

# 亚百飞秒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<sup>\*</sup>

刘博文 胡明列<sup>†</sup> 宋有建 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 3 月 24 日收到 2008 年 5 月 12 日收到修改稿)

实验研究了掺镱双包层保偏大模面积光子晶体光纤飞秒激光放大器, 获得了平均功率达 16 W 的飞秒激光放大输出, 在 50 MHz 重复频率下, 对应的单脉冲能量达到 320 nJ. 增益光纤长 3.5 m, 由于自相位调制效应, 种子光脉冲光谱在放大过程中同时展宽, 从而支持更窄的脉冲宽度. 经过光栅后, 脉冲宽度压缩到了 85 fs. 系统中的振荡器和放大器基于同一种具有偏振结构的大模面积光子晶体光纤, 具有很好的环境稳定性和进一步集成的可能.

关键词: 光子晶体光纤, 大模场面积光纤, 飞秒激光, 光纤放大器

PACC: 0660J, 4255N, 4281H

## 1. 引 言

光纤激光器具有良好的散热特性和环境稳定性, 结构紧凑, 输出模式接近衍射极限, 并且可以由商用激光二极管(LD)直接抽运, 降低成本. 但是以传统双包层光纤为增益介质的锁模光纤激光器, 由于纤芯面积小, 飞秒脉冲在传输过程中积累非线性相移, 造成脉冲畸变, 而且纤芯无法承受高功率密度, 容易损坏. 因此长期以来, 飞秒光纤激光器输出的单脉冲能量和脉冲宽度等参数无法与传统固体激光器相比, 限制其在工业和科研领域的应用<sup>[1]</sup>. 而光子晶体光纤的出现为这一问题提供了解决方案. 光子晶体光纤的无截止单模特性能够在保持单模的同时, 提供很大的模场面积, 降低非线性效应; 并且外包层中的“空气包层结构(air cladding)”增大了内包层的数值孔径, 提高了抽运光的耦合效率. 这两种优势使得双包层大模面积光子晶体光纤开始应用于超短脉冲光纤激光放大器的研究<sup>[2]</sup>, 并极大地提升了锁模光纤激光系统的输出水平.

目前超短脉冲光纤放大器主要有啁啾脉冲放

大, 自相似放大等两种方式. 啁啾脉冲放大先将信号光脉冲展宽, 降低峰值功率, 避免破坏光纤端面, 减小在增益光纤中产生的非线性相移. 脉冲放大后, 再进行压缩得到高能量窄脉冲<sup>[3]</sup>. 2005 年 Limpert 等人利用以双包层掺镱大模面积光子晶体光纤作为增益介质的啁啾脉冲放大系统, 得到平均功率 131 W, 脉冲宽度 220 fs, 重复频率 73 MHz 的飞秒激光输出<sup>[4]</sup>. 2007 年该小组通过降低种子光的重复频率又进一步得到了单脉冲能量 1.45 mJ, 脉冲宽度 800 fs 的输出, 第一次在光纤脉冲激光器中得到毫焦耳量级的单脉冲能量<sup>[5]</sup>. 2008 年 Zaouter 等人利用光脉冲在放大器增益光纤中的非线性光谱展宽, 得到了脉冲宽度 49 fs 的飞秒脉冲, 是目前光纤放大器输出的最短脉冲<sup>[6]</sup>. 国内也相继开展了基于掺镱大模面积光子晶体光纤激光器的研究<sup>[7]</sup>, 振荡器获得了平均功率 700 mW, 重复频率 47.3 MHz, 脉冲宽度 518 fs 的孤子锁模脉冲输出<sup>[8]</sup>. 放大器得到了平均功率 14 W, 重复频率 50 MHz, 脉冲宽度 550 fs 的脉冲输出<sup>[9]</sup>. 本文进一步将放大之后的飞秒激光脉冲宽度压缩到百飞秒以下. 该系统中振荡级和放大级基于同一种掺镱保偏大模面积光子晶体光纤, 能够提高

<sup>\*</sup> 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), 教育部科学技术研究重点项目(批准号: 108032)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.

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

种子光到放大系统的耦合效率,并可以进一步集成.作为种子光的振荡级通过孤子锁模输出平均功率 320 mW,重复频率 50 MHz,脉冲宽度 554 fs.经过放

大级放大后,输出平均功率 16 W,在放大过程中由于自相位调制效应光谱获得展宽,经光栅压缩得到脉冲宽度 85 fs 的飞秒激光.

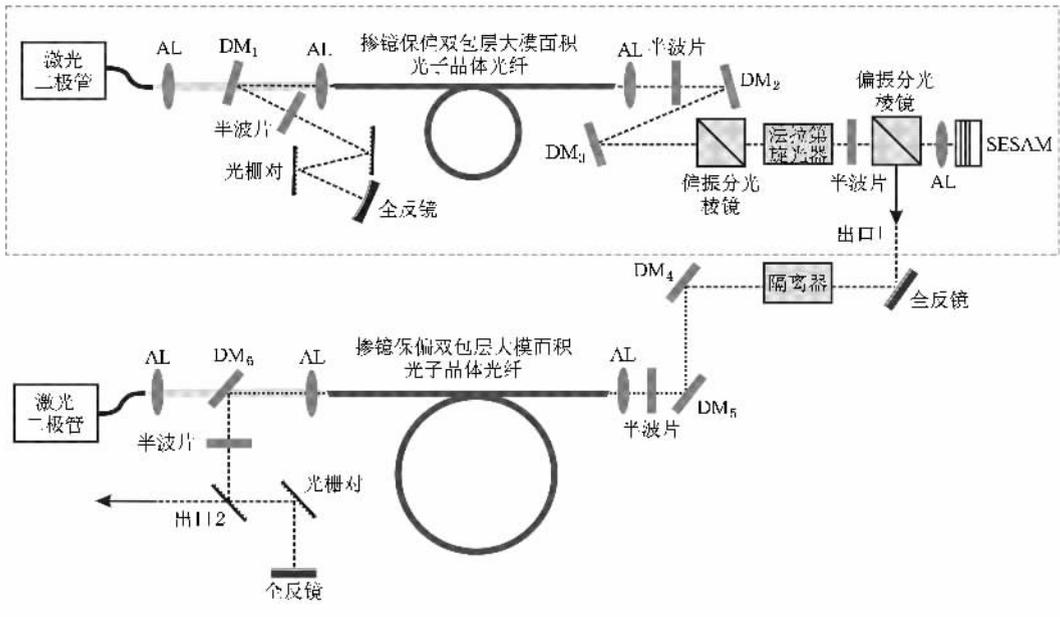


图1 实验装置图,其中 AL 为非球面镜,DM 为双色镜

## 2. 实验装置

光子晶体光纤飞秒激光系统装置如图 1. 框图中为振荡级部分,放大级采用后向抽运方式,使用波长为 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,经非球面镜(AL)耦合到增益光纤中.实验中使用掺镱保偏双包层大模场面积光子晶体光纤作为增益光纤,光纤端面如图 2 所示.最外环绕着一层“空气包层”作为外包层,该层中相邻空气孔之间支撑臂厚度为亚微米量级,使内包层获得高达 0.55 的数值孔径,这种抽运结构使得增益光纤具有 9 dB/m 的抽运光吸收系数.内包层直径 200  $\mu\text{m}$ ,分布六角形周期性排布的空气孔.空气孔中心区域为激光传输纤芯,模场直径 29  $\mu\text{m}$ (模场面积 660  $\mu\text{m}^2$ ),数值孔径 0.03.通过在光纤内包层中引入应力双折射材料,构成保偏结构,产生双折射,并使其中一个偏振态的折射率低于内包层等效折射率,不满足光纤内传输的弱导条件而被损耗掉,从而将基模的两个简并的正交偏振态分离,确保光纤仅支持单偏振模式传输<sup>[10]</sup>.实验中选用光纤的偏振消光比大于 10 dB,波长 1060 nm 附近的单偏振带宽大于 100 nm.光纤

两端都进行塌陷并打磨成  $8^\circ$  角,以防止自激振荡激光的产生.

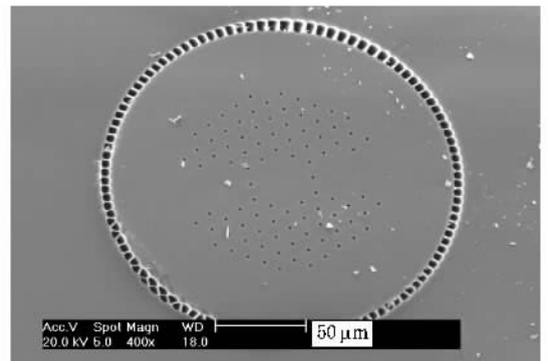


图2 掺镱保偏双包层大模场面积光子晶体光纤端面 ESEM 照片

振荡级的信号光经过隔离器和双色镜  $\text{DM}_4$ ,  $\text{DM}_5$  进入放大级,隔离器和双色镜都起隔离作用,前者防止信号光反馈进入振荡级,破坏锁模;后者对 976 nm 波长的光高透,1040 nm 波长的光高反,隔离残余抽运光.增益光纤具有保偏结构,所以在信号光通过非球面镜(AL)之前需经过半波片,用以调整入射光的偏振态,使之和增益光纤偏振轴一致.增益光纤长为 3.5 m,选择较长的光纤能够让信号光

在放大的同时,还能使光谱通过非线性效应得到展宽.抽运光透过双色镜  $DM_5$ ,经非球面镜耦合进入增益光纤, $DM_6$ 对976 nm波长的光高透,1040 nm波长的光高反,并能起到隔离的效果,防止信号光进入抽运源损害二极管激光器.该出射端的非球面镜既要提高抽运效率又要满足增益光纤输出的数值孔径匹配.输出的放大信号光由双色镜  $DM_6$ 反射,经过光栅对后压缩输出,光栅为600线/mm的闪耀光栅,表面镀金,接近于利特罗角入射时,对波长1040 nm激光的衍射效率大于90%.光栅的衍射效率对偏振敏感,需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.

### 3. 实验结果

振荡级采用孤子锁模方式,输出飞秒激光重复频率50 MHz,平均功率320 mW,脉冲宽度554 fs,光谱宽度6 nm,如图3所示.由于该振荡器输出端在增益光纤之后,经过增益光纤后光谱略有展宽,得到的光脉冲不是变换极限,时间带宽积为0.92,略大于双曲正割形状孤子脉冲的时间带宽积(0.315),经压缩后获得变换极限,脉冲宽度为165 fs.信号光透过隔离器之后功率为260 mW,由非球面镜耦合到放大级的增益光纤中,当抽运光功率为42 W时,输出功率为16 W,增益为18 dB,抽运效率为38%,如图4曲线a所示.信号光在放大的同时由于自相位调制效应(SPM)展宽光谱,能够支持更短的脉冲.输出光谱呈振荡的多峰结构,为典型的SPM效应导致的非线性展宽.当输出功率增大时,光谱峰的数目增加,外侧峰的强度不断增大,光谱随之展宽,如图5所示<sup>[11]</sup>.由于增益光纤为大模面积光纤,具有很低的非线性系数,而且SPM效应的阈值低于受激拉曼效应,因此在大功率运转时,除SPM效应外其他非线性过程相对较弱. SP M效应展宽光谱在脉冲中部产生线性相移,脉冲输出后由光栅压缩,能够获得比信号光更短的脉冲.随着光谱不断展宽,出射脉冲的压缩率提高,脉冲压缩得更窄,如图4曲线b所示.当抽运功率为42 W,输出功率可达16 W,光谱宽度展宽到35 nm,脉冲宽度压缩前为2.9 ps,压缩后为85 fs.由于抽运源的功率所限和压缩后脉冲基底的制约,抽运功率没有继续增加.图6为此输出功率下脉冲压缩后的自相关曲线,插图(a)为对应的8:1曲线,插图(b)为脉冲压缩前的自相关曲线.

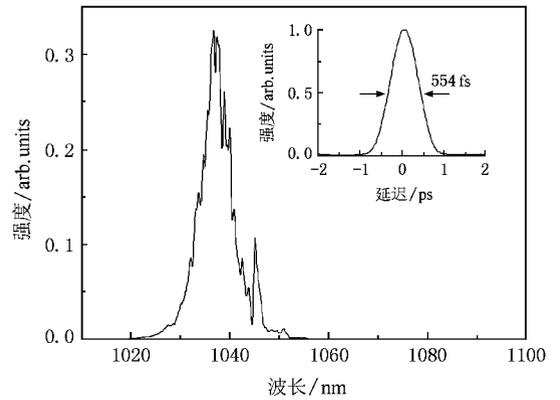


图3 振荡级输出脉冲光谱曲线(插图为输出脉冲时域自相关曲线)

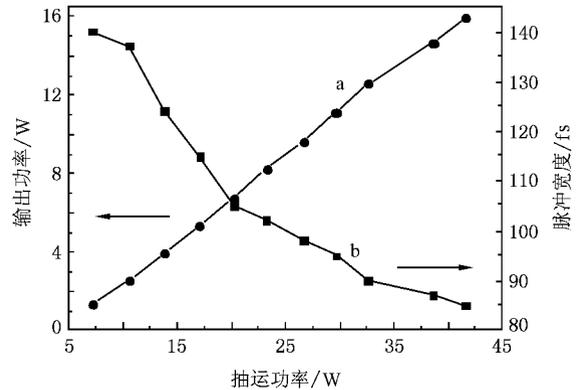


图4 曲线a为放大级输出平均功率随抽运功率变化曲线,曲线b输出光经压缩后脉冲宽度随抽运功率变化曲线

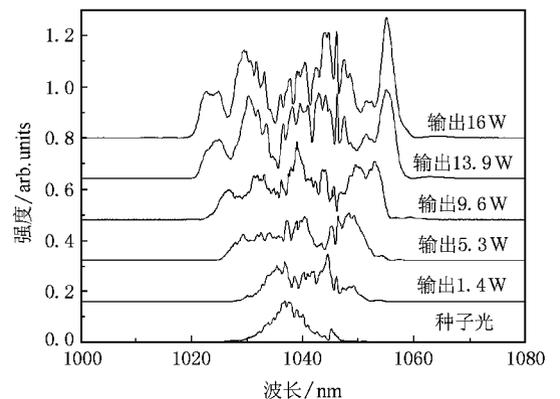


图5 放大级输出光谱随功率变化

虽然光谱展宽后脉冲可压得更窄,但是由于自相位调制效应(SPM)中在脉冲的两侧产生非线性相移并在光纤中不断积累,使得 $\Phi_{NL} \gg \pi$ ,因此在高功率下脉冲压缩后有较大的基底,该基底随着输出功率的增大而增加.图6中虚线为出射功率1.35 W

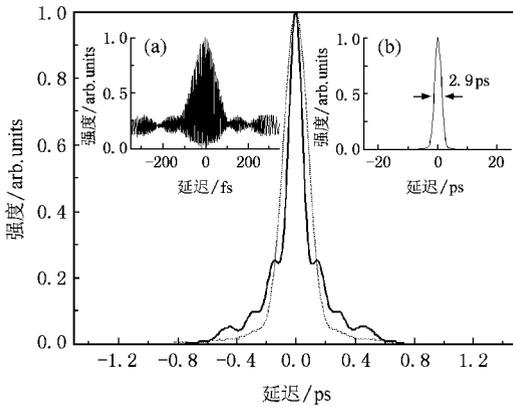


图 6 图中的实线为脉冲的自相关曲线 抽运功率 42 W 时 输出平均功率 16 W 压缩后脉冲宽度为 85 fs 插图 (a) 为此状态下 8:1 曲线 (b) 为脉冲压缩前自相关曲线。图中的虚线为脉冲的自相关曲线 抽运功率 7.2 W 时 输出平均功率 1.35 W 压缩后脉冲宽度为 140 fs

时 脉冲压缩后的自相关曲线 此时脉冲宽度为 140 fs 较之图 6 中 85 fs (实线) 的自相关曲线基底更小,

说明非线性啁啾在高功率情况下对再压缩后脉冲宽度的影响很大。

## 4. 结 论

利用掺 Yb 偏振型大模场面积光子晶体光纤作为振荡级和放大级的增益光纤, 搭建了飞秒激光放大系统, 获得了平均功率 16 W, 重复频率 50 MHz, 单脉冲能量 320 nJ 的脉冲输出, 脉冲压缩后宽度为 85 fs。大模场面积光子晶体光纤的无截止单模特性使输出激光的光束质量接近衍射极限, 而且其还具有高重复频率、结构紧凑、无需水冷等优点是固体激光放大器无法比拟的。该种光纤飞秒激光放大器可应用于飞秒激光微纳加工、太赫兹波产生<sup>[12, 13]</sup>、基于参量过程的纠缠光子对产生等诸多领域。利用啁啾脉冲放大<sup>[3, 14]</sup>、自相似放大<sup>[15]</sup>、三阶色散补偿非线性啁啾<sup>[16]</sup>, 可以使得脉冲能量进一步提高, 脉冲宽度进一步压窄。

[1] Fermann M E, Galvanauskas A, Sucha G 2002 *Ultrafast Lasers: Technology and Applications* (New York: Marcel Dekker)

[2] Limpert J, Röser F, Schreiber T, Tünnermann A 2006 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **12** 233

[3] Strickland D, Mourou G 1985 *Opt. Commun.* **56** 219

[4] Röser F, Rothhard J, Ortac B, Liem A, Schmidt O, Schreiber T, Limpert J 2005 *Opt. Lett.* **30** 2754

[5] Röser F, Eidam T, Rothhard J, Schmidt O, Schimpf D N, Limpert J, Tünnermann A 2007 *Opt. Lett.* **32** 3495

[6] Zaouter Y, Papadopoulos D N, Hanna M, Boulet J, Huang L, Agueraray C, Druon F, Mottay E, Georges P, Cormier E 2008 *Opt. Lett.* **33** 107

[7] 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]

[8] 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]

[9] Liu B W, Hu M L, Song Y J, Chai L, Wang Q Y 2008 *Chinese J. Laser* **35** 479 (in Chinese) [刘博文、胡明列、宋有建、柴路、王清月 2008 中国激光 **35** 479]

[10] Schreiber T, Röser F, Schmidt O, Limpert J, Iliev R, Lederer F, Petersson A, Jacobsen C, Hansen K P, Broeng J, Tünnermann A 2005 *Opt. Express* **13** 7621

[11] Agrawal P G 2001 *Nonlinear Fiber Optics* (Academic)

[12] Tian Z, Wang C L, Li Y F, Xing Q R, Song Y J, Hu M L, Chai L, Wang C Y 2008 *Chinese J. Laser* **35** 477 (in Chinese) [田震、王昌雷、栗岩峰、邢岐荣、宋有建、胡明列、柴路、王清月 2008 年中国激光 **35** 477]

[13] Song Y J, Hu M L, Wang C L, Tian Z, Xing Q R, Chai L, Wang C Y 2008 submitted to *IEEE Photon. Tech. Lett.* **20** 1088

[14] Röser F, Schimpf D N, Schmidt O, Ortac B, Rademaker K, Limpert J, Tünnermann A 2007 *Opt. Lett.* **32** 2230

[15] Fermann M E 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 6010

[16] Zhou S, Kuznetsova L, Chong A, Wise F W 2005 *Opt. Express* **13** 4869



# Sub-100 fs high power Yb-doped single polarization large-mode-area photonic crystal fiber laser amplifier<sup>\*</sup>

Liu Bo-Wen Hu Ming-Lie<sup>†</sup> Song You-Jian 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 24 March 2008 ; revised manuscript received 12 May 2008 )

## Abstract

An ytterbium-doped single polarization large-mode-area photonic crystal fiber laser amplifier is demonstrated , which can deliver average power of 16 W at a repetition rate of 50 MHz , corresponding to 320 nJ pulse energy . The length of the fiber is 3.5 m , and the pulse could be shorter since the spectrum is further broadened due to the SPM . The pulse duration is compressed to 85 fs after passing through a grating pair . The oscillator and amplifier of the system are composed of the same single polarization large-mode-area photonic crystal fiber , resulting in better environmental stability and compactness .

**Keywords** : photonic crystal fibers , large-mode-area fiber , femtosecond , fiber amplifier

**PACC** : 0660J , 4255N , 4281H

---

<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 ) , the Key Project of Chinese Ministry of Education ( Grant No 108032 ) and the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education , China ( Grant No. NCET-07-0597 ) .

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