

皮秒脉冲泵浦的高功率超连续谱光源*

陈胜平, 谌鸿伟, 王建华, 陈子伦, 侯静, 许晓军, 陈金宝, 刘泽金
(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 实验研究利用皮秒脉冲泵浦光子晶体光纤产生高功率超连续谱输出, 探讨制作高功率全光纤超连续谱光源的关键技术, 分析不同结构皮秒脉冲光纤激光器泵浦光子晶体光纤产生超连续谱的优缺点。应用重复频率倍增技术降低激光器自身的非线性效应, 得到性能参数合适的高功率皮秒脉冲光纤激光器; 采用后处理技术将光子晶体光纤输入端扩芯后与双包层光纤进行低损耗熔接, 以增加皮秒激光的耦合效率; 得到 35.6 W 高功率全光纤超连续谱输出, 光谱覆盖 650 nm ~ 1700 nm。

关键词: 超连续谱; 超短脉冲; 光子晶体光纤; 高功率; 全光纤

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)01-0001-03

Picosecond laser pumped high power supercontinuum source

CHEN Shengping, CHEN Hongwei, WANG Jianhua, CHEN Zilun, HOU Jing, XU Xiaojun, CHEN Jinbao, LIU Zejin
(College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A picosecond fiber laser was applied for high power supercontinuum generation (SCG) in photonic crystal fiber (PCF), the key technical issues of fabricating high power all fiber supercontinuum sources were considered and the advantages and disadvantages of picosecond fiber lasers in several configurations for SCG in PCF were analyzed. By using a repetition rate increasing system, a high power picosecond fiber laser suitable for SCG was constructed. By enlarging the core of the PCF at the input end through post-processing method, low splicing loss was realized between the double cladding fiber and the PCF. 35.6 W supercontinuum output is realized with spectrum covering the wavelength range from 650 nm to 1700 nm.

Key words: supercontinuum generation; ultrashort pulsed fiber laser; photonic crystal fiber; high power; all fiber

超连续谱光源^[1], 俗称白光激光器, 其原理是激光与非线性介质相互作用产生的光谱极大展宽现象。早期超连续谱在块状介质中产生, 形成机制主要是自相位调制, 要求高密度的聚焦光束和较长的作用距离。衍射效应限制了作用距离, 因而对光源峰值功率提出极高要求, 成为早期超连续谱产生的一大难点。光子晶体光纤^[2-3]的出现解决了这一难题, 其良好的光束约束能力提高了光与物质的相互作用距离, 其灵活可控的色散特性又满足了超连续谱产生所需的各种相位匹配条件, 大大降低了超连续谱产生对光源的要求。中等峰值功率的脉冲光甚至是连续光都可在光子晶体光纤中转化成超连续谱输出。目前国外报道的 50 W 最高功率超连续谱输出即是采用连续波光纤激光器泵浦^[4], 国内也有报道采用连续波光纤激光器泵浦光子晶体光纤得到 12 W 超连续谱输出^[5]。连续波泵浦产生超连续谱可以得到较

高输出功率, 但存在转换效率较低、所需光纤长度较长、光谱范围控制困难等缺点。短脉冲激光泵浦超连续谱具有高转换效率和良好光谱控制能力, 不过, 受到非线性效应和激光损伤限制, 短脉冲激光器输出功率很难提高。国际上短脉冲激光泵浦产生高功率超连续谱的报道较少, 得到的最大功率为 39 W^[6], 国内此前仅在 10 W 以下^[7-8]。值得一提的是, 目前见于报道的高功率超连续谱光源均含透镜耦合结构, 稳定性和可靠性较差。

我们采用重复频率倍增技术降低非线性效应, 实现了百瓦级全光纤皮秒脉冲激光器^[9], 在此基础上, 采用全光纤结构, 利用 57.7 W 皮秒激光器泵浦, 得到 35.6 W 超连续谱输出, 为全光纤超连续谱光源最高输出功率。

1 高功率皮秒脉冲光纤激光器

如何有效避免非线性效应是制作高功率皮秒

* 收稿日期: 2011-10-09

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目; 教育部新世纪优秀人才计划资助项目 (NCET-08-0142); 国家自然科学基金资助项目 (10904173, 61077076, 61007037); 国防科技大学研究生创新基金资助项目 (B110704); 湖南省研究生创新基金资助项目 (CX2011B034)

作者简介: 陈胜平 (1979-), 男, 湖北荆州人, 副研究员, 博士, E-mail: chespn@163.com

脉冲光纤激光器的主要难点,如何将皮秒激光高效耦合进光子晶体光纤中是制作高功率超连续谱光源的主要难点。在前期研究工作中,通过逐级增大放大器的纤芯面积,同时采用重复频率倍增的办法降低峰值功率,采用 MOPA 结构成功实现了近百瓦皮秒脉冲输出^[9]。不过,该激光器输出光纤芯径为 30 μm ,将其输出光耦合进芯径只有几微米的光子晶体光纤中难度较大。虽然选用了合适的透镜进行光束耦合,也只得到近 3W 超连续谱输出功率^[10]。该方案超连续谱输出功率受到空间耦合系统稳定性和光纤端面反馈引起激光器不稳的双重限制。针对这一问题,设计了一种全光纤结构的超连续谱光源,采用百瓦级皮秒脉冲光纤激光器的前级放大器输出光泵浦光子晶体光纤,得到近 7W 输出功率^[7]。由于该前级放大器输出光纤芯径只有 15 μm ,可以通过低电流多次放电的方式与光子晶体光纤进行熔接。不过,受到放大器输出端隔离器的限制,该皮秒激光源的功率不能超过 20W,限制了由其泵浦产生的超连续谱功率。

由此可以看出,为了得到更高功率超连续谱输出,需要研制具有较小芯径($\leq 15\mu\text{m}$)和较高功率($\geq 20\text{W}$)的皮秒脉冲光纤激光器。为此,设计了如图 1 所示的全光纤结构高功率皮秒脉冲激光器。整个激光器是一个四级 MOPA 结构。第一级为种子源,采用 SESAM 锁模的单模掺镱光纤激光器,实现重复频率 59.8MHz、脉宽小于 20ps 的锁模脉冲输出。其后加上一隔离器避免反馈光,一个滤波器滤除多余的 ASE 成分,一个重复频率倍增器($f \times 8$)将重复频率增加到 478MHz,以降低后级放大中的非线性效应。经过重复频率倍增器之后的光功率约 10mW。第二级为一单模掺镱光纤预放大器,采用 450mW 单模 LD 通过 WDM 对单模掺镱光纤进行泵浦,得到约 110mW 输出光。第三级为一双包层掺镱光纤预放大器,通过(1+1) $\times 1$ 光纤合束器将 9W 多模 LD 泵浦光耦合进纤芯 15 μm 、内包层 130 μm 的掺镱双包层光纤中,得到大于 3.5W 输出光。第四级为一双包层掺镱光纤功率放大器,通过(2+1) $\times 1$ 光纤合束器将两个 50W 多模 LD 输出光耦合进纤芯 15 μm 、内包层 130 μm 的掺镱双包层光纤中,得到 57.7W 高功率输出。各级放大器之间均有光纤隔离器避免反馈光引起的器件损坏和激光器不稳定。最后一级功率放大器输出端熔接有一段长约 1.5m 的匹配双包层无源光纤,在掺镱光纤和无源光纤的熔接点处设有泵浦倾泻装置,滤除未被完

全吸收的泵浦光。输出端光纤采用 8°斜角避免光反馈。

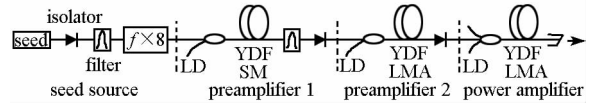


图 1 MOPA 结构的皮秒脉冲光纤激光器

Fig. 1 Experimental setup of the picosecond fiber laser in MOPA configuration

图 1 中的激光器最后一级功率放大器不含隔离器,因而其输出功率不受隔离器承载功率限制,可以突破 20W。与文献[9]中的百瓦皮秒激光器相比,图 1 中激光器的最大特点是功率放大部分采用了纤芯 15 μm 、内包层 130 μm 的双包层掺镱光纤。文献[9]中的激光器功率放大部分采用纤芯 30 μm 、内包层 250 μm 的双包层掺镱光纤。250 μm 的内包层允许采用(6+1) $\times 1$ 的泵浦合束器进行泵浦光的耦合,因而可以用 6 个 20W 的 LD 进行泵浦,输出功率达到百瓦级。图 1 中的功率放大部分内包层只有 130 μm ,只能选用(2+1) $\times 1$ 的泵浦合束器,采用两个 LD 进行泵浦,如果选用与文献[9]中相同的 20W 的 LD,只能得到约 30W 皮秒激光输出。为了得到更高功率的皮秒激光,我们在该激光器中选用了输出功率达 50W 的 LD 对功率放大器进行泵浦。图 2 所示为功率放大级输出功率随泵浦功率的变化曲线。从图中可以看出,输出功率随泵浦功率的增加而增加,在 104.3W 最高泵浦功率下,得到 57.7W 输出功率。整个曲线没有出现明显的饱和或功率下降趋势,说明只要泵浦功率进一步提升,输出功率还可增加。图 2 中的插图为最高功率下的线性光谱图,可以看出,激光峰分裂成两瓣,这是由光纤中的自相位调制引起的。在对数坐标下还可以观察到产生了拉曼峰。不过,激光输出的主要能量集中在

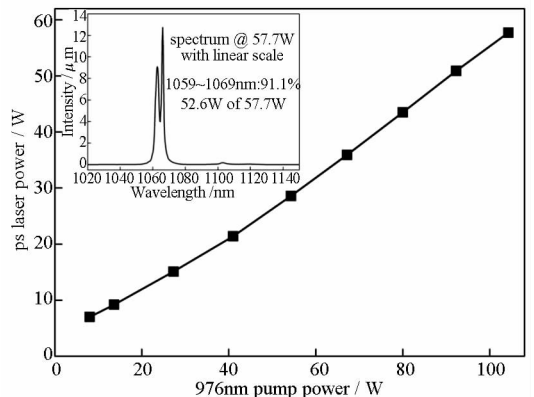


图 2 皮秒脉冲光纤激光器输出功率特性曲线,插图为最高功率下的光谱图

Fig. 2 Power property of the picosecond fiber laser, inset is the output spectrum at the maximum power

峰值附近。对光谱进行积分计算可知,激光峰附近 $\pm 5\text{nm}$ 范围包含了 91.1% 的激光能量,可以用于泵浦光子晶体光纤产生超连续谱。

2 高功率超连续谱光源

图 3 所示为本文所用光子晶体光纤横截面扫描电镜图,其芯径约 $7\mu\text{m}$,空气孔呈六边形排布,为国内长飞公司生产,计算得到其零色散点在 1150nm 附近。在文献[7]中,将 20W 皮秒光纤激光器尾纤与该光子晶体光纤通过低电流多次放电的方式进行熔接,得到 7W 超连续谱输出功率。本文中 57.7W 皮秒激光器尾纤与文献[7]中 20W 皮秒激光器尾纤相同,也可以采用与光子晶体光纤进行直接熔接的方式。不过,虽然皮秒激光器输出尾纤芯径只有 $15\mu\text{m}$,仍然比光子晶体光纤的 $7\mu\text{m}$ 芯径大很多,将这两种光纤进行直接熔接损耗很大,约 2dB ,如此大的损耗造成高功率下的光纤损坏。即使采用强制制冷措施,当皮秒激光器功率接近 25W 时,熔接点即被烧断,将超连续谱输出功率限制在 12W 左右。为进一步提高超连续谱输出功率,需在皮秒激光器尾纤与光子晶体光纤之间制作一低损耗熔接点。实验中,先通过一系列的后处理技术^[11]将光子晶体光纤输入端的芯径扩展到 $15\mu\text{m}$ 左右,再与皮秒激光器尾纤进行低电流多次放电熔接,得到的熔接点损耗低于 0.5dB ,可在高功率下稳定工作。采用这种方式将 31m 光子晶体光纤熔接在皮秒激光器尾纤上,并在光子晶体光纤另一端制作 8° 斜角避免光反馈,可得到高功率超连续谱输出。

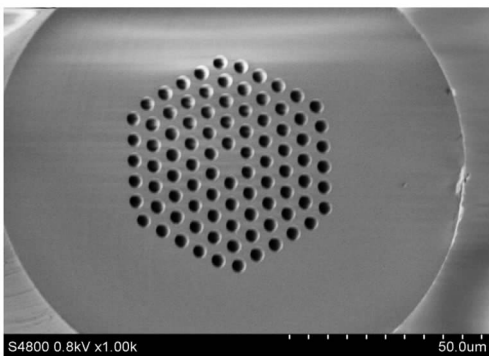


图 3 光子晶体光纤扫描电镜图

Fig. 3 SEM graph of the photonic crystal fiber

图 4 所示为超连续谱输出功率随皮秒泵浦激光功率的变化曲线。在 57.7W 皮秒激光泵浦下,得到最高 35.6W 超连续谱输出功率,光-光转换效率为 61.7% 。从图中可以看出,超连续谱输出功率随皮秒激光功率的上升而上升,没有明显的功率下降或饱和的征兆,说明只要采用更高功率

的泵浦源,这一结构还有潜力得到更高功率超连续谱输出。

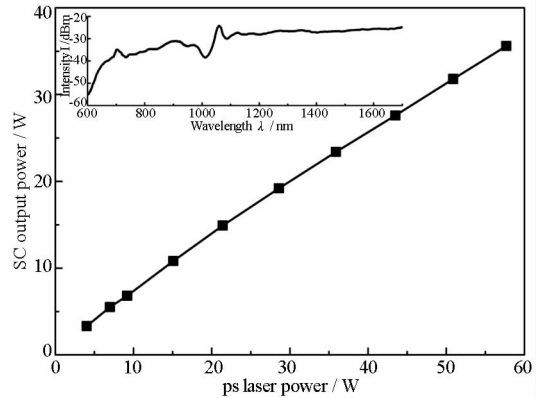


图 4 超连续谱输出功率随抽运功率的变化,插图为超连续谱光谱图

Fig. 4 Output power versus pump power of the supercontinuum source, inset is the spectrum of the supercontinuum

该超连续谱光源输出光谱随泵浦功率的演化趋势与文献[7]中所述类似。在较低的泵浦功率下先产生拉曼效应,光谱主要向长波端扩展。随着泵浦功率逐渐增大,多级拉曼峰逐级出现。当多级拉曼频移将激光能量扩展到光子晶体光纤零色散点 (1150nm) 的长波端后,在四波混频、孤子产生、孤子分裂以及色散波产生的作用下,输出光谱中开始出现激光峰短波端的成分。同时,在四波混频、自相位调制、交叉相位调制、孤子分解等效应的共同作用下,光谱逐渐变宽且平坦。图 4 中的插图为最高功率下的超连续谱光谱图,从图中可以看出,输出光谱覆盖了 $650\text{nm} \sim 1700\text{nm}$ 。受到光谱仪观测范围的限制, 1700nm 以上的光谱成分未能观察到。

3 结论

实验研究了利用皮秒脉冲光纤激光器泵浦光子晶体光纤产生高功率超连续谱输出,探讨了制作高功率全光纤超连续谱光源的关键技术,分析了不同结构皮秒脉冲光纤激光器泵浦光子晶体光纤产生超连续谱的优缺点。通过优化设计皮秒脉冲泵浦源和超连续谱光源的结构参数,在 57.7W 皮秒脉冲泵浦下,得到 35.6W 高功率全光纤超连续谱输出,属全光纤超连续谱光源最高输出功率,为高功率超连续谱光源的实用化铺平了道路。

(下转第 23 页)

强声波脉冲传播及其频谱的影响。研究结果表明,介质的吸收效应对脉冲波形具有平滑和展宽作用,并使得脉冲能量向低频端靠近。随传播距离增加,MgSO₄弛豫吸收会造成强声波脉冲能量的逾量耗散。本文的研究结果在一定程度上为声源的发射提供了理论指导。

参考文献 (References)

- [1] 李宁,陈建峰,黄建国,等. 各种水下声源的发声机理及其特性[J]. 应用声学, 2009, 28: 241-248.
LI Ning, CHEN Jianfeng, HUANG Jianguo, et al. Sounding mechanisms and characteristics of various underwater sound sources [J]. Applied Acoustics, 2009, 28: 241-248. (in Chinese)
- [2] 张军,曾新吾,张振福,等. 强声波脉冲在水下目标处置中的应用[C]//全国第一届水下安保技术学术会议论文集. 北京:Scientific Research, 2011: 194-197.
ZHANG Jun, ZENG Xinwu, ZHANG Zhenfu, et al. Application of intensive acoustic pulse in underwater target disposal [C]// The Proceeding of the First National Conference on Underwater Security and Technology. Beijing, April 22-24, 2011. Beijing: Scientific Research, 2011: 194-197.

(上接第3页)

参考文献 (References)

- [1] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. Rev. Mod. Phys., 2006, 78(4): 1135-1184.
- [2] Russell P. Photonic crystal fibers [J]. Science, 2003, 299(5605): 358-1184.
- [3] Knight J C. Photonic crystal fibres [J]. Nature, 2003, 424(6950): 847-851.
- [4] Travers J C, Rulkov A B, Cumberland B A, et al. Visible supercontinuum generation in photonic crystal fibers with a 400W continuous wave fiber laser [J]. Opt. Express, 2008, 16(19): 14435-14447.
- [5] Guo C, Ruan S, Yan P, et al. Flat supercontinuum generation in cascaded fibers pumped by a continuous wave laser [J]. Opt. Express, 2010, 18(11): 11046-11051.
- [6] Chen K K, Alam S, Price J H V, et al. Picosecond fiber MOPA pumped supercontinuum source with 39W output power [J]. Opt. Express, 2010, 18(16): 5426-5432.

(in Chinese)

- [3] Zhang J, Zeng X W, Wang Y B, et al. Numerical simulation of the buried object detection based on underwater plasma acoustic source [J]. Applied Mechanics and Material, 2012, 105: 80-83.
- [4] Zhang J, Zeng X W, Wang Y B, et al. Opto-spectrum measurement and analysis of underwater plasma acoustic source pulse discharge [J]. Applied Mechanics and Material, 2012, 107: 1872-1875.
- [5] Urlick R J. Sound propagation in the sea [R]. DARPA. 1979: Chp. 4.
- [6] 钱祖文. 非线性声学 [M]. 2版. 北京:科学出版社, 2009: Chp. 5.
QIAN Zuwen. Nonlinear acoustics [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2009: Chp. 5.
- [7] Hamilton M F, Blackstock D T. Nonlinear acoustics [M]. Academic Press, 1997: Chp. 3.
- [8] Lee Y S, Hamilton M F. Time domain modeling of pulsed finite amplitude sound beams [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1995, 97(2): 906-917.
- [9] Ainslie M A, McCollm J G. A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1998, 103(3): 1671-1672.
- [7] Chen H W, Chen S P, Hou J. 7W All Fiber Supercontinuum Source [J]. Laser Phys., 2011, 21(1): 191-193.
- [8] 方晓惠,王清月,刘俊杰,等. 3.95W 高功率超连续光谱产生的实验研究 [J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1585-1588.
FANG Xiaohui, WANG Qingyue, LIU Junjie, et al. Experimental research on the 3.95W high power supercontinuum generation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(6): 1585-1588. (in Chinese)
- [9] Chen S P, Chen H W, Hou J, et al. 100W all fiber picosecond MOPA laser [J]. Opt. Express, 2009, 17(26): 24008-24012.
- [10] 陈胜平, 谌鸿伟, 侯静, 等. 30W 皮秒脉冲光纤激光器及高功率超连续谱的产生 [J]. 中国激光, 2010, 37(8): 1943-1949.
CHEN Shengping, CHEN Hongwei, HOU Jing, et al. 30W picosecond pulsed fiber laser and high power supercontinuum generation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 1943-1949. (in Chinese)
- [11] Chen Z, Xiong C, Xiao L M, et al. More than threefold expansion of highly nonlinear photonic crystal fiber cores for low-loss fusion splicing [J]. Opt. Lett., 2009, 34: 2240-2245.