

基于锁模脉冲泵浦的全光纤化超连续谱光源

王雄飞, 李尧, 朱辰, 张昆, 张利明, 张浩斌, 郝金坪, 张大勇, 赵鸿

(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要:采用基于半导体可饱和吸收镜(SESAM)的被动锁模方案,通过三级主振荡功率放大(MOPA)结构,构建了平均输出功率39.2 W的全光纤皮秒脉冲光纤激光器。输出激光脉冲宽度10.7 ps,重复频率68 MHz。利用该皮秒光纤激光器泵浦一段4.5 m长的国产光子晶体光纤(PCF),实现了平均功率20.1 W的全光纤化结构超连续谱(SC)光纤激光输出。光谱宽度超出所用光谱仪600~1700 nm的观测范围,在观测范围内具有10 dB的光谱平坦度。

关键词:光纤激光器;皮秒脉冲;主振荡功率放大器;光子晶体光纤;超连续谱

中图分类号:TN248 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.09.010

All-fiber supercontinuum laser source pumped by mode-locked pulse

WANG Xiong-fei, LI Yao, ZHU Chen, ZHANG Kun, ZHANG Li-ming,
ZHANG Hao-bin, HAO Jin-ping, ZHANG Da-yong, ZHAO Hong

(Science and Technology on Solid-state Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

Abstract: All fiber picosecond ytterbium doped fiber laser with average output power of 39.2 W is constructed with a passively mode-locked seed laser based on semiconductor saturable absorber mirror and triple-stage master oscillator power amplifier (MOPA) configuration. When pumped power is 65.1 W, pulse width of output laser is 10.7 ps and repetition frequency is 68 MHz. This picosecond fiber laser is used to pump a 4.5 m long photonic crystal fiber, and all-fiber supercontinuum laser source with average power 20.1 W is realized. The supercontinuum covers the whole spectral range from 600 to 1700 nm of the optical spectrum analyzer. The spectral flatness is 10 dB in the detected spectral range.

Key words: fiber laser; picosecond pulse; master-oscillator power amplifier; photonic crystal fiber; supercontinuum

1 引言

超连续谱光源(Super-Continuum, SC)是一种具有平坦宽带光谱和高度空间相干性的高输出功率激光光源。由于它能缩短测量时间、提高信噪比、扩大光谱测量范围,因此,在通信、显微成像、光谱分析、检测等领域具有重要的研究意义和应用价值^[1-3]。

超连续谱主要是通过诸如孤子分裂、受激拉曼散射(SRS)、四波混频(FWM)等非线性效应产生。光子晶体光纤(PCF)由于具有很好的色散控制能力和宽波段单模工作特性,特别是具有很高的非线性光学转换效率,是产生超连续谱的理想介质^[4-5]。目前,产生超连续谱可以通过高功率连续激光器或飞秒、皮秒脉冲激光器泵浦PCF的方式实现。但连

续光泵浦产生的超连续谱谱宽有限并且光谱平坦度较差;飞秒脉冲泵浦方式的结构过于复杂,很难实现高功率输出,且维护成本较高。皮秒脉冲激光器不仅具有较高的峰值功率,而且已经能够实现超百瓦激光输出,是产生的高功率、高平坦度、宽波段超连续谱的理想选择^[6-10]。

本研究利用MOPA结构皮秒锁模脉冲光纤激光器泵浦一段国产PCF,在泵浦功率为39.2 W时实现了20.1 W的超连续谱输出,整个系统采用全光纤化结构,输出光谱谱宽超过1100 nm。为了提高耦合效率并避免光纤熔接处的热损伤,在皮秒光源与光子晶体光纤之间增加了过渡光纤,得到的超连续谱具有10dB的光谱平坦度。

作者简介:王雄飞(1984-),男,工程师,硕士,主要从事超短脉冲光纤激光器,放大器及超连续谱光纤激光器等方面的研究。E-mail:nufen_127@163.com

收稿日期:2015-12-09;**修订日期:**2016-01-13

2 实验方案

产生 SC 的实验装置图如图 1 所示。

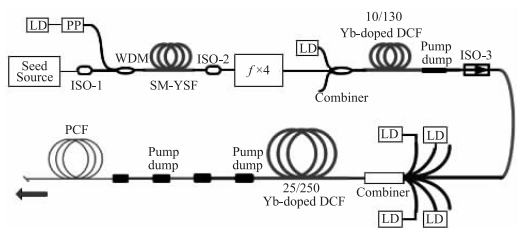


图1 实验结构示意图

Fig. 1 Experimental structure schematic diagram

泵浦源是采用主振荡功率放大（MOPA）结构实现的皮秒脉冲光纤激光器。该激光器的种子源是利用半导体可饱和吸收体（SESAM）构建的被动锁模皮秒光纤激光器，其泵浦 LD 为带尾纤的 975 nm 半导体激光器，最大泵浦功率约 550 mW；增益介质是长度为 2 m 的高浓度单模掺铒光纤，SESAM 既作为自启动的被动锁模器件，又作为后腔镜与反射率为 5% 的光纤光栅（FBG）共同构成光纤激光器的 F/P 腔。种子光经过光纤隔离器（ISO）进入预放大器。预放大器的增益介质采用与种子源增益介质相同的高浓度的掺铒光纤，泵浦 LD 也采用 550 mW 带尾纤的 975 nm 半导体激光器，驱动源带有温控系统，可保证输出波长的稳定性，为了防止光路中回光打坏泵浦源，在泵浦 LD 后熔接泵浦保护器。泵浦光通过 WDM 耦合入增益光纤，对信号光进行放大。在预放大级后熔接有光纤隔离器，防止回光损伤光路。之后的重频倍增系统由分束器和无源光纤组成，通过精确计算脉冲间隔和延迟时间使一个脉冲周期内的脉冲数量得以倍增。功率放大器分两级结构。一级功率放大器采用的是 10/130 双包层掺铒光纤，泵浦 LD 的功率 25 W、中心波长 975 nm；泵浦光通过 $(2+1) \times 1$ 合束器耦合入增益光纤，光纤的输出端熔接光纤隔离器。二级功率放大器采用的是 25/250 双包层掺铒光纤；为了提高功率，泵浦源采用了 4 只 25 W、中心波长 975 nm 的半导体激光器，它们通过 $(6+1) \times 1$ 带树状光纤合束器耦合入增益光纤。增益光纤的末端熔接一段无源光纤，在熔接点出制作了泵浦倾泻装置，滤除未被吸收的多余的泵浦光。

皮秒光纤激光器后熔接光子晶体光纤（PCF）。在皮秒激光源与光子晶体光纤之间增加两段过渡光纤，用于匹配模场直径。实验采用的 PCF 是国产光纤，纤芯由周期排列空气孔所包围，测量纤芯直径为 4.8 μm 。SC 输出功率由激光功率计 LP-50 测量，光谱特性由光谱仪 Yokogawa AQ6370 B 光谱仪（探

测范围为 600 ~ 1700 nm）探测记录。

3 实验结果与分析

整个实验系统中，用于泵浦 PCF 的皮秒光纤激光器是基于半导体可饱和吸收镜（SESAM）的 MO-PA 结构被动锁模光纤激光器。通过调整偏振控制器，种子源实现稳定锁模输出时，输出功率为 11.9 mW。输出脉冲重复频率为 16.8 MHz，用自相关仪测得脉冲自相关迹显示的脉冲宽度为 7.0 ps。输出脉冲的中心波长为 1063.6 nm，3 dB 带宽为 0.910 nm。之后通过单模掺铒光纤进行预放大，放大后输出功率提升为 171 mW。预放大级之后连接重复频率倍增系统（ $f \times 4$ ），将重复频率从 16.8 MHz 增加到 68 MHz，输出功率经过衰减至 74.8 mW。采用重复频率倍增系统可以有效增加重复频率，降低后级放大中的非线性效应。

一级功率放大器采用 10/130 双包层掺铒光纤作为增益介质，当泵浦功率 9.5 W 时，输出功率为 3.51 W。由于该放大级采用了双包层光纤，因此，功率放大后的输出端光纤包层中会残留未被吸收的泵浦光。实验时在输出端制作了包层倾泻装置用于消除未被吸收的泵浦光；该放大级末端连接了光纤隔离器，用于防止后级回光反射，损坏光路。

二级功率放大器采用了 25/250 双包层掺铒光纤，当泵浦功率增大到 65.1 W 时，实现最高输出功率 39.2 W，光-光转化效率为 60.2%，功率曲线保持良好的线性增长，如图 2 所示。输出皮秒脉冲激光的重复频率 68 MHz，中心波长 1063.5 nm，脉冲宽度 10.7 ps。通过示波器、光谱仪以及自相关仪测得的锁模脉冲序列、光谱形状、脉冲宽度如图 3、4、5 所示。由于采用了大模场双包层光纤做为增益介质，实验中未出现受激布里渊散射（SBS）、受激拉曼散射（SRS）引起的其他波长的激光，这为后续泵浦 PCF 提供了有利的条件。由于泵浦能量较大，输出端末端的无源光纤上也采用了泵浦倾泻装置，将剩余的泵浦光散去，防止输出端面处激光反射给系统带来的热积累和回光损伤。

产生的高功率皮秒激光通过光纤熔接技术耦合入 PCF。皮秒激光的输出尾纤为 25/250 双包层光纤，纤芯直径为 25 μm ，作为增益介质的 PCF 纤芯直径为 4.8 μm ，两种光纤结构存在差异，而且芯径差别很大。因此，实现双包层光纤与 PCF 的低损耗熔接是高功率 SC 激光光源的一项关键技术。通过研究，实验在 PCF 与双包层光纤之间，采用了两种无源光纤作为过渡光纤，通过光纤拉锥技术和精细熔

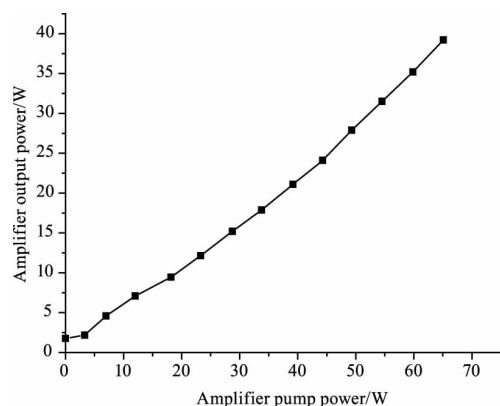


图2 二级功率放大器输出功率随泵功率的变化曲线

Fig. 2 Output power versus pump power of the second-stage

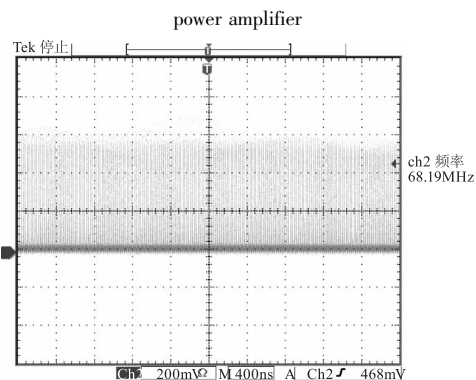


图3 脉冲序列图

Fig. 3 Time domain response

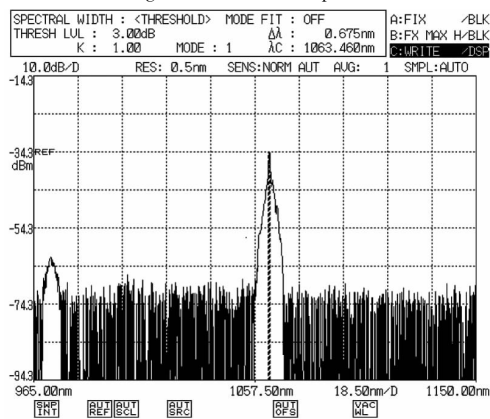


图4 光谱形状图

Fig. 4 Optical spectrum

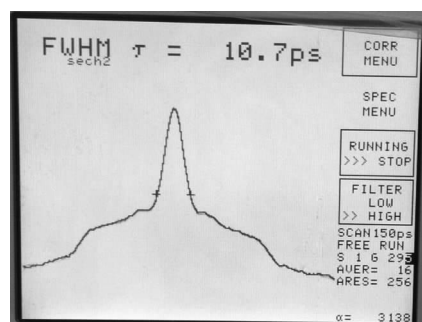


图5 锁模状态的自相关轨迹

Fig. 5 Corresponding autocorrelation trace at mode-locking

融控制,使光纤的模场达到最佳的匹配度。之后,通过调整熔接工艺的放电参数,使 PCF 的空气孔塌陷成平滑的熔接过渡区,有效降低了过渡光纤和 PCF 熔接点处的熔接损耗,减小了不同尺寸光纤熔接对 SC 输出功率的影响。图 6 是 SC 激光功率随皮秒脉冲泵浦激光功率的变化曲线。从图中可以看出,SC 激光功率随着皮秒脉冲泵浦功率的增大基本呈线性增加。当皮秒脉冲泵浦功率增大到 39.2 W 时,实现了 20.1 W 的 SC 输出,光-光转换效率 51.3%。图 7 是用输出功率 20.1 W 时输出光斑图样。如图所示,激光能量主要集中在光子晶体光纤的纤心内。

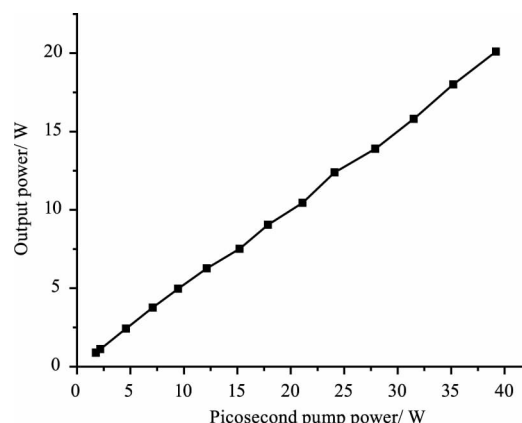


图6 SC 输出功率随泵功率的变化曲线

Fig. 6 Output power versus pump power of the super-continuum

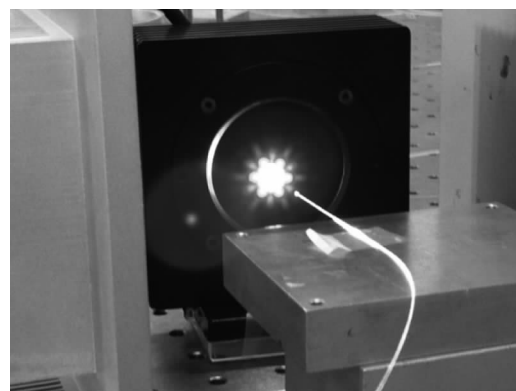


图7 SC 光斑图

Fig. 7 The super-continuum laser spot photo

在输出功率增大的过程中,随着皮秒脉冲泵浦功率的增加,PCF 输出端的光谱变化如图 8 所示。在泵浦功率增加的初期,由于功率很小,没有达到 PCF 的非线性阈值,光谱没有出现明显的展宽。随着泵浦功率的增大,输出光谱的光谱宽度逐渐产生变化。主要表现是光谱两侧谱线开始增宽。而长波一侧的谱线较短波侧的谱线增宽幅度更大。产生这种现象的原因主要是自相位调制(SPM)效应。继续增加泵浦功率,当纤芯内功率密度接近拉曼阈值时,

会在光谱的长波方向出现拉曼孤子。产生的孤子脉宽很短,会通过拉曼散射效应实现孤子自频移(SS-FS:soliton self-frequency shift)^[11],使孤子波长向长波方向移动,相应的,光谱会持续向长波方向展宽。当泵浦功率继续增大,长波处的高能孤子将能量以色散波的形式转移到正常色散区,产生的高阶色散波与长波高能孤子通过高阶非线性效应,如交叉相位调制(XPM:cross-phase modulation)、四波混频(FWM:four-wave mixing)效应相互作用,使色散波波长向短波方向移动,从而使光谱在短波方向出现明显展宽^[12-13]。当泵浦功率继续增大,长波孤子的波长继续向长波频移,同时,由于非线性效应,色散波使光谱持续向短波方向展宽。最终,当泵浦功率最大时,实现了20.1 W的超连续谱输出,短波展宽至600 nm,长波超过1700 nm,超出光谱仪的观测范围。

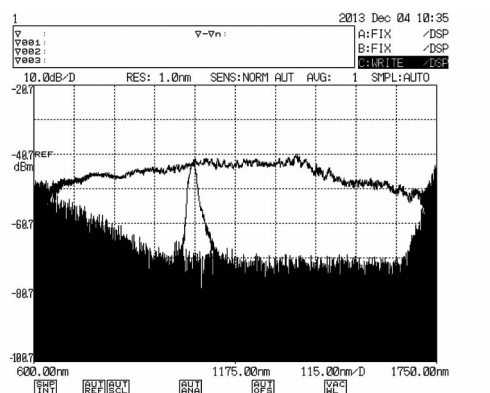


图8 SC光谱图

Fig. 8 Optical spectrum of the super-continuum

4 总 结

研制了一台全光纤化超连续谱激光光源,其泵浦源为三级MOPA结构的被动锁模皮秒光纤激光器,增益介质为一段4.5 m长国产PCF;采用光纤熔接耦合的方法,获得了最高功率20.1 W的稳定超连续谱输出。由于光纤模场直径不匹配,实验利用两种不同模场的光纤作为过渡光纤,并采用熔融拉锥技术,降低了熔接点处损耗,提高了泵浦效率和输出功率。此外,本文研究了泵浦功率增大时,超连续谱的演变过程,发现光谱的展宽首先发生在长波方向,之后,受峰值功率持续增高的影响和多种非线性效应的相互作用,光谱逐渐向短波方向展宽。最终,光谱宽度超过了光谱仪600~1700 nm的观测范围,在观测范围内实现了10 dB的光谱平坦度。

参考文献:

- [1] LI Hengrui, SANG Xinzhu, YUAN Jinhui, et al. Simulation investigation on supercontinuum generation and noise characteristics in the normal dispersion photonic crystal fiber with a flat tened dispersion profile[J]. Optoelectronics Letters, 2010, 6(3): 172-175.
- [2] JIN Peng, WANG Yifeng, ZHOU Qifeng, et al. Luminous efficacy of white LED in the mesopic vision state[J]. Optoelectronics Letters, 2009, 5(4): 265-267.
- [3] LIU C, REES E J, LAURILA T, et al. Predicting supercontinuum pulse collisions with simulations exhibiting temporal aliasing[J]. Optics Letters, 2010, 35(24): 4145-4147.
- [4] LI Rui, HOU Lantian, LIANG Danhua, et al. Generation of supercontinuum and influence factors in photonic crystal fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(11): 42-47. (in Chinese)
李蕊, 侯蓝田, 梁丹华, 等. 光子晶体光纤中超连续谱的形成及其影响因素[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(11): 42-47.
- [5] J M Dudley, Goery Genty, Stephane Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. Reviews of Modern Physics, 2006, 78(4): 1135-1184.
- [6] WANG Qiuguo, ZHANG Hu, ZHANG Xia, et al. Supercontinuum generation using 120 fs femtosecond pulse laser in a dispersion flattened photonic crystal fiber[J]. Chinese J. Lasers, 2009, 36(s1): 353-355. (in Chinese)
王秋国, 张虎, 张霞, 等. 飞秒脉冲在光子晶体光纤中的超连续谱产生[J]. 中国激光, 2009, 36(s1): 353-355.
- [7] Chen K K, Alam S, Price J, et al. Picosecond fiber MOPA pumped supercontinuum source with 39 W output power[J]. Opt. Express, 2010, 18(6): 5426-5432.
- [8] Ranka J K, Windeler R S, Stentz A J. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm[J]. Opt. Lett., 2000, 25(1): 25-27.
- [9] Travers J C, Rulkov A B, Cumberland B A, et al. Visible supercontinuum generation in photonic crystal fibers with a 400 W continuous wave fiber laser[J]. Opt. Express, 2008, 16(19): 14435-14447.
- [10] GUO Chunyu, RUAN Shuangchen, YAN Peiguang, et al. Flat supercontinuum generation in cascaded fibers pumped by a continuous wave laser[J]. Opt. Express, 2010, 18(11): 11046-11051.
- [11] Agrawal GP. Nonlinear fiber optics[M]. 4th ed. New York: Academic Press, 2010.
- [12] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. Reviews of Modern Physics, 2006, 78(4): 1135-1184.
- [13] Dudley JM, Taylor J R. Supercontinuum generation in optical fibers[M]. NY: Cambridge University Press, 2010: 119-130.