

# 高能量掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤 孤子锁模飞秒激光器\*

宋有建 胡明列<sup>†</sup> 刘博文 柴 路 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室 天津 300072)

(2008 年 1 月 30 日收到 2008 年 3 月 5 日收到修改稿)

实验研究了基于掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤的孤子锁模激光器,获得了高脉冲能量的飞秒激光输出. 激光器基于线形腔结构,利用光栅对补偿腔内色散,并通过半导体可饱和吸收镜实现锁模的自启动. 实验中从振荡级直接获得了平均功率为 700 mW,重复频率为 47.3 MHz(对应于 14.8 nJ 的单脉冲能量)脉冲宽度为 518 fs 的稳定锁模脉冲输出. 与普通孤子锁模飞秒光纤激光器相比,输出的单脉冲能量提高了两个数量级.

关键词:光子晶体光纤,飞秒,光纤激光器,孤子锁模

PACC:4281W,4280W,4260D

## 1. 引 言

锁模光纤激光器作为一种飞秒激光脉冲源,是研究超快现象的有力工具,在光纤通信、激光微纳加工、光纤传感、太赫兹产生、量子光通信等领域具有非常好的应用前景<sup>[1]</sup>. 工作于 1550 nm 通讯波段的飞秒光纤激光器以掺铒(Er)光纤作为增益介质. 光纤在这一波段具有反常色散,光纤非线性效应与反常色散的平衡能够产生光孤子,使激光器实现孤子锁模<sup>[2,3]</sup>. 孤子锁模激光器输出的单脉冲能量和脉冲宽度受到孤子面积理论<sup>[4]</sup>的限制,一般情况下可以获得几十皮焦耳(pJ,数百飞秒(fs))的激光脉冲,更高的能量会导致光脉冲分裂. 普通光纤在 1.3 μm 以下波段均为正常色散,因此工作波长在 1 μm 附近的掺钕(Nd)、镱(Yb)等离子的光纤不支持孤子产生. 光子晶体光纤灵活可控的色散特性<sup>[5]</sup>可以使光纤的零色散点移至短波段并保持单模,实现孤子锁模. 但这需要增大光子晶体光纤的包层空气孔比例并减小纤芯直径,然而这样也增强了光纤的非线性,使得光孤子的能量限制在几个皮焦耳. 最近

Moenster 等<sup>[6]</sup>利用掺 Nd 光子晶体光纤同时提供增益、非线性及反常色散,在 1.06 μm 波长实现了孤子锁模,获得了能量为 7.8 pJ,宽度为 200 fs 的超短脉冲<sup>[6]</sup>.

光子晶体光纤的无截止单模特性可以提供高出普通光纤两个数量级的单模场面积<sup>[7]</sup>,有效降低非线性,从而提高锁模光纤激光器的单脉冲能量. 2007 年,Ortac 等人<sup>[8]</sup>在国际上首次利用掺 Yb 大模场面积光子晶体光纤作为增益介质,并引入光栅对提供反常色散,实现了 1 μm 波段的孤子锁模. 激光器采用环形腔结构,利用半导体可饱和吸收镜(semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)实现锁模的自启动. 实验获得了平均功率为 880 mW,单脉冲能量为 16.5 nJ,脉冲宽度为 500 fs 的激光脉冲,输出指标已经接近于钛宝石锁模激光器的水平. 国内也同步开展了基于大模场面积光纤的超短脉冲激光器的研究<sup>[9]</sup>.

光纤的模式双折射容易受到环境温度和机械振动等外部因素的影响,使得在光纤内传输的激光偏振态随机改变,破坏锁模光纤激光器的稳定运转. 一种常用的解决方案是利用保偏光纤. 通过在这种

\* 国家重点基础研究发展规划(批准号:2003CB314904,2006CB806002)国家高技术研究发展计划(批准号:2007AA03Z447),国家自然科学基金(批准号:60678012),高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20070056083,20070056073),教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号:NCET-07-0597)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: huminglie@tju.edu.cn

光纤中故意引入大量双折射,可以有效抑制外部环境造成的随机双折射,如果入射光与光纤的快轴或慢轴一致,则激光在传输过程中会保持偏振态不变,从而提高光纤激光器的环境稳定性.本文使用单一偏振的大模场面积光子晶体光纤实现了孤子锁模,获得了平均功率为 700 mW,重复频率为 47.3 MHz (对应于 14.8 nJ 的单脉冲能量),脉冲宽度为 518 fs 的稳定激光脉冲输出.与普通的孤子锁模飞秒光纤激光器相比,输出的单脉冲能量提高了两个数量级.

## 2. 实验装置

实验装置如图 1 所示.激光器基于线型腔结构,全反镜和 SESAM 作为两个腔镜.波长为 976 nm 的大功率激光二极管作为抽运源,抽运光通过纤芯直径为 200  $\mu\text{m}$  数值孔径为 0.22 的尾纤输出.抽运光通过非球面透镜耦合进大模场面积光子晶体光纤.实验中选用 1.5 m 长的掺 Yb 偏振型大模场面

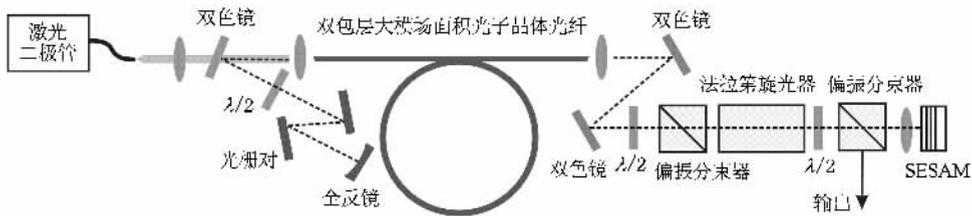


图 1 激光器实验装置图

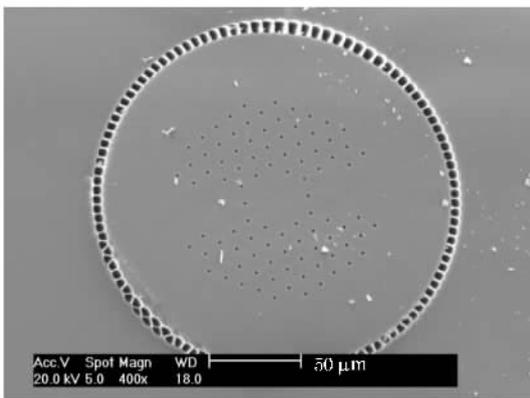


图 2 掺 Yb 偏振型双包层大模场面积光子晶体光纤端面照片

光纤中传输的激光由非球面透镜耦合输出,利用对波长为 976 nm 的抽运光高透,对波长为 1.04  $\mu\text{m}$  的激光高反的双色镜分离激光与抽运光.光纤两端的自由光路分别作为色散补偿和输出.色

积光子晶体光纤 (Crystal Fibre A/S, 丹麦), 光纤端面如图 2 所示. 光纤纤芯的单模场直径为 29  $\mu\text{m}$  (对应的单模场面积为 660  $\mu\text{m}^2$ ), 数值孔径为 0.03. 光纤内包层直径为 200  $\mu\text{m}$ , 具有六角型周期性排布的空气孔, 同时起到抽运光纤芯的作用. 内包层之外环绕着空气比很大的“空气包层”, 使内包层获得高达 0.55 的数值孔径, 这种抽运结构具有 9 dB/m 的抽运光吸收系数. 光纤内包层通过引入应力致双折射材料, 使基模的两个简并的正交偏振态分离, 且其中一个偏振态因折射率低于内包层等效折射率而不满足光纤内传输的弱导条件被损耗掉, 达到偏振保持的效果<sup>[10]</sup>. 实验中选用光纤的偏振消光比为 10 dB, 1060 nm 附近的单一偏振带宽大于 100 nm. 光纤被弯曲成直径为 30 cm 的环, 使得沿光纤快轴传播的模式被损耗掉, 保证单一偏振态. 为了防止端面反馈形成自激振荡, 影响稳定锁模运转, 光纤的两端面均打磨成 8°.

散补偿端的全反镜采用曲率半径为 750 mm 的凹面反射镜, 这一曲率有利于提高激光反馈至光纤的效率. 利用一对平行放置的 600 线/mm 的闪耀光栅作为色散补偿, 通过调整光栅对的间距改变反常色散量. 光栅表面镀金, 接近于利特罗角入射时, 对波长 1.04  $\mu\text{m}$  的激光的衍射效率大于 90%. 光栅的衍射效率对偏振敏感, 需要通过调整半波片使得入射光的偏振态与光栅衍射效率最高的偏振方向一致. 输出端的双色镜后面依次插入半波片及偏振分束器, 通过旋转半波片确保只激发沿光纤慢轴偏振的模式. 利用另一对半波片和偏振分束器调整激光器的耦合输出率, 偏振分束器的导出端作为激光器的输出. 启动锁模的 SESAM (Batop, GmbH, 德国) 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. 在 1.04  $\mu\text{m}$  附近的线性吸收率为 65%, 调制深度为 35%, 饱和通量为 20  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ , 吸收恢复时间小于 500 fs. 利用焦距为 11 mm

的非球面透镜聚焦,通过改变会聚光斑的尺寸使可饱和吸收体获得启动锁模所需的能量密度. 实验中通过旋转半波片,使激光器的输出率保持在 90%,这样既能最大限度地导出腔内功率,又能把 SESAM 上的平均功率控制在比较低的水平,有效避免对 SESAM 的热损伤. 由于线形腔内同时存在沿两个方向传播的脉冲,需要在两个偏振分束器之间加入法拉第旋光器,从而保证仅在单一方向存在高耦合输出率,使激光器高效率运转. 激光器的有效腔长约为 3.2 m,获得的锁模脉冲序列重复频率为 47.3 MHz. 利用上升时间为 200 ps 的高速响应光电二极管和采样频率为 4 GHz 的示波器探测锁模脉冲序列,同时可以监测激光器的多脉冲运转.

### 3. 实验结果

大模场面积光子晶体光纤的色散接近于其材料

色散,在  $1 \mu\text{m}$  波段为  $0.019 \text{ ps}^2/\text{m}$ . 一个腔循环周期之内,激光脉冲两次通过 1.5 m 长的光纤,产生  $0.057 \text{ ps}^2$  的正常色散. 光栅对的间隔为 6.5 cm,入射角度为  $30^\circ$ ,激光脉冲经光栅对两次反射产生  $-0.095 \text{ ps}^2$  的反常色散. 因此激光脉冲一个腔循环周期内共获得  $-0.038 \text{ ps}^2$  的反常色散,运转在孤子锁模域. 激光器在输出功率为 200 mW 时开始出现调 Q 锁模,继续增加抽运功率,并调整 SESAM 上的光斑尺寸,使其达到饱和能量密度,获得了稳定的连续波锁模,锁模脉冲序列如图 3(a)所示. 触碰光纤及敲击光学平台都不会对锁模造成影响,体现了偏振光纤优良的环境稳定性. 重新打开激光器,只需要恢复抽运功率就可以获得稳定锁模运转. 输出平均功率最高达到 700 mW,单脉冲能量为 14.6 nJ. 继续增加抽运功率,增强的非线性效应导致孤子分裂,激光器跳变到双脉冲的稳定运转,如图 3(b)所示,输出平均功率达 1.1 W,重复频率变为原来的 2 倍.

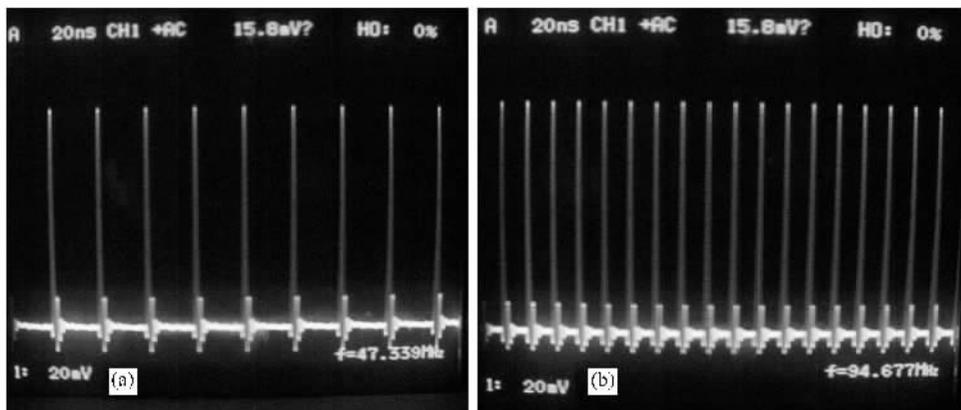


图 3 激光器的时域锁模脉冲序列 (a)激光器处于单脉冲运转状态下的锁模脉冲序列;(b)激光器处于双脉冲运转状态下的锁模脉冲序列

测量得到的激光器在单脉冲稳定运转时的输出光谱如图 4 所示. 由图中可以看出,光谱的中心波长为 1038 nm,3 dB 带宽为 6 nm. 对数坐标下的光谱具有明显的成对出现的 Kelly 边带<sup>[11]</sup>,这是激光器的周期性输出对孤子波的调制引起,是孤子锁模的典型特征. 激光器输出脉冲的自相关曲线如图 5 所示,利用双曲正割函数拟合,脉冲宽度为 518 fs. 脉冲的时间带宽积为 0.87,是变换极限的 2.76 倍,通过进一步优化腔内色散,可以获得更窄的脉冲.

### 4. 结 论

利用掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤实

现了稳定的孤子锁模,获得了平均功率为 700 mW,单脉冲能量为 14.8 nJ,脉冲宽度为 518 fs 的脉冲输出. 大模场面积光子晶体光纤的无截止单模特性使激光输出获得衍射极限的光束质量,而它的偏振保持特性显著提高了激光器的环境稳定性. 这种孤子锁模的大模场面积光子晶体光纤激光器已成功用作太赫兹时域光谱系统的激励源,获得了近单周期的超宽太赫兹波<sup>[12]</sup>. 这种光纤激光器同样也可以应用在飞秒激光光纤放大系统、飞秒激光微纳加工、基于参量过程的纠缠光子对产生等诸多领域. 当然,孤子锁模的光纤激光器的脉冲能量最终还是受到光纤非线性的限制,难以继续提高. 利用色散管理孤子锁模及自相似锁模机理,可以进一步提高大模场面

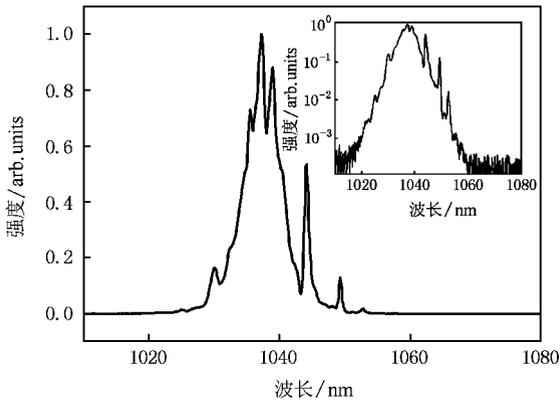


图 4 激光器输出的脉冲频谱,内插图为对数坐标下的频谱

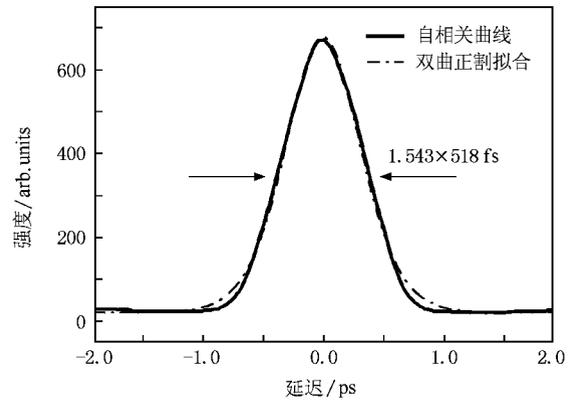


图 5 激光器输出脉冲的自相关曲线

积光子晶体光纤激光器的单脉冲能量,使得从光纤振

荡级直接输出微焦耳量级飞秒激光脉冲成为可能.

- [ 1 ] Fermann M E , Galvanauskas A , Sucha G 2002 *Ultrafast Lasers : Technology and Applications* ( New York : Marcel Dekker ) p89
- [ 2 ] Kelly S M J , Smith K , Blow K J , Doran N J 1991 *Opt. Lett.* **16** 1337
- [ 3 ] Tang Y , Han Y H 2000 *Chin. Phys.* **9** 565
- [ 4 ] Tamura K , Nelson L E , Haus H A , Ippen E P 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 149
- [ 5 ] Russell P 2003 *Science* **299** 358
- [ 6 ] Moenster M , Glas P , Iliew R , Wedell R , Steinmeyer G 2006 *IEEE Photonic Tech. Lett.* **18** 2502
- [ 7 ] Limpert J , Liem A , Reich M , Schreiber T , Nolte S , Zellmer H , Tmmermann A , Broeng J , Petersson A , Jakobsen C 2004 *Opt.*

*Express* **12** 1313

- [ 8 ] Ortac B , Limpert J , Tmmermann A 2007 *Opt. Lett.* **32** 2149
- [ 9 ] Song Y J , Hu M L , Liu Q W , Li J Y , Chen W , Chai L , Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** ( in Chinese ) [ 宋有建、胡明列、刘庆文、李进延、陈伟、柴路、王清月 2008 物理学报 **57** ]
- [ 10 ] Schreiber T , Röser F , Schmidt O , Limpert J , Iliew R , Lederer F , Petersson A , Jacobsen C , Hansen K P , Broeng J , Tmmermann A 2005 *Opt. Express* **13** 7621
- [ 11 ] Kelly S M J 1992 *Electron. Lett.* **28** 806
- [ 12 ] Song Y J , Hu M L , Wang C L , Tian Z , Xing Q R , Chai L , Wang C Y 2008 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **20** 1088

# High energy femtosecond soliton mode-locking laser based on Yb-doped single polarization large-mode-area photonic crystal fiber<sup>\*</sup>

Song You-Jian Hu Ming-Lie<sup>†</sup> Liu Bo-Wen Chai Lu Wang Qing-Yue

( *Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education , College of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering , Tianjin University , Tianjin 300072 , China* )

( Received 30 January 2008 ; revised manuscript received 5 March 2008 )

## Abstract

A high energy femtosecond fiber laser based on Yb-doped single polarization large-mode-area photonic crystal fiber is demonstrated. A simple linear laser cavity is used. The laser works in soliton mode-locking regime due to the negative dispersion generated by a pair of gratings implemented in the cavity , while the self-starting mode-locking operation is achieved by semiconductor saturable absorber mirror. The fiber laser directly generates 518 fs laser pulses with the average power of 700 mW at the repetition rate of 47.3 MHz( corresponding to a pulse energy of 14.8 nJ ). The single pulse energy is two orders higher than that of conventional soliton mode-locking fiber laser.

**Keywords** : photonic crystal fiber , femtosecond , fiber laser , soliton mode locking

**PACC** : 4281W , 4280W , 4260D

---

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China( Grant Nos. 2003CB314904 , 2006CB806002 ) , the National High Technology Research and Development Program of China( Grant No. 2007AA03Z447 ) , the National Natural Science Foundation of China( Grant No. 60678012 ) , the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China( Grant Nos. 20070056083 , 20070056073 ) and the Program for New Century Excellent Talents of Ministry of Education , China( Grant No. NCET-07-0597 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : huminglie@tju.edu.cn