

28 W 高功率超连续谱光纤激光光源

高 静, 于 峰, 匡鸿深, 葛廷武, 王智勇

(北京工业大学 激光工程研究院 国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

摘 要: 报道了一个全光纤结构的高功率超连续谱激光光源。利用自行搭建的环形腔掺镱脉冲光纤激光器作为种子源, 采用三级 MOPA 功率放大, 得到了平均功率为 62 W, 中心波长为 1 065 nm, 3 dB 谱宽 15 nm, 重复频率为 118 MHz 的皮秒锁模脉冲输出, 将其耦合进零色散波长为 1 040 nm 的光子晶体(PCF), 最终得到平均功率为 28 W, 谱宽覆盖范围为 600~1 700 nm 的超连续谱激光输出, 超连续谱的光-光转换效率为 45%。实验解决了高功率下大芯径掺杂光纤与 PCF 的耦合效率低的问题。

关键词: PCF; 超连续谱; 脉冲光纤激光器

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-2840-04

High power 28 W supercontinuum fiber laser source

Gao Jing, Yu Feng, Kuang Hongshen, Ge Tingwu, Wang Zhiyong

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

Abstract: An all-fiber high power supercontinuum laser source was experimentally reported. An ytterbium-doped ring fiber oscillator was established as the seed source. By utilizing a three-stage master oscillator power amplifier (MOPA), the signal light average power was amplified to 62 W with a central wavelength of 1 065 nm, the 3 dB spectral bandwidth was 15 nm, and the repetition rate was 118 MHz. By coupling the amplified pulsed laser into a piece of photonic crystal fiber(PCF) with a 1 040 nm zero-dispersion wavelength, supercontinuum with 28 W output average power was obtained, the spectrum range was covering from 600 nm to 1 700 nm, and the optical conversion efficiency is 45%. In this experiment, the coupling problem between large core doped fiber and photonic crystal fiber at high output power was also solved.

Key words: photonic crystal fiber; supercontinuum; pulse fiber laser

收稿日期: 2013-06-18; 修订日期: 2013-07-14

基金项目: 科研基地-科技创新平台-光纤激光器研究平台-高功率全光纤激光器的开发(PXM2011_014204_09_000060)

作者简介: 高静(1988-), 女, 博士生, 主要从事光纤激光器、超连续谱光纤激光器方面的研究。Email: gaojinggigi@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王智勇(1970-), 男, 博士生导师, 主要从事大功率半导体激光器、大功率半导体激光关键器件制备与集成、大功率半光纤激光器方面的研究。Email: zywang@bjut.edu.cn

0 引言

超连续谱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、交叉相位调制、受激拉曼散射和四波混频等非线性效应,使得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^[1-4]。由于它具有平坦的宽带光谱、空间相干性好等优点,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,特别是光谱范围在可见波段的超连续白光光源,因与 CCD 探测器的响应谱段重叠,白光超连续激光器更适用于有源干扰和破坏光电探测设备。

一般可采用连续或者超短脉冲(纳秒、皮秒、飞秒)激光光源泵浦非线性介质产生超连续谱,非线性介质可以为块状材料、锥形光纤以及微结构光纤(光子晶体光纤(PCF))等^[5-8]。PCF由于具有灵活可控的色散以及高非线性特性,可以大大降低对泵浦光源的要求,非常适合作为产生超连续谱的非线性介质。连续激光泵浦产生超连续谱可以产生较高的

输出平均功率,但输出激光多为大于 $1\ \mu\text{m}$ 的超连续谱。利用超短脉冲激光光源产生超连续谱可以实现较宽的光谱输出,但不容易实现宽光谱下的超大功率输出。2010年,国内报导的输出功率为 35.6 W 的全光纤超连续谱光源,输出光谱范围为 650~1700 nm^[9]。2012年,国内实现超连续谱的最高输出功率为 177.6 W,其光谱范围为 1064~2000 nm^[10]。

北京工业大学于 2011 年在国内首先突破了 8 W 的白光超连续谱输出,光谱范围覆盖 450~1700 nm^[11]。结合其在脉冲光纤放大器以及 PCF 方面开展的研究工作,利用自行搭建的环形腔种子源,采用 MOPA 结构经过三级功率放大,使 35 mW 的信号光放大得到了平均功率为 62 W,中心波长为 1065 nm,重复频率为 118 MHz 的皮秒锁模脉冲激光,激励零色散波长为 1040 nm 的 PCF,产生了平均功率为 28 W 的白光超连续谱,光谱覆盖范围为 600~1700 nm,光谱平坦度为 10 dB。

1 实验装置

整个激光器采用如图 1 所示的三级放大的 MOPA

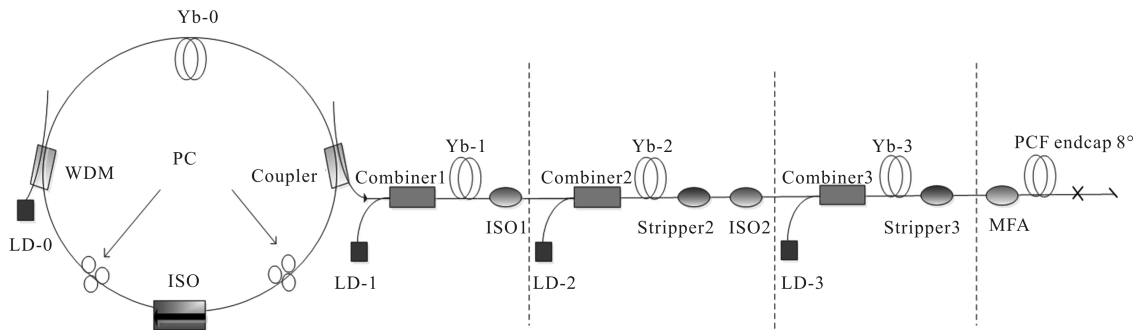


图 1 高功率超连续谱激光光源

Fig.1 High power supercontinuum laser source

结构。实验采用自行搭建的环型腔种子源,泵浦源为最大输出功率为 500 mW,波长为 976 nm 的单模半导体激光器,激光器腔体主要由偏振控制器、波分复用器、高浓度掺镱光纤、偏振相关隔离器、耦合输出器组成。得到重复频率为 27 MHz,脉宽为皮秒量级的锁模脉冲输出,中心波长为 1065 nm,3 dB 光谱宽度 15 nm;为提高放大器非线性阈值,对种子进行重复频率 4 倍频以后进入一级放大。

一级放大级增益介质选用长度为 10 m 的 5/125 μm 双包层光纤,吸收系数为 1.7 dB/m@975 nm;本级采

用包层泵浦的形式,所用(2+1) \times 1 的耦合器输入端为 HI 1060 单模光纤,输出端为 5/125 μm 双包层光纤;泵浦源为一个最高输出功率为 9 W 波长为 975 nm 的 LD,通过 105/125 μm ,数值孔径 0.22 的光纤进入耦合器;为了防止下一级反向光对器件造成损害,被放大的信号光再经过一个工作中心波长为 1064 nm、隔离度为 40 dB 的光隔离器,进入二级放大。

二级放大级增益介质选用长度为 3 m 的 10/130 μm 双包层光纤,吸收系数为 5 dB/m@975 nm;本级采用包层泵浦的形式,所用(2+1) \times 1 的耦合器输入端为

HI1060 单模光纤, 输出端为 10/130 μm 光纤; 泵浦源为 2 个最高输出功率为 9 W 波长为 975 nm 的 LD, 在进入第三级放大级之前为剥除多余的泵浦光, 在二级增益光纤之后熔接一个自制的泵浦光剥离器, 同样为了防止下一级反向光对器件造成损害, 被放大的信号光再经过一个工作中心波长为 1064 nm、隔离度为 40 dB 的光隔离器, 进入三级放大。

三级放大级增益介质用长度为 3 m 的 15/130 μm 双包层光纤, 吸收系数为 5 dB/m@975 nm; 本级采用包层泵浦的形式, 所用(6+1) \times 1 的耦合器输入端为 10/130 μm 无源光纤, 输出端为 15/130 μm 双包层无源光纤, 泵浦源为 3 个最高输出功率为 25 W 波长为 975 nm 的 LD, 为剥除多余的泵浦光, 在三级增益光纤之后熔接一个自制的泵浦光剥离器。

三级放大输出信号光在进入 PCF 之前, 先熔接一个模场匹配器(MFA), 该 MFA 的输入输出端光纤分别为 15/130 μm 的双包层无源光纤和 1060XP 单模光纤。MFA 之后熔接一段长飞公司生产的零色散波长为 1040 nm 的 PCF。图 2 为实验中使用的 PCF 横截面的扫描电镜图以及其群速度色散曲线。为保证高功率输出端不被破坏, 在 PCF 输出端熔接一段无源光纤作为端帽, 端帽输出端切成 8 $^\circ$ 角。

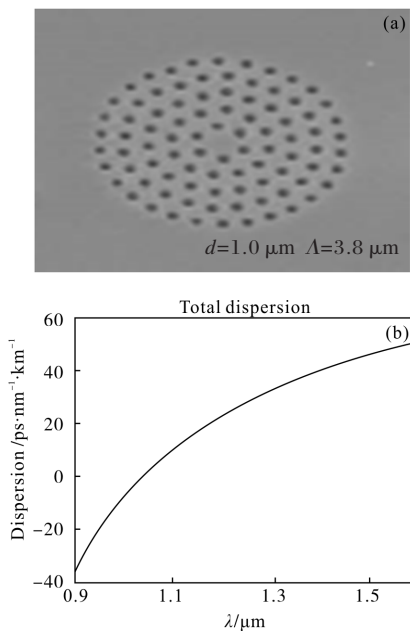


图 2 PCF 横截面扫描电镜图及 PCF 色散曲线

Fig.2 PCF cross-sectional scanning electron micrograph and dispersion curve of PCF

2 实验结果及讨论

实验中种子源利用非线性偏振旋转(NPR)效应实现了稳定的自启动锁模脉冲, 平均功率为 80 mW, 中心波长为 1065 nm, 3 dB 光谱宽度为 15 nm, 重复频率为 27 MHz。种子源的光谱图和脉冲序列图如图 3 所示。

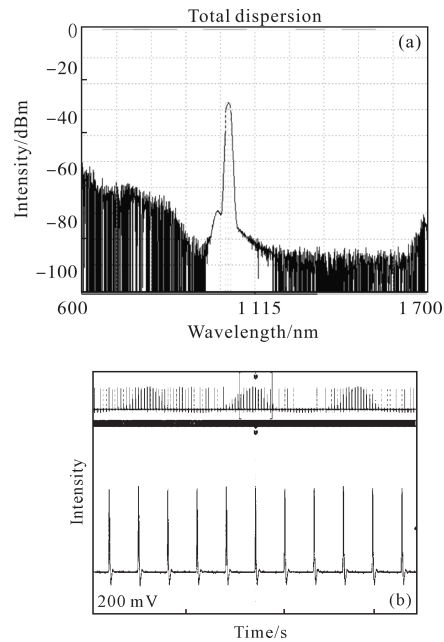


图 3 种子源的光谱图和种子源的脉冲序列图

Fig.3 Seed source spectrum and seed source pulse sequence

为提高放大级非线性效应阈值, 对种子进行重复频率 4 倍频以后产生的重复频率为 118 MHz, 得到平均功率为 35 mW 的信号光输出。在一级泵浦光为 5 W 时, 得到一级放大级信号光输出功率为 1 W; 在二级泵浦光为 15 W 时, 得到二级信号光输出功率为 9 W; 在三级泵浦光为 70 W 时, 得到信号光的输出功率为 62 W。整个放大器放大效率为 69%。放大器中所采用的泵浦剥离器均为自制, 且散热良好, 稳定性好。

三级放大器后熔接 MFA, 该器件是通过合理的设计优化无源光纤的长度和芯径选择, 采用 Vytran 公司的光纤熔接机制作而成, 在信号光输入为 62 W 时, 得到经 MFA 后输出的信号光为 47.2 W, 模场匹配效率为 76%, 散热良好, 可靠性高。

在 MFA 之后熔接一段 PCF, 采用藤仓公司生产的 45F 光纤熔接机, 通过调整放电时间放电电流等

参数,使 PCF 与 1060XP 单模光纤的损耗控制在 0.2 dB 以内,解决了高功率下大芯径掺杂光纤与 PCF 的耦合效率低的问题^[12-13]。实验中 PCF 的长度为 10 m,图 4 为该超连续谱光源的功率特性曲线图,当进入 PCF 的超短脉冲抽运功率为 47.2 W 时,得到 28 W 的超连续谱输出功率,PCF 超连续谱转换效率为 59%,总体光-光效率为 45%。图 5 为采用光谱仪(YOKOGAWA6730C)测得的超连续谱输出光谱图,输出光谱覆盖 600~1700 nm,光谱平坦度为 10 dB。

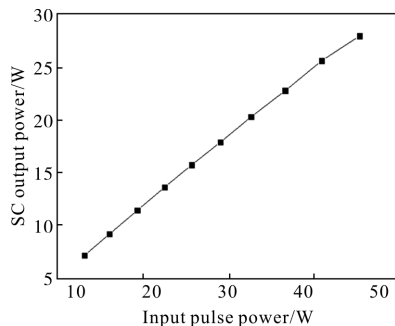


图 4 超连续谱输出功率随抽运功率的变化

Fig.4 Supercontinuum output power versus picosecond laser pump power

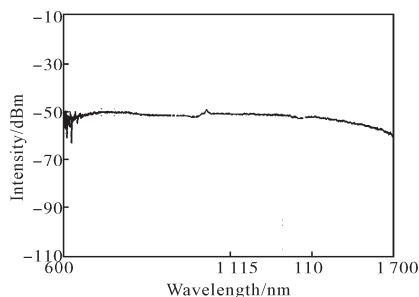


图 5 PCF 产生超连续谱输出光谱图

Fig.5 Supercontinuum output spectrum of PCF

3 结论

利用自行搭建的环形腔掺镱脉冲种子源,采用 MOPA 结构经过三级功率放大,得到了平均功率为 62 W,中心波长为 1065 nm,重频为 118 MHz 的皮秒锁模脉冲激光,激励零色散波长为 1040 nm 的长度为 10 m 的 PCF,产生了平均功率为 28 W 的超连续谱,光-光转换效率为 45%。通过自制 MFA 结合低电流多次放电熔接方式,解决了高功率下大芯径掺杂光纤与 PCF 耦合效率低的问题,超连续谱谱宽覆盖 600~1700 nm,光谱平坦度为 10 dB。

参考文献:

- [1] Tian X L, Tang M, Shum P P, et al. High-energy laser pulse with a submegahertz repetition rate from a passively mode-locked fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2009, 34: 1432-1434.
- [2] Chen C J, Wai P K A, Menyuk C R. Self-starting of passively mode-locked lasers with fast saturable absorbers [J]. *Optics Letters*, 1995, 20: 350-352.
- [3] Nielsen C K, Ortac B, Schreiber T, et al. Self-starting self-similar all-polarization maintaining Yb-doped fiber laser [J]. *Optics Express*, 2005, 13: 9346-9351.
- [4] Ortac B, Schmidt O, Schreiber T. High-energy femtosecond Yb-doped dispersion compensation free fiber laser [J]. *Optics Express*, 2007, 15: 10725-10731.
- [5] Alfano R R, Shapiro S L. Emission in the region 4000 Å to 7000 Å via four-photon coupling in glass [J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24: 584-587.
- [6] Coen S, Chau A H L, Leonhardt R, et al. White-light supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2001, 26: 1356-1358.
- [7] Champert P A, Popov S V, Taylor J R. Generation of multiwatt, broadband continua in holey fibers [J]. *Optics Letters*, 2002, 27: 122-124.
- [8] Popov S V, Champert P A, Solodyankin M A, et al. Seeded fibre amplifiers and multi-watt average power continuum generation in holey fibres [C]//Proceedings OSA Annual Meeting, 2002: 117.
- [9] Chen Shengping, Wang Jianhua, Chen Hongwei, et al. High power and high efficiency 35.6 W all-fiber supercontinuum source [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(12): 3018. (in Chinese)
- [10] Song Rui, Hou Jing, Chen Shengping, et al. All-fiber 177.6W supercontinuum source [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(5): 054217. (in Chinese)
- [11] Ge Tingwu, Yu Feng, Zhang Wenqi, et al. All-fiber supercontinuum laser output power exceeded 8 W [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(2): 2003-2006. (in Chinese)
- [12] Xi Xiaoming, Chen Zilun, Sun Guilin, et al. Fusion splicing of small solid core photonic crystal fibers with conventional fibers based on controlled hole collapse [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(1): 0106004. (in Chinese)
- [13] Zhang Wei, Zhang Lei, Chen Shi, et al. Low loss splicing experiment of high nonlinearity photonic crystal fiber and single mode fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(10): 1389-1393. (in Chinese)