

多芯光子晶体光纤锁模激光器*

方晓惠 胡明列[†] 宋有建 谢 辰 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)

(2010年7月22日收到; 2010年8月21日收到修改稿)

实验研究了基于掺 Yb 多芯大模场面积光子晶体光纤的全正色散锁模激光器. 增益光纤的 18 个纤芯呈六角阵列排布, 等效的模场直径约为 $52 \mu\text{m}$. 激光器基于 σ 腔结构, 腔内没有色散补偿元件, 通过半导体可饱和吸收镜实现锁模的自启动. 实验获得了平均功率为 3.3 W , 脉冲宽度为 4.92 ps , 重复频率为 44.68 MHz 的锁模脉冲输出, 对应的单脉冲能量为 74 nJ , 脉冲经腔外光栅对压缩为 780 fs .

关键词: 光子晶体光纤, 多芯, 光纤激光器, 全正色散

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Fc, 06.60.Jn

1. 引言

高能量飞秒脉冲源在强场物理、激光微纳加工、非线性频率变换、太赫兹波产生等诸多方面有着重要的应用. 20 世纪 90 年代初发展起来的钛宝石激光系统由于支持高功率、高能量、短脉冲的激光输出, 同时具有明显优于染料激光器的稳定性, 已成为应用范围最广泛的固体激光技术^[1]. 但是, 钛宝石激光系统需要高光束质量的抽运系统, 同时抽运光-激光转换效率很低, 系统成本相对很高. 近年来, 很多新型的晶体相继出现, 如 Yb: YAG^[2], Cr: LiSAF^[3] 等, 可以利用 LD 直接抽运, 激光效率得到很大提高. 然而, 块状晶体的表面积-体积比太小, 使得高功率下的热应力问题难以避免. 同时固体激光系统的复杂性使得固体锁模激光器很难脱离实验室的超净环境运转, 严重地限制了飞秒激光的应用范围. 相比于固体激光器, 光纤激光器具有结构紧凑、成本低廉、高的光束质量、好的散热效果、高的转换效率等诸多优势, 近年来逐渐成为研究热点, 并有可能成为普及化的飞秒激光技术.

光纤激光器将光束缚在光纤纤芯里, 大大增强

了环境稳定性, 但同时较长的作用距离使得高功率下锁模运转受到非线性的限制. 大模场面积光子晶体光纤^[4, 5]可以在极大的提高光纤纤芯直径的同时保持单模, 有效地降低非线性, 从而提高锁模光纤激光器的单脉冲能量. 2009 年, Ortaç 等^[6]利用模场直径高达 $80 \mu\text{m}$ 的棒状光子晶体光纤, 获得了单脉冲能量接近微焦的锁模脉冲输出. 为了进一步提高光纤的模场面积, 复芯光纤^[7]和多芯光纤^[8-10]也相继发展起来. 复芯光纤已经实现了模场直径达 $37 \mu\text{m}$ 的基模传输并实现了负色散域的锁模运转^[11]. 多芯光纤的模场面积可以随着纤芯数量的增加而成比例的增加^[12]. Michaille 等^[13]报道了等效模场直径高达 $70 \mu\text{m}$ 的 6 芯光子晶体光纤, 更大模场面积的 7 芯^[14]、18 芯^[15]、19 芯^[16]等光纤也相继提出. 多芯光纤由于纤芯之间的相互耦合, 支持多个超模传输, 且超模数量与纤芯数量一致, 但是只有同相位超模具有很好的远场 Gauss 分布^[17]. 因此, 目前关于多芯光纤的实验研究还主要集中在各个纤芯之间的相位锁定上, 但是理论模拟证明多芯光纤中的锁模运转是可行的^[18]. 本文基于掺 Yb 双包层 18 芯光子晶体光纤, 利用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 实现了全正色散域^[19, 20]自启动锁模, 获

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB327604, 2011CB808101)、国家自然科学基金 (批准号: 60838004, 61078028)、教育部科学技术研究计划重点项目 (批准号: 108032)、全国优秀博士学位论文作者专项基金 (批准号: 2007B34) 和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.

[†] 通讯联系人. E-mail: huminglie@tju.edu.cn

得平均功率为 3.3 W. 经腔外色散补偿, 脉冲宽度达 780 fs, 并且具有很好的环境稳定性.

2. 实验装置

实验装置如图 1 所示, 激光器基于 σ 腔结构. 增益介质为 1.5 m 长的 18 芯掺 Yb 大模场面积光子晶体光纤 (Crystal Fiber A/S, 丹麦), 光纤端面如图 2 所示. 光纤为双包层结构, 内包层的空气孔六角形周期排布, 内包层直径为 253 μm , 数值孔径为 0.6. 内包层周期结构中的空气孔缺失缺陷形成纤芯, 此光纤总共有 18 个纤芯. 每个空气孔直径为 4 μm , 空气孔间距为 10 μm , 对应每个纤芯的基模模场直径为 15 μm . 由于第二层纤芯强度约为第一层纤芯强度的 0.7 倍, 所以 18 个纤芯总的模场直径约为 52 μm . 光纤两端都进行塌陷并研磨成 8° 角, 以防止自激振荡激光的产生.

大模场面积光子晶体光纤中的激光由非球面透镜耦合输出到自由光路, 并利用对波长为 976 nm 的抽运光高透, 对波长 λ 为 1040 nm 的激光高反的双

色镜分离激光和抽运光. 隔离度为 45 dB 的隔离器保证了激光脉冲的单向运转. 启动锁模的 SESAM 基于 GaAs/AlAs Bragg 反射镜上低温分子束外延技术生长的 InGaAs 量子阱结构. 在 1040 nm 附近的线性吸收率为 35%, 调制深度为 26%, 吸收恢复时间小于 3 ps. 通过一个 $\lambda/2$ 波片和偏振分光棱镜 (PBS) 来调整入射到 SESAM 上的能量. 激光经过 PBS, 由非球面透镜聚焦至 SESAM, 并在二者之间插入 $\lambda/4$ 波片, 这样被 SESAM 反射的激光偏振态旋转 90° , 从 PBS 反射端导出, 利用非球面透镜耦合回光子晶体光纤. 激光腔内另外的 3 个波片, 分别是隔离器前的一个 $\lambda/2$ 波片和 $\lambda/4$ 波片以及光子晶体光纤输入端的 $\lambda/4$ 波片, 用来调整激光偏振状态, 引入非线性偏振旋转机理稳定锁模运转. 激光器有效腔长约为 6.7 m, 使得锁模脉冲序列的重复频率为 44.68 MHz. 腔内没有使用色散补偿元件以及滤波片等耗散元件. 激光由隔离器的一端射出, 经腔外光栅对压缩后输出, 光栅对为每毫米 1200 线的透射式光栅, 接近 Littrow 角入射, 4 次通过光栅对的效率为 74%.

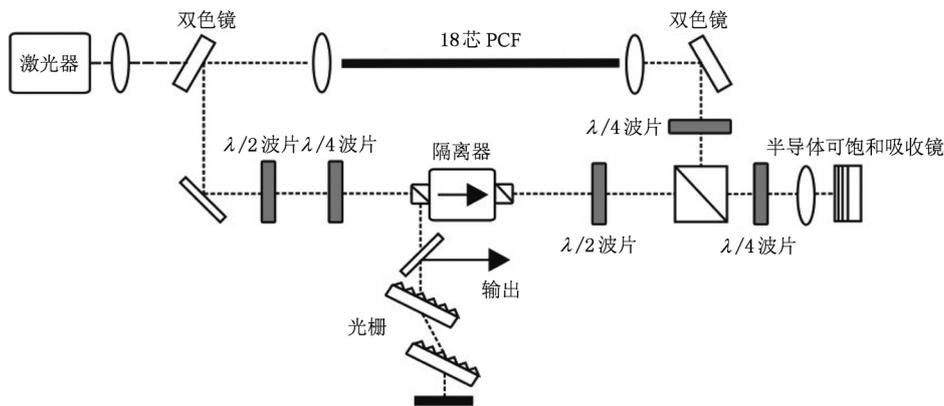


图 1 激光器实验装置示意图

3. 实验结果

通过增加抽运功率, 仔细调整 SESAM 上的会聚光斑大小以及波片的角度, 实现了稳定的锁模运转. 图 3 为激光器输出功率随抽运功率的变化曲线. 抽运功率为 13 W 时, 获得了 1.5 W 的稳定锁模脉冲输出, 增加抽运功率, 同时适当调整波片角度, 最高可获得 3.3 W 的输出, 并保持稳定的锁模运转. 继续增加抽运功率, 锁模出现不稳定, 调整 SESAM

上的光斑大小以及波片的角度都无法得到稳定的锁模序列. 光谱出现强的窄带峰值成分意味着此时自激振荡在高功率抽运下已经难以避免. 图 4 为光束质量分析仪测得的多芯光纤输出的光斑的远场分布. 从图 4 可以看出, 具有很好的 Gauss 分布, 表明实现了同相位超模运转^[21]. 各个纤芯之间的相位锁定一方面是纤芯之间渐消场耦合的作用, 另一方面只有同相位超模具有最小的聚焦光斑, 对应最大的能量密度, SESAM 的可饱和吸收作用也促进了各个纤芯之间的相位锁定.

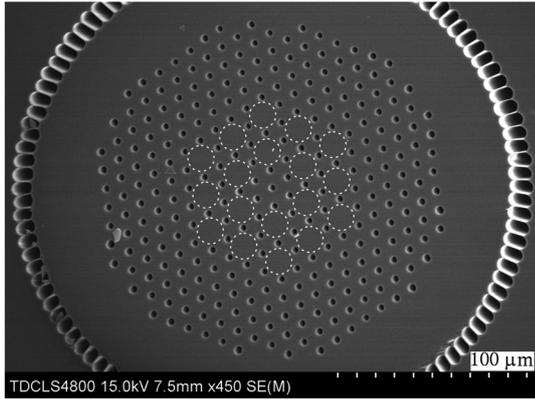


图2 多芯光子晶体光纤端面电子扫描显微镜图像 图中白色曲线指示出纤芯区域

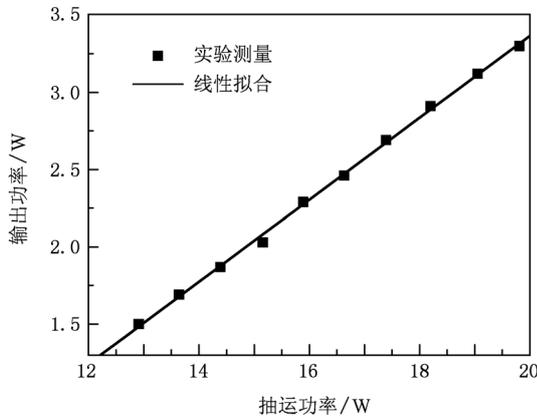


图3 激光器输出功率随抽运功率的变化关系

激光器在单脉冲稳定运转时的输出光谱如图5所示,光谱形状为典型的全正色散锁模光谱,中心波长为1040.6 nm,3 dB 带宽为2.59 nm. 激光器输出脉冲的自相关曲线如图6所示,利用 Gauss 脉冲

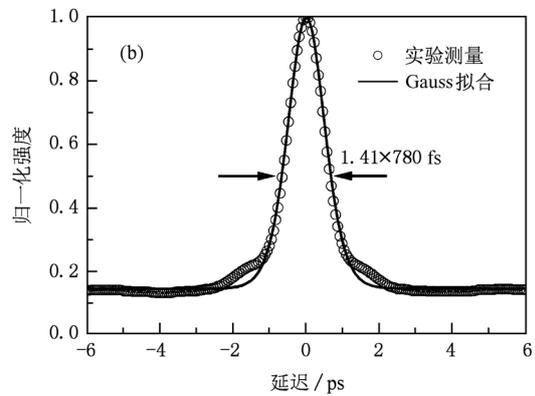
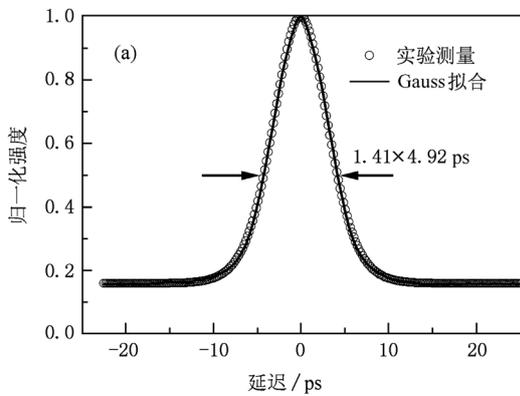


图6 激光器直接输出脉冲和压缩后脉冲的自相关曲线 (a)直接输出脉冲,(b)压缩后脉冲

拟合,直接输出脉冲宽度为4.92 ps,经腔外光栅对可压缩至780 fs.脉冲的时间带宽积是0.56,为变换极限的1.27倍,说明腔内非线性啁啾很小.

为了说明激光器的稳定性,进一步用示波器测量了脉冲序列,用高分辨率的频谱分析仪(Agilent)测量了脉冲序列一次谐波的功率谱,分别如图7(a)和(b)所示.稳定锁模的重复频率为44.68 MHz,锁模的噪声抑制比达到70 dB.

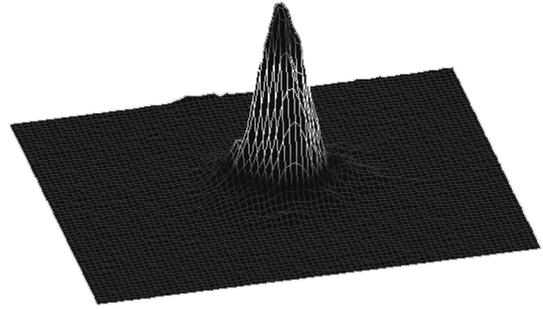


图4 激光器输出的远场模式分布

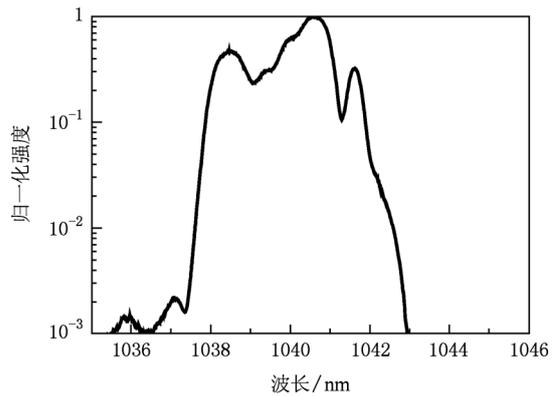


图5 激光器输出的脉冲光谱

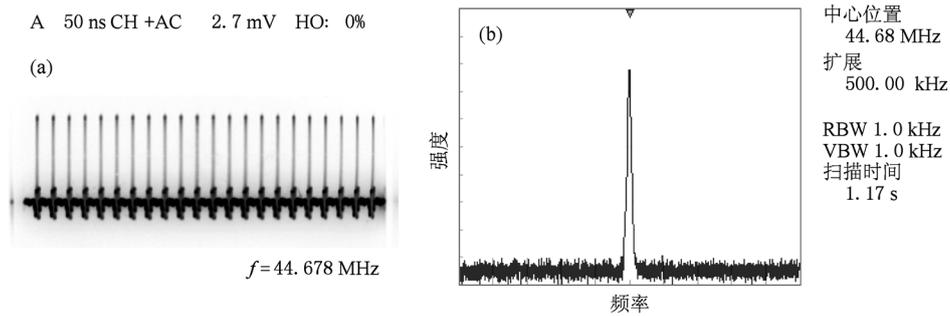


图7 激光器的稳定性测量 (a)锁模脉冲序列,(b)脉冲序列一次谐波的功率谱

4. 结 论

基于掺 Yb 多芯大模场面积光子晶体光纤,搭建了全正色散锁模的飞秒光纤激光器. 实验获得了平均功率为 3.3 W, 脉冲宽度为 4.92 ps, 重复频率为 44.68 MHz 的锁模脉冲输出, 对应的单脉冲能量为 74 nJ, 脉冲经腔外光栅对压缩为 780 fs, 噪声的抑

制比达到 70 dB. 多芯光子晶体光纤的同相位超模对应远场具有很好的 Gauss 分布, 尤其是经过模式整形后的多芯光纤, 各个纤芯强度均匀分布, 模场面积可以随着纤芯数量的增加而成比例地增加, 同时保持光束质量几乎不变. 利用更多纤芯或单芯模场面积更大的多芯光子晶体光纤, 提高光纤的模场面积, 能进一步提升锁模光纤激光器的输出能量.

- [1] Spence D E, Kean P N, Sibbett W 1991 *Opt. Lett.* **16** 42
- [2] Marchese S V, Baer C R, Engqvist A G, Hashimoto S, Maas D J, Golling M, Südmeyer T, Keller U 2008 *Opt. Express* **16** 6397
- [3] Wagenblast P, Ell R, Morgner U, Grawert F, Kärtner F X 2003 *Opt. Lett.* **28** 1713
- [4] Furusawa K, Malinowski A, Price J, Monro T, Sahu J, Nilsson J, Richardson D 2001 *Opt. Express* **9** 714
- [5] Song Y J, Hu M L, Liu B W, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6425 (in Chinese) [宋有建、胡明列、刘博文、柴路、王清月 2008 物理学报 **57** 6425]
- [6] Ortaç B, Baumgartl M, Limpert J, Tünnermann A 2009 *Opt. Lett.* **34** 1585
- [7] Vogel M M, Abdou-Ahmed M, Voss A, Graf T 2009 *Opt. Lett.* **34** 2876
- [8] Wragé M, Glas P, Fischer D, Leitner M, Vysotsky D V, Napartovich A P 2000 *Opt. Lett.* **25** 1436
- [9] Fang X H, Hu M L, Li Y F, Chai L, Wang C Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2495 (in Chinese) [方晓惠、胡明列、栗岩锋、柴路、王清月 2009 物理学报 **58** 2495]
- [10] Wragé M, Glas P, Leitner M 2001 *Opt. Lett.* **26** 980
- [11] Ortaç B, Limpert J, Jetschke S, Unger S, Reichel V, Kirchof J, Tünnermann A 2010 *Appl. Phys. B* **98** 27
- [12] Cheo P K, King G G, Huo Y M 2004 *Conference on Fiber Lasers* San Jose, CA 24—29 January 2004 p106
- [13] Michaille L, Taylor D M, Bennett C R, Shepherd T J, Ward B G 2008 *Opt. Lett.* **33** 71
- [14] Fang X H, Hu M L, Liu B W, Chai L, Wang C Y, Zheltikov A M 2010 *Opt. Lett.* **35** 2326
- [15] Michaille L, Bennett C R, Taylor D M, Shepherd T J 2009 *IEEE J. Sel. Top Quantum Electron.* **15** 328
- [16] Huo Y M, Cheo P K, King G G 2004 *Opt. Express* **12** 6230
- [17] Zhou P, Wang X L, Ma Y X, Ma H T, Xu X J, Liu Z J 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 146
- [18] Fang X H, Hu M L, Li Y F, Chai L, Wang C Y 2010 *Chin. Sci. Bull.* **55** 1864
- [19] Liu X M 2009 *Opt. Express* **17** 9549
- [20] Wang L R, Liu X M, Gong Y K, Hu X H, Wang Y S, Lu K Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4664 (in Chinese) [王擂然、刘雪明、宫永康、胡晓鸿、王屹山、卢克清 2009 物理学报 **58** 4664]
- [21] Michaille L, Bennett C R, Taylor D M, Shepherd T J, Broeng J, Simonsen H R, Petersson A 2005 *Opt. Lett.* **30** 1668

Mode locked multi-core photonic crystal fiber laser*

Fang Xiao-Hui Hu Ming-Lie[†] Song You-Jian 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 22 July 2010; revised manuscript received 21 August 2010)

Abstract

A mode locked fiber laser based on Yb-doped large mode area photonic crystal fiber operating in the all-normal dispersion regime is experimentally studied. The eighteen cores of the gain fiber are arranged in array-type geometry with an equivalent mode diameter of about 52 μm . A sigma laser cavity is used without using any elements for dispersion compensation. Reliable self-starting mode-locking is achieved using a fast semiconductor saturable absorber mirror. The laser directly produces 4.92 ps chirped pulses at a 44.68 MHz repetition rate for an average power of 3.3 W corresponding to a pulse energy of 74 nJ. The pulses are compressed to 780 fs with a grating pair outside the cavity.

Keywords: photonic crystal fiber, multi-core, fiber laser, all-normal dispersion

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Fc, 06.60.Jn

* Project supported the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant Nos. 2010CB327604, 2011CB808101), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60838004, 61078028), the Key Program of Science and Technology Research of Ministry of Education of China (Grant No. 108032), the Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation of China (Grant No. 2007B34), and the Program for New Century Excellent Talents in Universities of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-07-0597).

[†] Corresponding author. E-mail: huminglie@tju.edu.cn