, stable multi-pulse outputs of 150 mW and 220 mW are obtained, which demonstrates the power energy of two and four pulses accordingly. Furthermore, by adding grating pairs inside the cavity, the output wavelength is tunable in the 1020~1080nm range.

**Key words** lasers; fiber laser; femtosecond laser; mode-locking; large-mode-area fiber; wavelength tunable

**收稿日期**: 2008-04-25; **收到修改稿日期**: 2008-06-11

**基金项目**: 国家 973 计划(2006CB806002), 国家 863 计划(2007AA03Z447), 国家自然科学基金(60678012, 60838004), 高等学校博士学科点专项科研基金(20070056083, 20070056073), 教育部科学技术研究重点项目(108032)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0597)资助课题。

**作者简介**: 张 驰(1983—), 男, 辽宁人, 硕士研究生, 主要从事锁模光纤飞秒激光器方面的研究。

E-mail: zhangchi@tju.edu.cn

**导师简介**: 王清月(1938—), 男, 河北人, 教授, 博士生导师, 目前从事飞秒激光理论及应用等方面的研究。

E-mail: chywang@tju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: huminglie@tju.edu.cn

## 1 引言

超短脉冲激光器以其脉冲宽度窄、峰值功率高、频谱范围宽等特点被广泛应用于超精细微纳加工、太赫兹产生、光子通信、医学成像以及许多生物化学交叉领域中。当前的超短脉冲激光器的技术指标记录都由发展最为成熟的固体锁模激光器所保持，但是固体激光器价格昂贵，操作复杂，维护成本高，并且要在苛刻的超净环境中运行，还需要防振防潮，这些因素限制了锁模激光应用的进一步普及化。而锁模光纤激光器的出现，使锁模激光器从苛刻的实验条件中解放出来成为可能。光纤激光器的增益介质掺稀土光纤可由激光二极管(LD)直接抽运，大幅度降低了超短脉冲激光器的成本，而且光纤激光器将激光限制在光纤波导中传输，具有很好的环境稳定性和更加紧凑的结构。这些优点都预示着锁模光纤激光器将成为更加普及化和实用化的超短脉冲激光光源。

传统锁模光纤激光器受限于纤芯面积而不能获得高功率的输出，极大地限制了锁模光纤激光器的应用，解决这一难题的最简单方法是提高激光器所用增益光纤的模场面积<sup>[1~5]</sup>。近年来国际上有诸多关于基于掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层大模场面积(LMA)光子晶体光纤(PCF)的光纤激光器的研究报道。其中选用纤芯直径 70  $\mu\text{m}$  的棒状光子晶体光纤作为增益介质<sup>[1]</sup>，通过全正色散锁模直接从振荡级输出了单脉冲能量为 265 nJ，重复频率为 10.18 MHz 的激光脉冲，经腔外压缩后的脉宽为 400 fs，其单脉冲能量已超过固体超短脉冲激光器。国内大模场面积光纤激光器的研究也取得了诸多成绩，近期有许多关于高功率锁模脉冲输出振荡级<sup>[3,5~6]</sup>以及放大级的报道<sup>[7]</sup>。目前报道的大模场面积光纤锁模激光器使用的多为复杂的环形腔及  $\sigma$  型腔结构<sup>[1,2]</sup>和相对简单的线型腔结构<sup>[3,5]</sup>。本文使用了国产双包层大模场面积光纤，并且对线型腔进行了简化，将光纤的一个端面研磨成 0°角直接作为腔镜，实现了基于半导体可饱和吸收镜(semiconductor saturable absorber mirrors, SESAM)的大模场面积光纤全正色散锁模，并且通过在腔内增加光栅对，实现了激光器输出波长的可调谐。

## 2 实验装置

实验中使用的是 1.3 m 掺 Yb<sup>3+</sup> 普通双包层大模场面积光纤(武汉烽火通信科技股份有限公司光

纤研发部拉制)，激光器的主体基于法布里-珀罗(F-P)线型谐振腔结构，实验装置如图 1 所示。抽运源使用输出波长为 976 nm 的大功率 LD，抽运光经过焦距为 11 mm 的非球面透镜(AL)耦合入光纤，光纤弯曲半径为 150 mm 以抑制高阶模式的产生，抽运光耦合端的光纤端面研磨成 8°角，防止自激振荡的产生。光纤的另一端打磨成 0°角，直接作为输出端，并利用该端面的反馈与 SESAM 形成激光谐振腔。抽运端双色镜 DM1 在 25°入射时对中心波长 976 nm 的抽运光透过率大于 95%，同样角度下对中心波长 1045 nm 的激光反射率大于 99%，其作用是分离抽运光和激光，让抽运光充分耦合入光纤，同时使激光充分反射而不至于反馈回 LD 而将其损坏，同样的双色镜 DM2 用于折叠光路。锁模用的 SESAM 是基于 GaAs/AlAs 布拉格反射镜上低温分子束外延技术生长的 InGaAs 量子阱结构，线性吸收率为 65%，调制深度为 35%，饱和能流密度为 20  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ，恢复时间为 500 fs。实验中通过焦距为 8 mm 的非球面透镜将光束聚焦在 SESAM 上，从而使其获得自启动锁模所需的能量密度。为了实现波长可调谐，SESAM 前插入了一对 600 line/mm 的光栅用以将频谱在空间展开，光栅对间距约为 60mm，光栅表面镀金以提高反射率。由于光栅的分光特性受偏振影响，因此在光栅对之前还加入了一个半波片。SESAM 前的透镜除了聚焦光束以外，同时起到空间光阑的作用，截取通过光栅后在空间展开光谱的一部分。通过调节光栅和透镜的位置，可以实现锁模激光中心波长的可调谐输出。

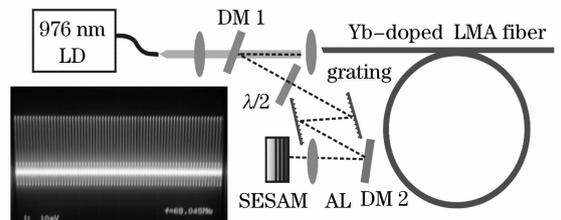


图 1 实验装置图，插图为锁模脉冲序列

Fig. 1 Simple cavity configuration.

The inset is the pulse train from the fiber laser

## 3 实验结果

利用光纤端面作为反射镜，省去了线型腔内的偏振控制元件<sup>[3,5,6]</sup>，降低了光路调整的复杂性。通过调节光路中 SESAM 端的反馈光就能很容易地获得激光振荡。进一步插入聚焦用的透镜，通过增加

抽运功率及 SESAM 上汇聚光斑大小,可以获得稳定锁模运转。在前期的实验中发现<sup>[8]</sup>,由于所用的大模场面积光纤具有极低的非线性,因此锁模光谱一般只有 0.5~0.8 nm 宽。为了充分利用这种光纤的增益带宽,在光路中加入了一对 600 line/mm 的光栅对,结合 SESAM 前聚焦透镜自身的光阑,可以调谐锁模脉冲输出的中心波长。图 1 插图给出了模拟示波器显示的锁模脉冲照片,图中可见重复频率为 68.045 MHz。图 2 给出了两组这种结构激光器的典型锁模输出脉冲特性,锁模光谱中心波长分别在 1038 nm 和 1045 nm,如图 2(a)和(c)所示,对应脉宽分别为 9.9 ps 和 4.8 ps,相关曲线如图 2(b)和(d)所示,输出平均功率分别为 144 mW 和 120 mW,对应单脉冲能量分别为 2.12 nJ 和 1.76 nJ。由于在低非线性条件下的锁模主要受到 SESAM 的影响,而 SESAM 在不同波长的调制深度和非线性反射率不同,因此在这两种波长运转状态下获得了完全不同的脉冲宽度和频谱形状。

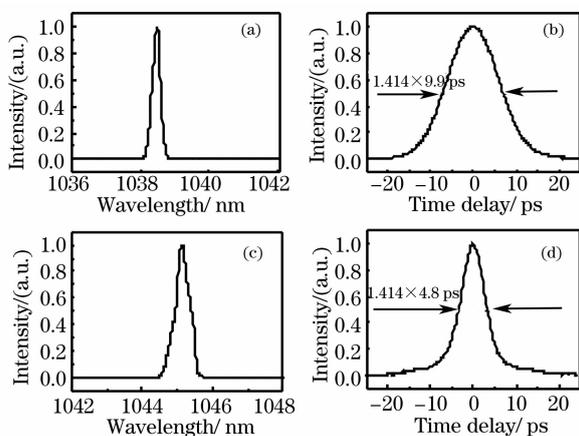


图 2 两组不同中心波长处的锁模光谱 (a),(c) 以及对应的时域相关曲线 (b),(d)

Fig. 2 Output characteristics of the mode-locked fiber laser at different wavelengths. The measured laser spectra (a),(c) and the corresponding long-range autocorrelation traces (b),(d)

在这种腔型结构中,当锁模输出功率增加到 150 mW 左右时,光纤的非线性作用增强,导致脉冲分裂<sup>[9]</sup>,图 3 中(a)和(b)给出了中心波长在 1068 nm 的双脉冲情况下的光谱和时域相关曲线。继续增加输出功率到 220 mW,激光器仍然稳定锁模,脉冲个数由原来的两个变为四个。图 3 中(c)和(d)分别给出了四脉冲锁模时输出的光谱和相关曲线。可见随着功率的增加,分裂脉冲个数增加,间距减小,对应的光谱调制周期增大。

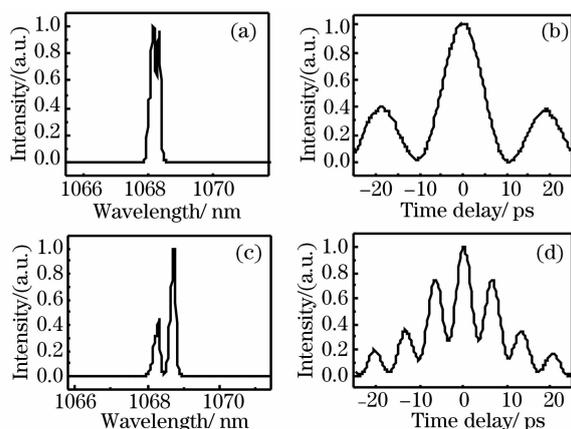


图 3 双脉冲和四脉冲情况下的锁模光谱 (a),(c) 以及对应的时域相关曲线 (b),(d)

Fig. 3 Measured laser spectra (a),(c) and the corresponding autocorrelation traces (b),(d) for the two- and four-pulses operation

通过调节光栅和 SESAM 前聚焦透镜光阑的位置,可以实现中心波长可调谐输出,实验中获得了中心波长在 1020~1080 nm 之间的锁模输出。图 4 为获得的不同中心波长的锁模光谱示意图。可见锁模脉冲的频谱宽度均在 1nm 以下,而且随锁模中心波长不同,光谱宽度略有不同,这是由 SESAM 在不同波长处的调制深度不同引起的。各锁模光谱对应的脉冲宽度也在 4~15 ps 之间不尽相同。

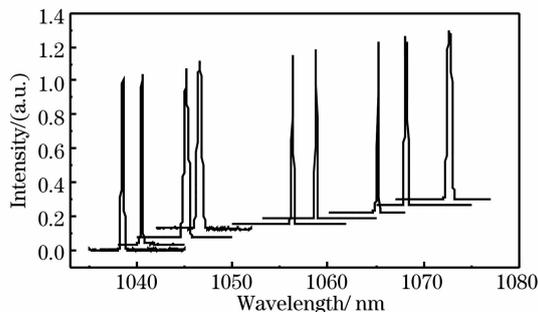


图 4 可调谐锁模输出的不同中心波长  
Fig. 4 Tunable output central wavelength from the mode-locked laser

## 4 结 论

实验研究了简化线型腔结构大模场面积光纤激光器的全正色散锁模运转,获得了能直接从光纤尾纤输出的超短脉冲激光器。使用打磨成 0°角的光纤端面作为线型腔的腔镜之一,利用该端面的 4% 反射形成激光振荡,并利用 SESAM 实现了全正色散锁模。利用光栅对和聚焦透镜的光阑,进一步实现了输出波长的可调谐。在 1020~1080 nm 的波

长范围内获得了锁模脉冲输出,几乎覆盖了整个增益光谱范围。光谱宽度 0.5~0.8 nm,脉冲宽度为 4~15 ps,输出功率 150 mW 左右,对应单脉冲能量 1.5~2.5 nJ。简化腔锁模激光器省去了自由光路中的偏振元件,降低了调节的复杂性,其输出端更充分利用了光纤的波导稳定性,可以方便地根据需要移动到适当的位置,极大地方便了应用。此外,输出端尾纤可以直接作为放大级的输入端插入放大级中,既降低了振荡级与放大级之间的耦合损耗,又节省了大量的空间。因此,简化腔结构的光纤激光器为大功率超短脉冲激光器的小型化、简单化提供了可行的方案。

### 参 考 文 献

- 1 B. Ortac, O. Schmidt, T. Schreiber *et al.*. High-energy femtosecond Yb-doped dispersion compensation free fiber laser [J]. *Opt Express*, 2007, **15**(17): 10725~10732
- 2 Bülend Ortac, Jens Limpert, Andreas Tuunerman *et al.*. High-energy femtosecond Yb-doped fiber laser operating in the anomalous dispersion regime[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15): 2149~2151
- 3 Wang Qingyue, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Large-mode-area photonic crystal fiber laser output high average power femtosecond pulses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1603~1606
- 4 H. Zhao, Q. Lou, J. Zhou *et al.*. An acousto-optic Q-switched fiber laser using China-made double-cladding fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9): 522~523
- 5 Song Youjian, Hu Minglie, Zhang Chi *et al.*. Stretched-pulse femtosecond photonic crystal fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 830~834
- 6 Song Youjian, Hu Minglie, Liu Qinwen *et al.*. A mode-locked Yb<sup>3+</sup> doped double-clad large-mode-area fiber laser[J]. *Acta physica Sinica*, 2008, **57**(8): 4045~4048
- 7 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Experiment research on a femtosecond laser amplifier based on a large-mode-area photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 479~480
- 8 Chingyue Wang, Weili Zhang, K. F. Lee *et al.*. Pulse splitting in a self-mode-locked Ti: sapphire laser [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **137**(1-3): 89~92
- 9 D. Anderson, M. Desaix, M. Lisak *et al.*. Wave breaking in nonlinear-optical fibers[J]. *J. Opt. Sci. Am. B*, 1992, **9**(8): 1358~1361
- 10 王清月,胡明列,宋有建等. 用大模场光子晶体光纤获得高功率飞秒激光[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1603~1606
- 11 宋有建,胡明列,张 驰等. 呼吸脉冲锁模的掺 Yb<sup>3+</sup> 大模场面积光子晶体光纤飞秒激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 830~834
- 12 刘博文,胡明列,宋有建等. 高功率掺镱大模面积光子晶体光纤飞秒激光放大器的实验研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 479~480