

全光纤结构超短脉冲超连续谱的产生及其特性研究

于峰,孙畅,高静,匡鸿深,张晶,高鹏坤,葛廷武,王智勇

(北京工业大学 激光工程研究院,北京 100124)

摘要: 超连续光谱以其光谱范围宽、平坦度好、空间相干度高和可实现的较高功率,被广泛应用于相干成像技术、光谱分析、干涉测量等诸多领域。理论上超连续光谱可由超短脉冲通过高非线性介质来实现,期间伴随着自相位调制(SPM)、受激拉曼散射(SRS)、四波混频效应(FWM)。随着光纤技术的发展,利用峰值功率高、光光转换效率高、体积小、结构紧凑的掺 Yb 超短脉冲光纤激光器作为泵浦源,高非线性的光子晶体光纤作为非线性介质来产生超连续光谱。采用主振荡功率放大结构(MOPA),自行搭建了全光纤锁模脉冲放大器,并通过熔接的方式将其耦合进入长为 10 m、零色散点为 1040 nm 的光子晶体光纤,在对熔接过程中放电时间、放电间隔、熔接损耗等参数进行优化后,获得了 8.14 W 的超连续光谱。

关键词: 锁模脉冲激光; 主振荡功率放大; 全光纤结构; 超连续光谱

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3555-04

All-fiber ultra-short super-continuum generation and characters

Yu Feng, Sun Chang, Gao Jing, Kuang Hongshen, Zhang Jing, Ge Tingwu, Wang Zhiyong

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Super-continuum (SC) is widely used in coherent photography technology, optical spectroscopy analysis, interferometry, etc because of its flat and broad spectrum, high spatial coherence and high power. Super-continuum generation could be realized on theory by ultra-short pulse laser getting through the high nonlinear medium, accompany with self-phase modulation (SPM), stimulated Raman scattering (SRS), four-wave mixing (FWM). With the development of fiber technology, Yb-doped ultra-short pulse fiber laser, which has high peak power, high optic-to-optic efficiency, compact structure and small volume was elected as the pump source, and high nonlinear photonic crystal fiber (PCF) as the nonlinear medium for SC. In this paper, a self-made amplified mode-locked pulse was coupled into a 10m PCF, with 1040 nm zero dispersion point, to generate 8.13W super-continuum by fusing method, during which the key parameters like discharge time, discharge interval, splice loss are seriously optimized to keep the fusing quality well.

Key words: Mode-locked pulse laser; master oscillator power amplifier; all-fiber structure; super-continuum

收稿日期: 2014-03-05; 修订日期: 2014-04-10

基金项目: 工业用高功率全光纤激光器的开发(2010ZX04013-052)

作者简介: 于峰(1981-),男,博士,主要从事光纤激光器,光纤放大器以及相关技术方面的研究。Email:unlimitwind@sina.com

0 引言

光纤激光器,作为第三代激光器的代表,具有光束质量好、结构紧凑、光光转换效率高、免维护等诸多优点,在现代工业加工、国防军事、光纤通讯、临床医学等多个领域得到越来越广泛的应用^[1-4]。

连续谱现象由 Alfano 和 Shapiro 于 1970 年首次观察到。它是指当一束峰值功率足够高的超短脉冲通过非线性介质时,由于自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、受激拉曼散射(SRS)和四波混频(FWM)等非线性效应与光纤群速度色散(GVD)的共同作用,出射光谱中产生许多新的频率成分,光谱宽度远远大于入射光脉冲的谱宽,频谱范围可以从可见光一直连续扩展到紫外和红外区域^[5-8]。由于它具有高的输出功率、平坦的宽带光谱、高度的空间相干性等特性,能大大提高信噪比、减小测量时间以及加宽光谱测量范围,因此可广泛应用于光纤衰减测量、干涉测量仪、光相干摄影技术、光谱学分析等领域。目前国内在这方面的研究主要集中在扩展超连续谱的谱宽范围,提高脉冲光到超连续谱的转换效率和实现高功率超连续谱几个方面^[9-10]。

文中采用包层泵浦的方式和主振荡功率放大结构,获得了平均功率 23 W,中心波长 1 064 nm,峰值功率 11 kW 的锁模脉冲光纤激光;并通过熔接的方式将其耦合进入 10 m 长、零色散点为 1 040 nm 的光子晶体光纤,在对熔接过程中放电时间、放电间隔、熔接损耗等参数进行优化后,获得了 8.14 W 的超连续光谱,整个系统为全光纤结构,具有转换效率高和稳定性好的特点。

1 实验原理及装置

1.1 光纤放大器

系统整体结构如图 1 所示,自行搭建了的环形腔光纤激光器作为信号源,由于 NPR 效应,获得了平均功率为 80 mW 的稳定的自启动锁模脉冲,其中心波长 1 064 nm,重复频率为 41.3 MHz。信号光经过两级功率放大器进行功率放大,所用增益光纤分别为 Nufern 公司生产的 LMA-YDF-10/130 (μm) 双包层光纤和 LMA-YDF-20/130(μm)双包层光纤;泵浦源分别为 1 个 6 W 单管 915 nm LD 和 4 个 10 W 单管 976 nm LD。

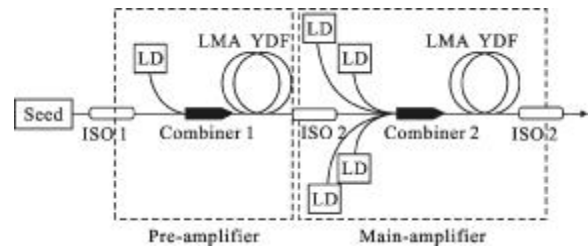


图 1 全光纤锁模脉冲放大器装置

Fig.1 Setup of all-fiber pico-second pulse amplifier

1.2 超连续谱产生装置

从隔离器 3 端输出的被放大的高功率的超短脉冲,通过耦合系统进入具有高非线性系数的光子晶体光纤(PCF)中,如图 2,所选择的 PCF 芯径 $5 \mu\text{m}$,零色散点 1 040 nm,非线性系数 $11 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,由于自相位调制(SPM)、受激拉曼散射(SRS)、四波混频效应(FWM)等非线性效应的共同作用,产生超连续光谱。此处无源光纤和光子晶体光纤的熔接,对放电时间、放电间隔及强度进行了监测和优化,以得到较低的熔接损耗。

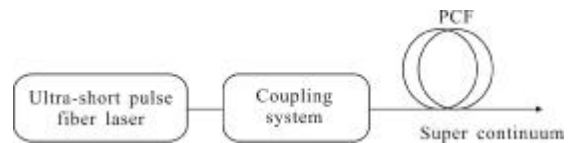


图 2 全光纤结构超连续谱产生装置

Fig.2 Configuration of all-fiber super-continuum generation system

2 实验结果及分析

2.1 光纤放大器

将平均功率为 80 mW 的皮秒脉冲种子源先后耦合进入两级功率放大器,依次获得了平均功率为 2 W 和 23 W 的皮秒脉冲,其中主放大级峰值功率 11 kW,中心波长 1 064 nm,并通过 8 度角光纤端面输出。实验中未出现受激拉曼散射(SRS)和功率饱和现象,如图 3 所示,为接下来超连续的产生提供了必要的条件。

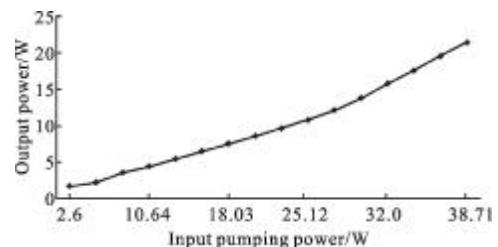


图 3 主放大器输出功率与泵浦功率关系曲线

Fig.3 Output power versus pump power of main amplifier

2.2 光子晶体光纤的熔接

将输出的超短脉冲耦合进入自制的光纤模场匹配器中, 再与 PCF 相熔接, 其输入端光纤为 20/130 μm DCF, 输出端光纤为 HI1 060, 使得熔接处两端光纤模场匹配。理论上, 由于光纤模场不匹配带来的光子晶体光纤和普通光纤间的熔接损耗可由以下关系式得到:

$$\alpha = -10 \log \left(\frac{2\omega_{PCF}\omega_{SMF}}{\omega_{SMF}^2 + \omega_{PCF}^2} \right)$$

式中: ω_{PCF} 和 ω_{SMF} 分别为光子晶体光纤和普通光纤的纤芯直径, 若 $\omega_{PCF}=4.2 \mu\text{m}$, $\omega_{SMF}=6 \mu\text{m}$, 则模场不匹配损耗为 0.27 dB, 所以需要其他方法减小这部分损耗。在这里主要用到了光子晶体光纤空气孔塌缩的方法, 使光纤的包层保持不变的情况下, 塌陷空气孔以增加其模场面积, 从而达到与普通光纤模场匹配的目的, 如图 4 所示。塌缩前后光子晶体光纤的气孔直径 d_0 、 d 和孔间距 Λ_0 、 Λ 满足以下关系:

$$\left(\frac{\Lambda}{\Lambda_0} \right)^2 = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_0}{\Lambda_0} \right)^2}{\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{\Lambda} \right)^2}$$

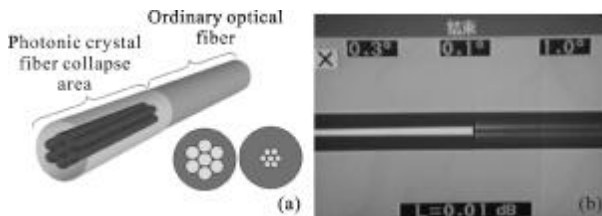


图 4 气孔塌缩的光子晶体光纤与普通光纤熔接图

Fig.4 Splicing of passive fiber and air hole collapsed PCF

当然, 随着光子晶体光纤空气孔的塌陷, 其波导结构会随之改变, 塌缩程度过大会导致光纤的波导结构被破坏, 塌缩程度过小则无法实现模式匹配, 所以合理的控制光纤气孔的塌缩区域, 引入最低的熔接损耗, 才能保证光在其内部的正常传输,

2.3 超连续光谱的产生

超短脉冲的峰值功率直接影响超连续光谱的产生过程及状态, 泵浦光波长 1 064 nm 位于 PCF 的零色散点 1 040 nm 很近的反常色散区, 有利于超连续光谱的形成。泵浦光通过光纤模场匹配器进入 PCF1, 当泵浦功率为 0.5 W 时, 此时峰值功率较低, 脉冲光谱无明显变化, 如图 5(a) 所示; 增加泵浦到 1.2 W 时, 峰值功率为 0.53 kW, 光谱短波段 1 μm 处

有微小新频率分量出现, 长波段则明显展宽, 前者是由于调制不稳定性(MI)引起的旁瓣, 后者是由于受激拉曼散射(SRS)引起的, 初始脉冲具有较宽的 12 nm 谱宽, 峰值功率足够高时, 在长波段更容易引发 SRS, 这样在光谱展宽初期, 由 MI 和 SRS 共同作用, 使得脉冲频谱展宽集中在长波段, 如图 5(b) 所示; 当泵浦功率增加到 3 W, 峰值功率为 1.36 kW 时, MI 在更宽的波长范围继续使脉冲分裂出更多超短脉冲, 由于长波段处于 PCF 的反常色散区, 这些超短脉冲在群速度色散 GVD 和自相位调制 SPM 的作用下, 转化成部分高阶孤子和基阶孤子, 对于高阶孤子, 在内拉曼散射的作用下发生分解, 产生红移的孤子和蓝移的色散波, 其他部分基阶孤子由于孤子碰撞也可获得高能量进而发生红移, 而在正常色散区, 孤子通过能量传递以色散波形式存在, 由此脉冲频谱便开始在长波和短波两个方向共同展宽, 如图 5(c) 所示, 此时输出光斑呈现可见光(红色); 继续增大泵浦功率, 由于前面介绍的孤子捕获效应的存在, 红移孤子和蓝移色散波使得脉冲频谱继续在两个方向上展宽。此时蓝移展宽主要源于 SPM; 当泵浦功率继续增大, 使得孤子和色散波满足四波混频 FWM 时, 便会在中心波长两侧产生 FWM 边带, 其中短波方向的波长会比色散波边缘波长更短; 当泵浦功率为 23 W, 得到了如图 5(d) 中的脉冲频谱展宽。

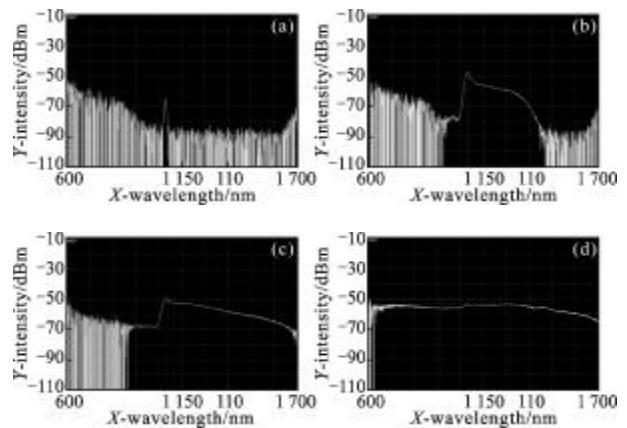


图 5 不同泵浦功率下的输出光谱

Fig.5 Spectrion of super-continuum at different pumping power

通过以上一系列的非线性效应作用, 随着泵浦功率的逐渐增大, 即脉冲峰值功率的逐渐增大, 脉冲频率逐渐展宽, 单一波长的脉冲能量被分散到整个光谱范围内, 中心波长的功率优势变得不明显, 获得

了光谱范围 475~1 700 nm 的超连续谱 (短波方向展宽情况如图 6 所示,长波方向展宽限于光谱仪量程仅到 1 700 nm,实际情况应大于该值),其中可见光部分的平坦度小于 5 dB,近红外波段的平坦度小于 10 dB,分析后者产生原因有二:第一,石英材料的透过率在接近 2 μm 处对光的传输损耗较大,故光谱在接近 2 μm 波长过程中能量逐渐降低;第二,红移孤子在逐渐降低群速度与色散波匹配的过程中,其携带能量也随着光谱的展宽而逐渐减小。另外图 5(d)中超连续谱在 1 380 nm 处存在一个凹陷,是由于石英材料中 OH-对光的吸收造成的。

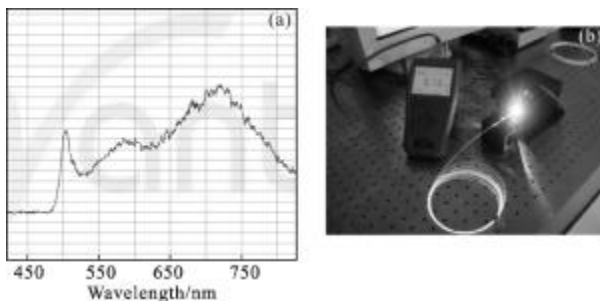


图 6 短波方向光谱展宽情况及输出光斑

Fig.6 Broadening spectrum and facular point of super-continuum

实验中得到了平均功率为 8.14 W 的超连续光谱,光光转换效率为 37.8%,如图 7 所示。

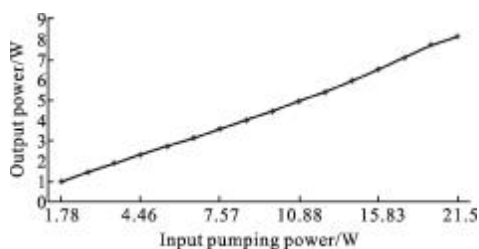


图 7 超连续谱输出功率与泵浦功率关系曲线

Fig.7 Output power versus pump power of super-continuum

3 结 论

文中利用自行搭建的环形腔光纤激光器作为信号源,通过两级放大器进行功率放大,获得了平均功率 23 W,中心波长 1 064 nm、峰值功率 11 kW 的锁模

脉冲光纤激光;并通过自制的光纤模场匹配器,经过计算和优化熔接参数,在低插损情况下将脉冲激光耦合进入长 10 m、零色散点为 1 040 nm 的光子晶体光纤,获得了平均功率 8.14 W、光谱范围 475~1 700 nm 的超连续光谱,其中可见光部分的平坦度小于 5 dB,近红外波段的平坦度小于 10 dB。整个系统为全光纤结构,转换效率高、结构稳定并且有进一步提高功率的空间。

参考文献:

- [1] Govind P Agrawal. Nonlinear Fiber Optics Theory and Application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [2] Dudley J M, Taylor J R. Supercontinuum Generation in Optical Fibers [M]. Britain: Cambridge University, 2010.
- [3] Limpert J H, Fer S, Liem A, et al. 100 W average power, high energy nanosecond fiber amplifier [J]. Applied Physics B, 2002, 75(4): 477-479.
- [4] A Tünnermann, T Schreiber, J. Limpert. High power fiber lasers and amplifiers[J]. Appl Opt, 2010, 49(25): F71-78 .
- [5] Dudley J M, Genty G, Coen S. Super-continuum generation in photonic crystal fiber [J]. Rev Mod Phys, 2006, 78 (4): 1135-1184.
- [6] Cumberland B A, Travers J C, Popov S V, et al. 29 W high power CW super-continuum source [J]. Opt Express, 2008, 16(8): 5954-5962.
- [7] Agrawal Govind P. Nonlinear fiber optics theory and application (Chinese version), 2010: 110-116.
- [8] Zhao Lei, Wang Jianjun, Lin Honghuan, et al. Experimental research of high conversion efficiency all fiber super-continuum source [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(8): 1143-1147. (in Chinese)
- [9] Wang Yanbin, Xiong Chunle, Hou Jing ,et al.. Modeling of four-wave mixing and super-continuum with long pulses in photonic crystal fibers[J]. Acta Phys, 2011, 60(1): 014201.
- [10] Qin Aijun, Wang Zefeng, Hou Jing, et al. Coherence properties of the supercontinuum generated in anomalous dispersion region of photonic crystal fibers [J]. Acta Phys, 2012, 61(12): 124211.