

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0208-05

紧凑型高功率超连续光源的实验研究

王思佳 胡明列* 方晓惠 张玉颖 宋有建 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研究室光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 设计并研制了一种结构紧凑的高功率超连续光源。利用 1.5 m 掺 Yb³⁺ 双包层结构大模场面积光子晶体光纤作为激光增益介质, 0° 光纤端面作为一端腔镜和耦合输出, 半导体可饱和吸收镜作为另一端腔镜并启动和稳定锁模, 利用光栅对进行腔内色散补偿, 搭建了高功率抽运源, 输出平均功率 1.5 W, 脉冲宽度 494 fs, 重复频率 55 MHz。系统分析了腔内动力学过程, 阐明了这种激光器的锁模运作机理。抽运 1 m 长光子晶体光纤, 产生了超过一个倍频程的超平坦超连续光谱(680~1450 nm), 输出功率 500 mW。

关键词 光纤光学; 超连续谱; 光纤激光器; 光子晶体光纤; 高功率

中图分类号 TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0208

Experimental Research on the Compact High Power Supercontinuum Source

Wang Sijia Hu Minglie Fang Xiaohui Zhang Yuying Song Youjian
Chai Lu 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 compact high power supercontinuum source is designed and explored. A 1.5 m Yb-doped double cladding large-mode area photonic crystal fiber is employed as gain media of the laser. 0° end face of the fiber serves as a cavity mirror and output coupler. Stable mode-locking is obtained by using a semiconductor saturable absorber as another cavity mirror. A pair of grating is used for intra-cavity dispersion compensation. As a pump source, the laser generates 1.5 W, 494 fs pulses at 55 MHz repetition rate. Systemic study of the dynamics in the laser cavity is presented. Mode locking mechanism of the laser is demonstrated. Over an octave (680 ~ 1450 nm) ultra-flat supercontinuum with an average power of 500 mW is generated in a 1 m photonic crystal fiber.

Key words fiber optics; supercontinuum; fiber laser; photonic crystal fiber; high power

1 引 言

作为高亮度宽带光源, 超连续光谱已经被广泛研究了三十多年^[1]。与白炽灯、放大自发辐射(ASE)等光源相比, 超连续光源具有相干性好、亮度高、光谱宽等优点, 被广泛应用于光谱检测、光学相

干层析、脉冲压缩、高精密光学频率测量及波分复用光通信系统等领域。超连续光谱是指一个超短强脉冲通过介质时在一系列非线性效应的作用下, 脉冲频谱强烈展宽而获得的一个超宽带连续光谱。产生高质量超连续光谱的关键是合适的抽运光源和非线

收稿日期: 2010-03-16; **收到修改稿日期**: 2010-05-16

基金项目: 国家 973 计划(2006CB806002, 2010CB327604)、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: 王思佳(1986—), 女, 博士研究生, 主要从事光子晶体光纤及飞秒光纤激光器等方面的研究。

E-mail: sj0607@163.com

导师简介: 王清月(1938—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光子晶体光纤及超短脉冲激光技术等方面的研究。

E-mail: chywang@tju.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: huminglie@tju.edu.cn

性介质。光子晶体光纤(PCF)强烈的非线性效应和可控的色散特性使其成为产生超连续光谱的最佳手段之一^[2~4],其中大部分是利用脉宽为飞秒量级的超短脉冲在熔石英 PCF 中得到的。最初,大多采用钛宝石飞秒激光器抽运 PCF^[3~5],但是该激光器本身抽运设备昂贵、运转需水冷装置、体积庞大、结构复杂、对振动敏感和对环境要求高等使其难以实现普及化应用。后来采用 Cr:LiSAF 飞秒激光器作为抽运源^[6],因其可以利用价格低廉的大功率激光二极管(LD)直接抽运而大大降低了成本,但是系统紧凑性和稳定性依然受到外界环境的制约,不利于超连续光源的普及应用。锁模光纤激光器将激光限制在光纤波导中传输,无需冷却装置,具有很好的环境稳定性和更加紧凑的结构,可以作为一种可靠的抽运源,目前已经有许多关于全光纤化超连续光源的报道^[7],但是传统增益光纤纤芯很小,受非线性相移积累的影响,无法支持大能量的脉冲,所以此类超连续光源的输出功率都比较低。为获得高功率的超连续光谱,人们又在光纤激光器的基础上加了一级参量放大系统^[8],但是这样做的结果却增加了系统的复杂性和成本。新型掺 Yb³⁺ 大模场面积光子晶体光纤因其极低的非线性系数和很高的抽运光数值孔径而成为

大功率锁模光纤激光器的理想增益介质^[9~11],为进一步实现高功率超连续光源提供了可能。

本文利用保偏掺 Yb³⁺ 双包层大模场面积光子晶体光纤作为增益介质,使用精细打磨为 0° 光纤端面作为输出腔镜,结合半导体可饱和吸收镜(SESAM)以及光栅对搭建了大功率自由耦合输出光子晶体光纤锁模激光器,用其抽运零色散点在 1000 nm 附近的光子晶体光纤,输出了 500 mW 的 680~1450 nm 范围内的超宽带平坦光谱,实现了集结构紧凑、体积小巧、成本低廉、运转稳定和高功率等优点于一身的超连续光源。并研究了在不同抽运功率情况下光谱的演变过程,实验中观察到了在孤子自频移、高阶孤子裂变、非孤子辐射以及四波混频等效作用下的超连续光谱产生过程。

2 实验装置

图 1 为实验装置图,抽运源为自行研制的光子晶体光纤飞秒激光振荡级系统,该系统中作为增益介质的光纤为 1.5 m 长的保偏掺 Yb³⁺ 双包层结构大模场面积光子晶体光纤(Crystal Fibre A/S,丹麦),其端面图如图2(a)所示。增益纤芯的单模场

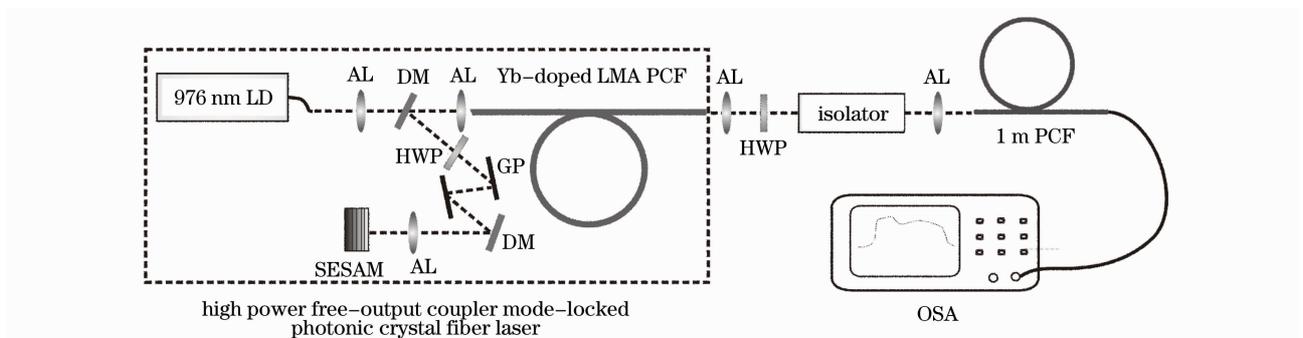


图 1 紧凑型高功率超连续光源实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of the compact high power supercontinuum source

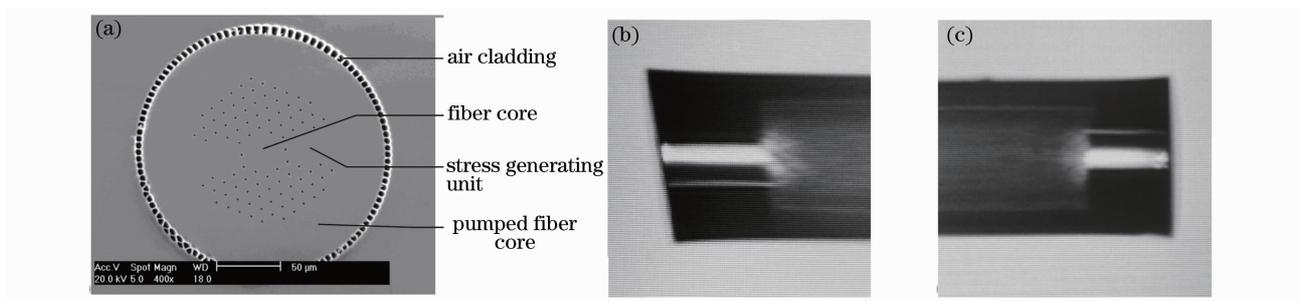


图 2 (a) 掺 Yb³⁺ 偏振型大模场面积光子晶体光纤端面电子扫描显微图, (b) 8° 端面, (c) 0° 端面

Fig. 2 (a) SEM of the Yb³⁺-doped single polarization large-mode-area photonic crystal fiber, (b) 8° end face of the fiber, (c) 0° end face of the fiber

直径 $29\ \mu\text{m}$, 对应单模场面积 $660\ \mu\text{m}^2$, 数值孔径 0.03。光纤内包层传导抽运光, 直径为 $200\ \mu\text{m}$, 其中缺失的空气孔部分用硼酸盐玻璃填充, 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, 光纤可以支持单一的偏振传输, 偏振消光比大于 10 dB, $1060\ \text{nm}$ 附近的单偏振带宽大于 $100\ \text{nm}$, 光纤的偏振性能对弯曲半径很敏感, 实验中把光纤弯曲成直径为 $25\ \text{cm}$ 的环以保证单偏振运转。外包层的高空气比使内包层获得高达 0.55 的数值孔径, 具有 $9\ \text{dB/m}$ 的抽运光吸收系数。

抽运源使用输出波长为 $976\ \text{nm}$ 的大功率 LD, 抽运光通过焦距为 $11\ \text{mm}$ 的非球面透镜 (AL) 耦合入光纤。双色镜 (DM) 对波长 $976\ \text{nm}$ 的抽运光高透, 对波长 $1.04\ \mu\text{m}$ 的激光高反, 用来分离抽运光和激光, 使激光不会反馈回 LD 而将其损坏。经 DM 透射的抽运光, 用 AL 耦合入光纤, 抽运光耦合端的光纤端面经塌陷打磨成 8° 角 [如图 2(b) 所示], 用来防止端面在高功率下反馈形成自激振荡, 影响稳定锁模运转。经 DM 反射的激光, 通过平行放置的一对 $600\ \text{line/mm}$ 的光栅对 (GP) 进行色散补偿, 由于光栅的衍射效率对偏振敏感, 光栅对前放置一片半波片 (HWP) 用来调整入射光的偏振态使之与光栅平面垂直来获得最高的衍射效率。利用 SESAM (Batop, GmbH, 德国) 作为激光器的一端腔镜, SESAM 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, 用于启动锁模, 它在 $1.04\ \mu\text{m}$ 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 $500\ \text{fs}$ 。利用焦距为 $18\ \text{mm}$ 的非球面透镜聚焦, 通过改变会聚光斑的尺寸获得启动锁模所需的能量密度。利用塌陷后并打磨光滑的光纤 0° 端面 [图 2(c)] 作为激光器另一端腔镜及耦合输出, 输出效率约为 96% , 最大限度地导出了腔内能量, 获得高功率的飞秒激光输出。由于是光纤端面直接耦合输出, 输出端可以方便地根据需要移动到适当位置, 极大地方便了使用, 使得以其为抽运源的超连续光源可以具有紧凑小巧的结构。

在这里采用隔离器 (美国 OFR) 的目的是防止实验过程中的反馈光影响激光器的稳定锁模运转, 隔离器的隔离度为 $36\ \text{dB}$, 透射率 83% 。而后用焦距为 $4\ \text{mm}$ 的 AL 将其耦合输入 $1\ \text{m}$ PCF (端面如图 3 插图所示) 中, 它由纯熔石英材料组成, 纤芯直径 $4\ \mu\text{m}$, 空气填充率为 0.383, 利用有限元法 (FEM) 计算得到的色散曲线如图 3 所示, 可以看出

其零色散点在 $1000\ \text{nm}$ 附近。实验时将 PCF 放在三维精密调整架上, 这样便于调节以获得最高的耦合效率。利用高分辨率的光谱分析仪 (ANDO, 日本) 接收输出超连续光谱, 光脉冲在进入光纤前后的功率可用功率计测出。

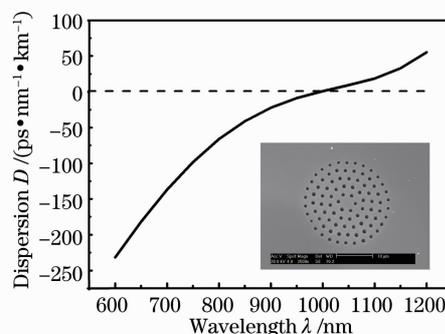


图 3 有限元法计算所得光子晶体光纤色散曲线 (插图为光纤端面电子扫描显微图)

Fig. 3 Dispersion of the PCF as calculated by FEM (inset shows an SEM image of the fiber)

3 实验结果及分析

光栅对间距取 $21\ \text{mm}$, 入射角度为 0° , 一次腔内循环激光两次通过光栅对后, 光栅对共提供 $-0.063\ \text{ps}^2$ 的负色散量, 大模场面积光子晶体光纤的波导色散较小, 其色散接近于石英玻璃本身的材料色散, 在 $1040\ \text{nm}$ 附近为 $0.019\ \text{ps}^2/\text{m}$, 一次腔内循环内激光两次通过 $1.5\ \text{m}$ 长的光纤, 共产生 $0.057\ \text{ps}^2$ 的正色散, 激光腔内的净色散量为 $-0.006\ \text{ps}^2/\text{m}$, 工作于呼吸孤子锁模状态。当抽运功率增加到 $13.3\ \text{W}$ 时, 得到 $3.1\ \text{W}$ 的最高锁模平均输出功率, 脉冲重复频率 $55\ \text{MHz}$, 对应最大单脉冲能量 $56\ \text{nJ}$ 。为使系统稳定工作, 实验中使激光器输出平均功率 $1.5\ \text{W}$, 直接输出脉冲宽度 $494\ \text{fs}$ (图 4), 中心波长 $1038\ \text{nm}$, 重复频率 $55\ \text{MHz}$, 隔离器后的激光功率约为 $1.2\ \text{W}$, 耦合入 $1\ \text{m}$ 长光子晶体光纤中产生如图 5 所示的超连续光谱, 得到超过一个倍频程的平坦光谱, 在 $680\sim 1450\ \text{nm}$ 波段范围内光谱具有 $5\ \text{dB}$ 的平坦度, PCF 后输出 $500\ \text{mW}$ 的高功率。从图 5 中可以看到, 在光子晶体光纤的零色散点 $1000\ \text{nm}$ 左右分别有两个较大的下陷, 这是因为在零色散点左右脉冲传输的群速度不同, 使得零色散附近两边存在一定的光谱带隙, 图中在 $1040\ \text{nm}$ 处的小尖峰是残余的抽运光。值得一提的是, 该超连续光谱在整个实验过程中都保持稳定, 说明这台超连续光源具有稳定工作的能力。

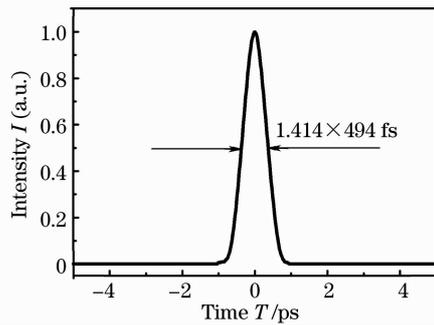


图4 激光器直接输出脉冲自相关曲线

Fig. 4 Autocorrelation trace of the direct output pulses

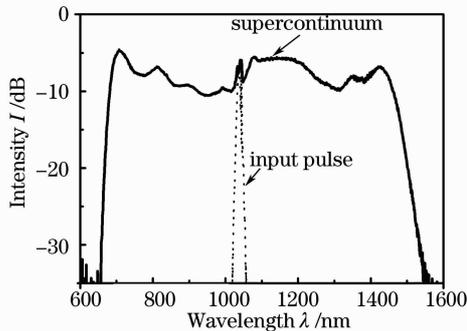


图5 输入功率为1.2 W时产生的超连续光谱

Fig. 5 Measured spectra of the supercontinuum with 1.2 W input power

通过调节隔离器前的半波片来使输入抽运功率在0~1.2 W范围内变化,得到的输出光谱变化如图6所示。在不同功率输入时,光谱随着功率的增加而展宽,并趋于更加平坦。抽运光中心波长1038 nm位于光子晶体光纤的反常色散区,此时超连续光谱的产生过程可以被解释为孤子自频移、高阶孤子分裂、非孤子辐射过程以及四波混频过程的作用^[12],在输入抽运功率较低时有明显的孤子自频移效应,在长波方向出现峰,随着输入抽运功率的增加,高阶孤子分裂成数个基孤子,并在脉冲内拉曼散

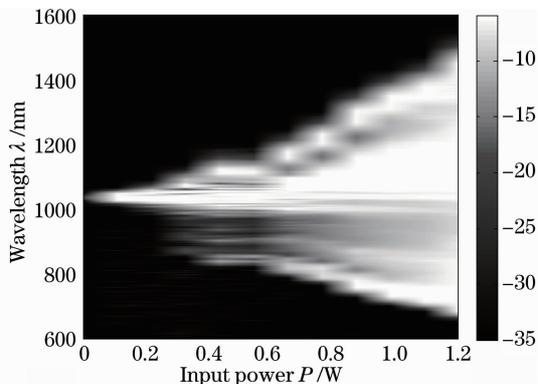


图6 不同输入功率下的输出超连续光谱

Fig. 6 Output spectrum with different input powers

射作用下逐渐红移,伴随蓝移的非孤子辐射,在四波混频效应作用之下,峰与峰之间的间隔逐渐被新的成分所占据,最终使光谱趋向平坦并得到进一步加宽。

从图6可以看出,光谱覆盖范围主要集中在红外波段,其可见光成分只延伸到680 nm左右,为了增加可见光光谱成分,选取合适的光子晶体光纤尤为重要。理论表明光子晶体光纤的空气填充率越大,其零色散波长更偏向短波波段,同时具有较大的色散参量斜率,故通过相位匹配效应会在更短的短波波段产生光谱成分,对于最终产生的超连续光谱而言,光谱宽度则会更宽,所以下一步的工作就是研究此类光纤中的超连续光谱产生,将光谱范围覆盖到蓝绿光波段。另外,由于光纤长度只取了1 m,光谱中有明显的抽运光残余,所以选取合适的光纤长度也是很有必要的。

4 结 论

利用具有自由耦合输出端的高功率光子晶体光纤飞秒激光系统抽运光子晶体光纤,搭建了紧凑型高功率超连续光源,输出功率500 mW,光谱覆盖范围超过一个倍频程。该超连续光源兼具输出功率高、运转稳定、体积小、成本低廉等优点,将在超短脉冲压缩、光子晶体光纤色散测量、生物医学成像、共焦显微技术、可调谐超快激光光源设计等领域发挥重要作用。

参 考 文 献

- John M. Dudley, Goëry Genty, Stéphane Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2006, **78**(4): 1135~1184
- P. Russell. Photonic-crystal fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4729~4749
- Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66
王清月, 胡明列, 柴路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 57~66
- Hu Minglie, Song Youjian, Liu Bowen *et al.*. Development and advanced applications of femtosecond photonic crystal fiber laser technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1660~1670
胡明列, 宋有建, 刘博文等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展及其前沿应用 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1660~1670
- M. L. Hu, C. Y. Wang, Y. F. Li *et al.*. Tunable supercontinuum generation in a high-index-step photonic-crystal fiber with a comma-shaped core [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(5): 1942~1950
- R. Holzwarth, M. Zimmermann, Th. Udem *et al.*. White-light frequency comb generation with a diode-pumped Cr:LiSAF laser [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(17): 1376~1378
- N. Nishizawa, J. Takayanagi. Octave spanning high quality

- supercontinuum generation in all-fiber system[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8): 1786~1792
- 8 N. Nishizawa, H. Mitsuzawa, J. Takayanagi. Generation of 0.45~1.38 μm visible to near infrared widely broadened supercontinuum using Er-doped ultrashort-pulse fiber laser system [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2009, **26**(3): 426~431
- 9 Wang Qingyue, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Experimental research on high average power femtosecond large-mode-area photonic crystal fiber laser [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
- 10 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, 张弛等. 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
- 11 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
张弛, 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
- 12 Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng *et al.*. Experimental analysis of the dependence factor during supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(12): 4243~4247
胡明列, 王清月, 栗岩锋等. 飞秒激光在光子晶体光纤中产生超连续光谱机制的实验研究 [J]. *物理学报*, 2004, **53**(12): 4243~4247