

# 基于非线性偏振旋转锁模的高功率光子晶体 光纤飞秒激光振荡器\*

张大鹏 胡明列† 谢辰 柴路 王清月

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

(2011年3月28日收到; 2011年5月12日收到修改稿)

为了探索大模场面积光子晶体光纤锁模激光器在全正色散锁模域内的耗散孤子锁模机理, 以获得更大的单脉冲能量和更高的峰值功率, 本文搭建了以掺镱大模场面积光子晶体光纤作为增益介质的耗散孤子锁模激光器. 激光器使用环形腔结构, 利用非线性偏振旋转以及滤光片提供的耗散作用实现了稳定的锁模运转. 实验中, 从激光器振荡级直接获得了平均功率 10 W, 重复频率 49.09 MHz(对应 202 nJ 的单脉冲能量), 脉冲宽度为 1.03 ps 的稳定锁模脉冲输出, 经过腔外色散补偿得到的脉冲宽度为 95.5 fs.

**关键词:** 光子晶体光纤, 飞秒, 光纤激光器, 非线性偏振旋转

**PACS:** 42.81.Qb, 42.55.Wd

## 1 引言

飞秒激光在超快过程探测、生物光子学、飞秒激光微纳加工等科学技术领域有着广泛的研究价值和潜力<sup>[1,2]</sup>. 长期以来, 具有超宽增益谱、超短脉冲输出的钛宝石飞秒激光器一度是超快科学领域中的主力军<sup>[3,4]</sup>, 但是由于它对抽运源的光束质量以及功率稳定性的要求极高, 对超净环境过度依赖, 运行成本和维护成本高等原因, 促使人们不断地寻找着具有高稳定性、低运行成本、输出指标相当的飞秒激光源. 其中光纤锁模激光器<sup>[5]</sup>因其具有以上优点而成为超快激光研究领域的热点. 但传统光纤激光器由于受制于较小的纤芯面积引入的高非线性导致了脉冲能量始终无法与传统的固体激光器相比拟<sup>[6]</sup>. 光子晶体光纤(PCF)的出现在很大程度上解决了这一问题, PCF的无截止单模特性使得这种光纤可以提供高出普通光纤两个数量级的单模场面积, 通过提高单模场面积降低光纤非线性可以使以PCF作为增益介质的光纤锁模激光器输出的单脉冲能量得到大幅度提高<sup>[7]</sup>. 特别是掺镱的石英光纤具有小于10%的量子缺陷, 从而支持超过80%的光—光转换效率, 而日益成熟

的双包层技术允许光纤利用大功率多模LD直接抽运, 使得掺镱光纤尤其适合开发高能量的激光系统. 从而为开创具有结构简单、成本低廉、操作方便和易于普及的新一代飞秒激光技术开辟了一条崭新的途径<sup>[8]</sup>. 因此最近几年, 掺镱大模面积PCF飞秒激光器越来越受到研究者的青睐. 经过研究人员的不断努力, 这种激光器的性能指标持续提高. 文献[9]利用PCF作为增益介质的呼吸孤子锁模激光器, 得到了500 fs, 16.5 nJ的脉冲激光输出. 文献[10]利用偏振型大模场面积PCF搭建了直接输出脉冲宽度600 fs, 单脉冲能量19 nJ的呼吸孤子锁模激光器且具有非常高的环境稳定性. 这说明了基于PCF的光纤锁模激光器的输出指标有着进一步提高的空间. 最近几年的研究证明, 全正色散光纤锁模激光器由于支持啁啾脉冲运转, 在时域上将脉冲展宽并降低脉冲的峰值功率<sup>[11]</sup>, 可以支持更高的单脉冲能量. 文献[12]利用纤芯直径29  $\mu\text{m}$ 的偏振型大模场面积PCF搭建了运转在全正色散域内的锁模激光器, 可以得到脉冲宽度4.2 ps, 单脉冲能量50 nJ的输出. Frank Wise小组提出在全正色散光纤锁模激光器中引入滤光片提供耗散机理来实现耗散孤子锁模<sup>[13,14]</sup>, 利用这种机理在普通双包层

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB808101, 2010CB327604), 国家自然科学基金(批准号: 61078028, 60838004), 全国优秀博士学位论文作者专项资金(批准号: 2007B34)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20110032110056)资助的课题.

† E-mail: huminglie@tju.edu.cn

光纤锁模激光器中获得了 31 nJ, 4.5 ps 的输出 [15]. 文献 [16] 利用 PCF 实现了耗散孤子锁模输出, 得到了单脉冲能量 20 nJ, 脉冲宽度 777 fs 的结果. 但是这种激光器受限于半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 的损伤阈值, 会在高功率输出时出现多脉冲运转. 文献 [17] 基于 PCF 的激光器中实现了非线性偏振旋转耗散孤子锁模输出, 获得了单脉冲能量 142 nJ, 压缩后脉冲宽度 115 fs 的脉冲. 为了探索这种锁模机理的稳定性和更高的输出指标, 本文基于大模场面积 PCF, 利用非线性偏振旋转以及滤光片的耗散机理实现了全正色散域内耗散孤子锁模的稳定运转. 获得平均功率 10 W, 单脉冲能量 202 nJ, 脉冲宽度 1.03 ps 的直接输出. 脉冲经过腔外压缩, 脉宽达到 95.5 fs, 并具有优异的环境稳定性.

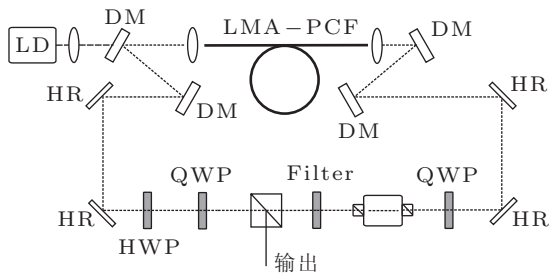


图1 激光器实验装置示意图 (LD 为 976 nm 激光二极管; LMA-PCF, 大模场面积光子晶体光纤; DM, 双色镜; HR, 45° 全反镜; HWP, 半波片; QWP, 四分之一波片; PBS, 偏振分束器; Filter, 滤光片)

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示. 激光器使用环形腔结构. 利用 2.2 m 长的掺镱大模场面积单模 PCF(DC-170-40-Yb-2) 作为增益介质. 这种光纤的纤芯单模场直径为 30  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.03. 光纤内包层直径为 170  $\mu\text{m}$ , 数值孔径约为 0.62, 可以有效地传输

波长为 976 nm 的抽运光. 该光纤对 976 nm 的抽运光具有 13 dB/m 的吸收系数. 实验中利用大功率激光二极管作为抽运源. 抽运光通过非球面透镜耦合进大模场面积 PCF. 实验过程中为了保证稳定的锁模运转, 光纤端面均被打磨成 8° 以避免由于光纤端面反馈而形成的自激振荡.

PCF 中传输的激光通过非球面透镜耦合输出到自由光路, 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抽运光与激光. 为保证激光在腔内单方向运转, 实验过程中使用了隔离度为 40 dB 的高功率隔离器. 隔离器前放置滤波带宽 6 nm 的干涉型滤光片提供耗散作用. 光纤中的非线性偏振演化通过波片和偏振分束器转化成为振幅的调制作用. 实验过程中, 通过调整波片可实现稳定的锁模运转.

## 3 实验结果与分析

激光器内没有使用任何色散补偿元件, 工作在全正色散锁模域. 随着抽运功率的提高, 调整腔内的波片, 可以在激光器输出达到 2 W 时在示波器上观察到明显的调 Q 锁模现象. 进一步提高抽运功率到 15 W 时, 适当地转动波片, 获得了稳定的连续波锁模, 激光器以 49.09 MHz 的重复频率输出稳定的脉冲序列, 平均功率达到 3.5 W. 继续增加抽运功率, 激光器的输出功率不断提高, 当抽运功率为 28 W 时, 激光器输出的平均功率达到 10 W, 单脉冲能量为 202 nJ. 激光器的锁模光谱随着输出功率的提高不断展宽, 光谱有着明显的自相位调制的特点, 中心波长为 1038 nm. 在输出功率为 6 W 时, 光谱的 3 dB 带宽为 26.1 nm, 光谱形状如图 2(a) 所示, 随着激光器输出功率的增加, 光谱不断展宽, 如图 2(b) 所示.

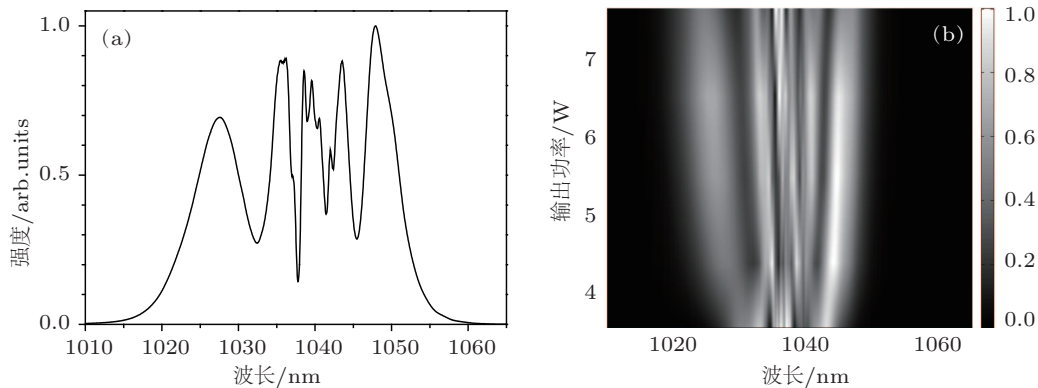


图2 激光器输出光谱 (a) 激光器平均输出 6 W 的锁模光谱; (b) 锁模光谱随输出功率的变化

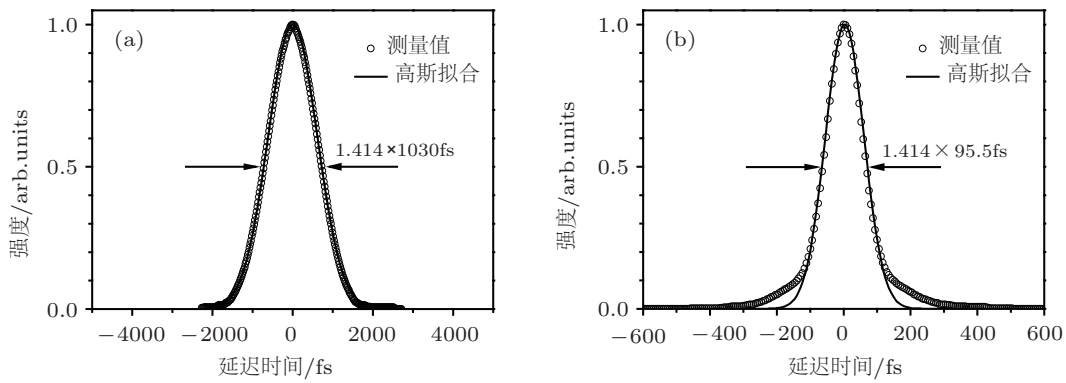


图3 激光器直接输出脉冲 (a) 和压缩后脉冲 (b) 的自相关曲线

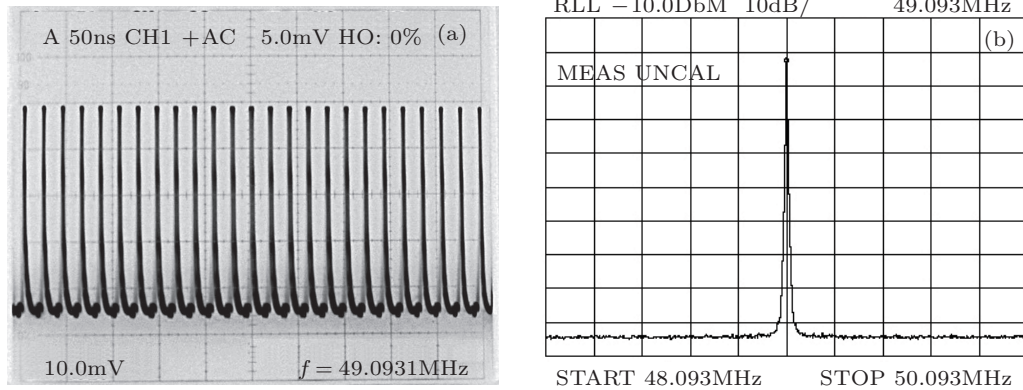


图4 激光器稳定性 (a) 锁模脉冲序列; (b) RF 射频频谱

激光器输出的脉冲自相关曲线如图 3(a) 所示, 利用高斯脉冲拟合, 直接输出的脉冲宽度是 1.03 ps. 利用腔外光栅对将输出的脉冲进行了有效压缩, 压缩后的脉冲宽度为 95.5 fs. 压缩后的自相关曲线如图所示 3(b) 所示.

实验过程中, 使用了快响应速度的光电二极管配合示波器监测锁模脉冲序列, 如图 4(a) 所示输出脉冲重复频率 49.09 MHz. 为了说明激光器的稳定性, 利用高分辨率的频谱分析仪 (Agilent) 测量了锁模脉冲序列的射频噪声谱如图 4(b) 所示, 锁模的信噪比超过了 80 dB.

从以上实验结果中可以看到基于 PCF 的非线性偏振旋转耗散孤子锁模的优势所在. 传统的耗散孤子锁模激光器利用 SESAM 和滤光片在时域和频域对脉冲进行窄化<sup>[16]</sup>, 但是由于 SESAM 本身的半导体材料特性, 使它在高功率下容易损坏, 限制了激光器性能的提升. 然而, 利用非线性偏振旋转锁模则避免了这种不足, 可以支持更高功率的运转. 该激光器腔内脉冲的整形过程来自于成非线性偏振旋转等效的快可饱和吸收效应. 首先从初始的噪声中提取出较强的脉冲, 脉冲经过 PCF 得到增益,

能量不断增大, 在自相位调制效应作用下积累较大的非线性相移, 同时将光谱展宽. 由于光纤中的正色散, 使脉冲具有了低频的前沿和高频的后沿. 从光纤中出射的脉冲经过 NPR 元件, 在其等效可饱和吸收作用下得到一定窄化, 同时经过偏振分光棱镜输出了大部分能量. 然后当脉冲经过窄带滤光片时, 其积累在两沿的高、低频谱成分被耗散掉<sup>[18]</sup>. 脉冲通过滤光片后再次进入 PCF 中, 完成一个腔循环. 经过几次往复, 腔内所有整形机理达到平衡, 实现自洽, 激光器达到稳态, 形成稳定的锁模脉冲. 实验中使用的光纤较长, 脉冲的单脉冲能量较大, 可以在光谱上观察到明显的自相位调制现象, 并且随着激光器抽运功率的增加, 输出功率不断变大, 光谱的展宽愈发明显, 如图 2 所示. 基于这种腔内增强的自相位调制获得了较宽的光谱, 因此输出的脉冲才能够压缩短至 100 fs 以下. 激光器的输出指标已经达到了当前腔型结构下的最优化程度, 目前激光器的输出功率主要受到了抽运源功率的限制, 后续的实验将通过更换更大功率的抽运源和降低激光器的重复频率来进一步提高单脉冲能量. 实验中选取了带宽 6 nm 的滤光片不仅可以非常有效

的实现脉冲窄化,还可以将腔内的非线性控制在合理的范围内,保证锁模的稳定运转,获得良好的脉冲质量.

## 4 结论

本文基于掺镱大模场面积 PCF, 搭建了工作在全正色散域内的耗散孤子锁模激光器. 实验

获得了平均功率 10 W, 脉冲宽度 1.03 ps, 重复频率 49.09 MHz 的锁模脉冲输出, 对应的单脉冲能量 202 nJ. 脉冲经过腔外光栅对的色散补偿得到了 95.5 fs, 信噪比大于 80 dB 的结果. 这种激光器的单脉冲能量大, 峰值功率高, 可以在超连续飞秒光源, 光学频率梳, 小型化太赫兹等研究领域有着非常好的前景.

- 
- [1] Baum S, Lochbrunner S, Riedle E 2004 *Opt. Lett.* **29** 1686
  - [2] Zhu J F, Ling W J, Wang Z H, Wang P, Sun J H, Wei Z Y, Zhang D C, Ma X W, Zhang W L 2007 *Appl. Opt.* **46** 6228
  - [3] Haus H A 2000 *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron* **6** 1173
  - [4] Spence D E, Kean P N and Sibbett W 1991 *Optics Letters* **16** 42
  - [5] Fu S G, Fan W D, Zhang Q, Wang Z, Li L J, Zhang C S, Yuan S Z, Dong X Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4262 (in Chinese) [付圣贵, 范万德, 张强, 王志, 李丽君, 张春书, 董孝义 2004 物理学报 **53** 4262]
  - [6] Song Y J, Hu M L, Liu Q W, Li J Y, Chen W, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5045 (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** 5045]
  - [7] Limpert J, Li A, Reich M, Schreiber T, Nolte H, Zellmer H, Tünnemann A, Broeng J, Petersson A, Jakobsen C 2004 *Opt. Express*. **12** 1313
  - [8] Song Y J 2009 *Ph. D Dissertation* (Tianjin University)(in Chinese) [宋有建 2009 博士学位论文 (天津: 天津大学)]
  - [9] Ortac J, Limpert A, Tünnemann A 2007 *Opt. Lett.* **32** 2149
  - [10] Song Y J, Hu M L, Wang C L, Tian J I, Xing E R, Chai L, Wang Q Y 2008 *IEEE Photo. Tech. Lett.* **20** 1088
  - [11] Chong A, Buckley J, Renninger W, Wise F 2006 *Opt. Express*. **14** 10095
  - [12] Song Y J, Hu X L, Zhang C, Zhao L, Wang Q Y 2008 *Chin. Sci. Bull.* **53** 3741
  - [13] Renninger W H, Zhang A, Wise F W 2008 *Phys. Rev. A* **77** 023814
  - [14] Liu X M 2009 *Opt. Express*. **17** 22401
  - [15] Kieu K, Renninger W H, Zhang A, Wise F W 2009 *Opt. Lett.* **34** 593
  - [16] Zhang X, Hu M L, Song Y J, Chai L, Wang Q Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1863 (in Chinese) [张鑫, 胡明列, 宋有建, 柴路, 王清月 2010 物理学报 **59** 1863]
  - [17] Lefrançois S, Kieu K, Deng Y J, Kafka J D, Wise F W 2010 *Opt. Lett.* **35** 1569
  - [18] Wang L R, Liu X M, Gong Y K 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6200 (in Chinese) [王播然, 刘雪明, 宫永康 2010 物理学报 **59** 6200]

# A high power photonic crystal fiber laser oscillator based on nonlinear polarization rotation mode-locking\*

Zhang Da-Peng Hu Ming-Lie<sup>†</sup> Xie Chen 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 28 March 2011; revised manuscript received 12 May 2011)

## Abstract

A high power femtosecond fiber laser based on a Yb-doped large mode area photonic crystal fiber operating in an all-normal dispersion regime is experimentally demonstrated. A ring laser cavity is used without any elements for dispersion compensation. Stable mode-locking is achieved through nonlinear polarization rotation and the dissipative function of a filter. The laser directly outputs 1.03 ps chirped pulses at a 49.09 MHz repetition rate for an average power of 10 W, corresponding to a pulse energy of 202 nJ. The pulses are compressed to 95.5 fs with a grating pair outside the cavity.

**Keywords:** photonic crystal fiber, femtosecond, fiber laser, nonlinear polarization rotation

**PACS:** 42.81.Qb, 42.55.Wd

---

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2011CB808101 and 2010CB327604), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60838004 and 61078028), the Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation (Grant No. 2007B34), and the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education of China (Grant No. 20110032110056).

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