

文章编号: 0258-7025(2010)01-0064-04

# 自由耦合输出的高功率全正色散光子晶体光纤飞秒激光器

张玉颖 张 驰 胡明列\* 宋有建 王清月

(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)

**摘要** 报道了一种工作于全正色散(ANDi)区, 具有自由耦合输出特点, 腔型结构极为简单的高功率被动锁模飞秒光纤激光器。该激光器利用具有极低非线性系数的掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层大模场面积光子晶体光纤作为激光增益介质, 光纤一端打磨成光滑的 0°角作为一端腔镜及自由耦合输出端, 提供 4% 的反馈光用于维持腔内激光振荡。利用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 启动并维持稳定锁模, 直接输出得到平均功率 2.5 W, 脉冲宽度 2 ps 的高功率超短脉冲, 对应单脉冲能量 44 nJ, 脉冲经腔外压缩至 430 fs。

**关键词** 激光器; 飞秒激光; 光纤激光器; 全正色散; 自由耦合输出; 光子晶体光纤; 锁模

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103701.0064

## Free-Output-Coupler High-Power All-Normal-Dispersion Femtosecond Photonic Crystal Fiber Laser

Zhang Yuying Zhang Chi Hu Minglie Song Youjian Wang Qingyue

(Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** A simple dispersion-compensation-free high power mode-locked femtosecond fiber laser with free output coupler is demonstrated. A segment of ytterbium(Yb)-doped double cladding large-mode-area photonic crystal fiber is explored as gain media of the laser. One end-face of the fiber is polished to 0° providing 4% feedback serves as a cavity mirror and a free output coupler. Stable mode-locking is obtained by using a high modulation semiconductor saturable absorber mirror(SESAM). The laser system generates 2.5 W, 2 ps, 44 nJ pulses that can be dechirped to 430 fs duration outside the cavity.

**Key words** lasers; femtosecond laser; fiber laser; all-normal-dispersion; free-output-coupler; photonic crystal fiber; mode-locked

### 1 引 言

飞秒激光脉冲具有时间分辨率高、峰值功率高、频谱宽等特点, 已被广泛应用于基础研究领域, 如超

快非线性光学、精密光学测量、飞秒光化学、太赫兹波产生等, 工业及医疗领域, 如精细加工、光学相干层析成像、激光眼科手术等。作为第二代飞秒激光

收稿日期: 2009-01-21; 收到修改稿日期: 2009-04-12

**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**: 张玉颖 (1982—), 女, 博士研究生, 主要从事光子晶体光纤非线性及光纤飞秒激光器等方面的研究。

E-mail: zhangyuying@tju.edu.cn

**导师简介**: 王清月 (1938—), 男, 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

器的钛宝石飞秒激光器开创了飞秒应用的新时代,是目前最为成熟,应用最为广泛的飞秒激光源。但是钛宝石飞秒激光器由于存在大量分立元件,光路在自由空间传输,需要价格昂贵的固体激光器抽运,使其成本高,体积大,使用操作困难,并且需要在恒温、防震、超净的环境下使用,限制了飞秒激光技术的普及。因此,经济化、小型化、实用化成为新一代超短脉冲激光器发展的重要目标。掺稀土元素离子(如  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ) 光纤具有增益谱线宽,抽运光转换效率高及散热效果好等特点,非常适合作为飞秒激光器的增益介质,同时可以将激光光束封闭于光纤纤芯内传播,减小了环境对其稳定性的影响。并且可由成本低廉的激光二极管(LD)直接抽运,转换效率可达 50%~80%,使其成本大幅度下降。随着双包层大模场面积的光子晶体光纤<sup>[1]</sup>的出现,以及高功率激光二极管生产技术的成熟,飞秒光子晶体光纤激光器的输出功率有了突破性的提高<sup>[2]</sup>。2007年,Ortac等<sup>[3]</sup>利用一根模场面积约为  $3850 \mu\text{m}^2$  的棒状掺  $\text{Yb}^{3+}$  光子晶体光纤作为增益介质,获得了平均功率 2.7 W,重复频率 10.18 MHz,对应单脉冲能量 265 nJ,脉冲宽度 400 fs 的锁模脉冲输出,其单脉冲能量已经大大超过垄断超短脉冲技术十几年的钛宝石飞秒激光器。

飞秒光子晶体光纤激光器的腔型设计十分灵活,利用适当的色散补偿元件及滤波元件,可以使激光器稳定工作于全正色散锁模状态<sup>[4,5]</sup>、呼吸脉冲锁模状态<sup>[6,7]</sup>及孤子锁模状态<sup>[8,9]</sup>。在全正色散(ANDi)锁模状态下,腔内分立元件数量将降到最低,此时腔内脉冲具有较大的啁啾,光纤的正色散使脉冲展宽,脉冲峰值功率降低,非线性作用减小,从而能够支持更高能量的脉冲输出。仅需要一块高调制深度半导体可饱和吸收镜(SESAM),利用其非线性可饱和吸收作用及光纤本身的增益带宽提供的滤波作用即可以实现全正色散区域的稳定锁模运转。2006年,Chong等<sup>[10]</sup>报道了无色散补偿机制的全正色散锁模掺  $\text{Yb}^{3+}$  飞秒光子晶体光纤激光器,在普通光纤中得到直接输出单脉冲能量 3 nJ, 1.4 ps,腔外压缩后 170 fs 的超短脉冲输出,并证明了这种情况下脉冲整形可以通过高度啁啾脉冲的频谱滤波作用来实现。宋有建等<sup>[11]</sup>报道了工作在全正色散锁模状态的光子晶体光纤激光器,直接输出 4.2 ps,单脉冲能量 50 nJ 的锁模脉冲序列,经压缩脉冲宽度为 410 fs。但其腔内还有偏振控制和耦合输出等多个自由空间器件,影响了激光器的紧凑化。本文基于掺  $\text{Yb}^{3+}$  的双包

层大模场面积光子晶体光纤(LMAPCF),无任何色散补偿情况下,利用 SESAM 实现了全正色散区域的自启动锁模,并且用一种新颖的自由耦合输出腔型<sup>[12]</sup>,将光纤输出端打磨成  $0^\circ$  角作为一端腔镜及输出镜,省去了大量分立的输出元件,激光器结构非常简单。直接输出得到平均功率 2.5 W,重复频率 57 MHz,脉冲宽度 2 ps,对应单脉冲能量 43.9 nJ 的稳定超短脉冲输出,脉冲可经腔外压缩至 430 fs。

## 2 实验装置

图 1 为自由耦合输出光子晶体光纤飞秒激光器实验装置图。采用一段 1.5 m 长掺  $\text{Yb}^{3+}$  大模场面积光子晶体光纤(Crystal Fibre A/S, Denmark)作为激光增益介质,其截面如图 2 所示,由纤芯、内包层、外包层 3 部分组成。中间的实心部分为纤芯,  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂浓度 9 dB/m,单模场直径  $29 \mu\text{m}$ ,对应模场面积  $660 \mu\text{m}^2$ ,数值孔径 0.03;内包层具有六角型呈周期性排布的空气孔,直径  $200 \mu\text{m}$ ,数值孔径 0.55,可以用来充分吸收抽运光。其中缺失的空气孔部分用折射率低于石英玻璃的硼酸盐玻璃填充,引入与包层折射率匹配的应力产生元,从而产生足够的双折射,使基模的两个简并的正交偏振态分离,在传输过程中一个偏振态的折射率将低于内包层等效折射率从而不能满足光在光纤内传输的弱导条件被损耗掉,偏振消光比为 10 dB, 1060 nm 附近的单一偏振带宽大于 100 nm;光纤的外包层为一圈空气孔,又称为“空气包层”,它具有很高的空气比,使内

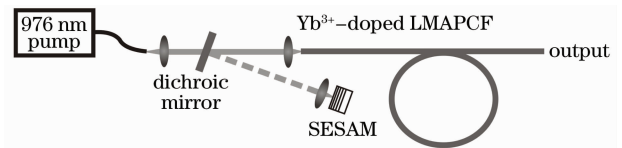


图 1 光纤激光器实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber laser

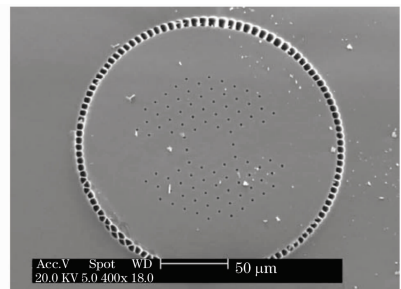


图 2 掺  $\text{Yb}^{3+}$  大模场面积光子晶体光纤端面图

Fig. 2 Cross section of the  $\text{Yb}^{3+}$ -doped large-mode-area photonic crystal fiber

包层达到较大的数值孔径,能够有效地将抽运光耦合入光纤纤芯。

激光器采用波长为 976 nm 的功率 LD 抽运,抽运光由纤芯直径 200  $\mu\text{m}$ ,数值孔径 0.22 的尾纤输出,经非球面透镜准直。对波长 976 nm 的抽运光高透(20°入射时>95%),对波长 1.04  $\mu\text{m}$  的激光高反(同样角度下>99%)来分离抽运光和激光,使激光不会反馈回 LD 而将其损坏。经二向色镜(DM)透射的抽运光,用非球面透镜耦合入光纤,抽运光耦合端的光纤端面经塌陷打磨成 8°角,用来防止端面反馈形成自激振荡,影响稳定锁模运转。光纤的另一端打磨成光滑的 0°角,利用端面菲涅耳反射提供的 4%反馈与半导体可饱和吸收镜形成激光谐振腔。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,用于启动和维持锁模。在 1.04  $\mu\text{m}$  附近,它的线性吸收率为 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。经 DM 反射的激光,用非球面透镜聚焦在 SESAM 上,通过改变汇聚光斑的尺寸使其获得自启动锁模所需的能量密度。光纤的 0°端既作为一端腔镜,又直接作为激光器的输出端,输出效率约为 96%,极大地导出了腔内能量。输出端利用上升时间为 200 ps 的高速响应光电二极管和采样频率为 4 GHz 的模拟示波器探测锁模脉冲序列,同时监测激光器的锁模脉冲状态。利用光学频谱分析仪(OSA, ANDO)和自相关仪(APE, Pulse check)分别测量激光器输出脉冲的频谱和脉冲。

### 3 实验结果

实验中通过增加抽运功率并可以获得稳定的锁模运转。锁模脉冲序列如图 3 中插图所示,重复频率为 57 MHz。激光器能够维持稳定的锁模状态达数小时,轻微的扰动也不会对锁模造成影响,体现了保偏光纤激光器优越的环境稳定性。激光器的抽运-输出斜效率曲线如图 3 所示,在抽运功率为 4.93 W 时激光器实现自启动锁模,对应 425 mW 的平均功率输出。当抽运功率增加至 9.9 W 时,得到 2.5 W 的最高平均功率输出,对应单脉冲能量 44 nJ。继续增加抽运功率,锁模出现多脉冲序列,此时激光器仍可以维持稳定的锁模运转,脉冲重复频率增加,对应单脉冲能量降低。

实验中激光腔内未使用任何色散补偿元件,激光器工作于全正色散(ANDi)锁模区域,一次腔内循

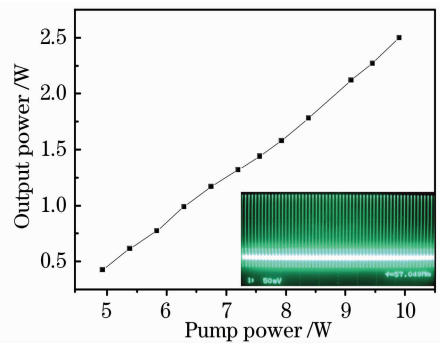


图 3 激光器抽运-输出功率曲线。插图为脉冲序列

Fig. 3 Pump power versus laser output power.

Insert is the pulse train

环的净色散量约为 0.057  $\text{ps}^2/\text{m}$ 。图 4 为激光器输出功率 2.5 W 的情况下,锁模脉冲的光谱形状,对应光谱的半峰全宽为 8 nm,光谱具有陡峭的两沿,这是全正色散锁模的典型特征。图 4 插图为对数坐标下对应的光谱,中心频率为 1040 nm。输出脉冲的自相关曲线如图 5 所示,经高斯函数拟合,测得脉冲的半峰全宽为 2 ps。激光输出脉冲经腔外平行放置的光栅对(600 lines/mm, Optometrics Corp.)进行色散补偿,压缩后得到的脉冲自相关曲线如图 5 插图所示,脉冲宽度为 430 fs,脉冲被压缩了 4.7 倍,说明激光脉冲具有较大的线性啁啾。脉冲两沿存在未被补偿的基底,应为自相位调制(SPM)效应展宽光谱过程中在脉冲两沿积累的非线性啁啾。

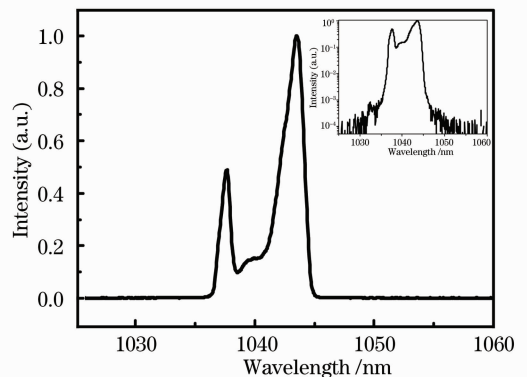


图 4 激光器锁模光谱曲线。插图为对数坐标下的光谱  
Fig. 4 Spectra of the output laser pulse. Inset shows the corresponding laser spectra in logarithmic scale

激光器锁模十分稳定,在关闭抽运 LD 的情况下,自由耦合输出端可以移动到所需位置,重新增加抽运功率,锁模可以自启动,极大地方便了使用。同时,由于自由耦合输出端利用内反射作为腔镜的特点,省去了激光耦合入光纤的过程,故光压只提供向外的推力,可以有效避免光纤端面由于吸附灰尘而被高能量的飞秒脉冲破坏,增加了激光器的环境适应性。

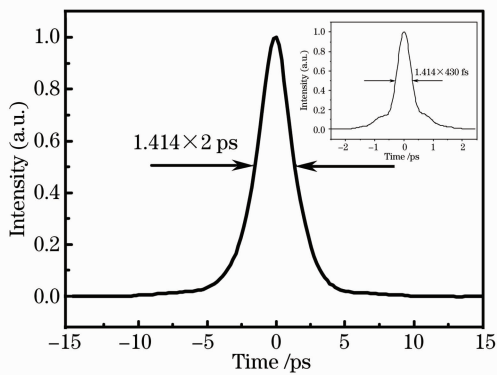


图5 激光器直接输出的脉冲自相关曲线。插图为相应的脉冲经腔外压缩后的自相关曲线

Fig.5 Autocorrelation trace of the output pulses direct from the laser. Inset shows the corresponding autocorrelation trace after dispersion compensation outside the cavity

## 4 结 论

实验搭建了一台结构极为简单,具有自由耦合输出特点的高功率被动锁模飞秒光纤激光器。利用掺 $\text{Yb}^{3+}$ 偏振型双包层大模场面积光子晶体光纤作为激光增益介质,腔内不加入任何色散补偿元件,实现了稳定的全正色散锁模。并将光纤一端打磨成光滑的 $0^\circ$ 角,直接作为激光输出端,既简化了腔内元件,又可以根据需要灵活改变输出方向。利用 SESAM 实现自启动锁模,得到平均功率 2.5 W,重复频率 57 MHz,脉冲宽度 2 ps,经腔外压缩后为 430 fs,对应单脉冲能量 44 nJ 的稳定超短脉冲序列,其技术指标可比拟固体激光器。激光器的成本以及调节复杂性,其小巧的体积使其更加实用及利于商业应用。激光器输出稳定,具有较高的平均功率和相对较宽的脉冲宽度,可直接作为飞秒光纤放大级的种子源,实现紧凑型的微焦耳量级飞秒激光系统。

## 参 考 文 献

- 1 J. Limpert, A. Liem, M. Reich *et al.*. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser [J]. *Opt Express*, 2003, **11**(7): 818~823
- 2 Wang Qingyue, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Large-mode-area photonic crystal fiber laser output high average power femto-second pulses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1603~1606  
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
- 3 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
- 4 A. Chong, W. H. Renninger, F. W. Wise. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser with pulse energy above 20 nJ [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(16): 2408~2410
- 5 K. Kieu, F. W. Wise. All-fiber normal-dispersion femtosecond laser [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(15): 11453~11458
- 6 J. R. Buckley, F. W. Wise, F. Ö. Ilday *et al.*. Femtosecond fiber lasers with pulse energies above 10 nJ [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(14): 1888~1890
- 7 Song Youjian, Hu Minglie, Zhang Chi *et al.*. Stretched-pulse femtosecond photonic crystal fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 830~834  
宋有建, 胡明列, 张 驰等. 呼吸脉冲锁模的光子晶体光纤飞秒激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 830~834
- 8 B. Ortac, J. Limpert, A. Tünnermann *et al.*. High-energy femtosecond Yb-doped fiber laser operating in the anomalous dispersion regime [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15): 2149~2151
- 9 Song Youjian, Hu Minglie, Liu Bowen *et al.*. High energy soliton mode-locking laser based on Yb-doped single polarization large-mode-area photonic crystal fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(10): 6425~6429  
宋有建, 胡明列, 刘博文等. 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[J]. *物理学报*, 2008, **57**(10): 6425~6429
- 10 A. Chong, J. Buckley, W. Renninger *et al.*. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(21): 10095~10100
- 11 Song Youjian, Hu Minglie, Zhang Chi *et al.*. High pulse energy femtosecond large-mode-area photonic crystal fiber laser [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(23): 3741~3745
- 12 Zhang Chi, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Mode-locked large-mode-area photonic crystal fiber laser with simple cavity configuration [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 100~103  
张 驰, 胡明列, 宋有建等. 简化腔结构的大模场面积光纤锁模激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 100~103