

文章编号: 0253-2239(2010)09-2541-03

国产光子晶体光纤实现 4.6 W 全光纤超连续谱输出

湛鸿伟 陈胜平 侯 静

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 采用自行搭建的被动锁模皮秒脉冲掺镱光纤激光器作为抽运源, 将其输出尾纤与国产光子晶体光纤(PCF)进行低损耗熔接, 构成全光纤结构的高功率超连续谱(SC)光源。全光纤结构提高了超连续谱产生系统的稳定性和转换效率。实验观察了皮秒脉冲在正常色散区抽运光子晶体光纤产生超连续谱过程, 并对超连续谱的产生机理进行了理论解释。该光源输出平均功率为 4.6 W 的超连续谱, 超连续光谱展宽超过 1000 nm, 光光转换效率为 54%。

关键词 非线性光学; 超连续谱; 光子晶体光纤; 全光纤

中图分类号 TN253; O437 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2541

4.6 W All-Fiber Supercontinuum Generation Using Homemade Photonic Crystal Fiber

Chen Hongwei Chen Shengping Hou Jing

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A high-power all-fiber supercontinuum(SC) source is demonstrated by splicing a picosecond fiber laser with a homemade photonic crystal fiber(PCF). The all-fiber configuration enhanced the stability and conversion efficiency of the system. The supercontinuum excited by picosecond pulses in the normal dispersive regime is studied. The supercontinuum broadening process is explained theoretically. The ultimate supercontinuum spans over 1000 nm with an average power up to 4.6 W and a conversion light-light transfer efficiency of 54%.

Key words nonlinear optics; supercontinuum; photonic crystal fiber; all fiber

1 引 言

超连续谱光源在通信、医学、军事等领域具有非常广阔的应用前景。1970 年 Alfano 等^[1]利用皮秒激光脉冲抽运块状 BK7 光学玻璃, 获得 400~700 nm 的超连续谱。利用普通非线性介质虽然可以产生超连续谱, 但所需初始脉冲的功率较高, 且产生的超连续谱光谱宽度较窄。光子晶体光纤(PCF)的诞生改变了这一局面, PCF 结构设计的自由度很大, 使其能在具有高非线性系数的同时又具有灵活的色散特性, 因此利用 PCF 能够产生性能优良的超连续谱。1999 年 Ranka 等^[2]首次采用飞秒脉冲抽

运 PCF, 观察到 400~1600 nm 的超连续谱。此后, 国内外对基于 PCF 的超连续谱产生做了大量研究^[3~9]。国内天津大学等单位较早开展了利用 PCF 产生超连续谱的工作, 不过采用国产 PCF 产生高功率超连续谱的报道还很少见。

在前期研究工作中采用皮秒脉冲抽运国产 PCF 获得了 2.8 W 的超连续谱, 但由于采用空间耦合抽运方式, 系统整体转换效率只有 26%, 并且出现高功率下超连续谱输出功率跳变现象^[10], 这使得该结构产生的超连续谱输出功率很难突破 3 W。2009 年赵磊等^[11]采用全光纤结构, 得到了转换效率很高的超连

收稿日期: 2010-03-05; 收到修改稿日期: 2010-04-11

基金项目: 中国博士后科学基金、国家自然科学基金(10904173)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0142)资助课题。

作者简介: 湛鸿伟(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器、光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: gfkdcchen@126.com

导师简介: 侯 静(1975—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光纤激光器、光子晶体光纤和光纤激光相干合成等方面的研究。E-mail: houjing25@sina.com

续谱输出,不过受抽运功率限制,其输出功率只有 380 mW。本文利用自制的被动锁模皮秒脉冲掺镱光纤激光器作为抽运源,采用全光纤结构对国产 PCF 进行抽运,得到 4.6 W 超连续谱输出。实验观察了超连续谱的产生过程,并进行了理论解释。

2 实验装置

全光纤高功率超连续谱光源的实验装置结构如

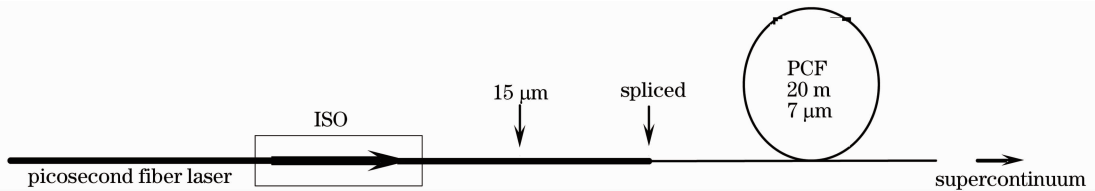


图 1 超连续谱产生实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup for supercontinuum generation

为了更加有效地利用抽运光和防止空间耦合系统引起的不稳定,把皮秒脉冲光纤激光器输出尾纤与 PCF 进行熔接构成全光纤结构。由于实验所用皮秒脉冲光纤激光器输出光纤芯径为 $15\ \mu\text{m}$,而所用 PCF 芯径只有 $7\ \mu\text{m}$,二者面积相差 4 倍多,皮秒脉冲激光输出光纤与 PCF 模场不匹配,如果按常规方法熔接则熔接损耗会很大。实验中,采用多次放电熔接法^[12],通过优化光纤熔接机的放电强度、放电时间等参数,多次低强度放电控制 PCF 空气孔塌缩来扩大 PCF 的模场直径,使两种光纤的模场尽可能地匹配,以减小熔接损耗。在整个熔接过程中利用光功率计实时监测 PCF 输出端的光功率,输出功率最大时停止放电。采用这种熔接技术保证了两种光纤之间的熔接具有较小的损耗,从而提高了全系统的转换效率。

3 实验结果和分析

利用上述全光纤超连续谱产生系统,用 8.53 W 的皮秒脉冲光纤激光抽运国产 PCF,获得了 4.63 W 的超连续谱输出,系统总的转换效率为 54%。图 2 为超连续谱输出功率随抽运功率的变化曲线。可以看出超连续谱输出功率随抽运功率单调上升,并未出现文献^[10]中采用空间耦合抽运方式引起的超连续谱输出功率跳变现象。这是由于全光纤结构避免了耦合光纤端面反射,并且皮秒激光输出端采取的隔离措施阻止了所有可能的反向传输光,保证了抽运源的稳定,从而在简化超连续谱产生系统结构的同时,提高其转换效率和系统稳定性。从图 2 可以

图 1 所示。其中产生超连续谱的抽运源为自行搭建的被动锁模皮秒脉冲掺镱光纤激光器,输出端光纤芯径为 $15\ \mu\text{m}$,中心波长为 1064 nm,重复频率为 60 MHz,脉冲宽度为 14 ps,平均功率为 8.53 W。所用 PCF 与文献^[10]相同,由国内长飞公司生产,长度约为 20 m,纤芯约为 $7\ \mu\text{m}$,零色散点在 1150 nm 附近。皮秒脉冲是在远离零色散点的正常色散区对光子晶体光纤进行抽运的。

看出,如果继续增加抽运功率,超连续谱输出功率还可以提升,但受抽运源功率限制,实验没能继续进行。

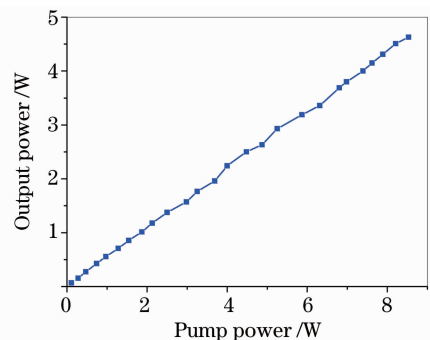


图 2 超连续谱输出功率随抽运功率的变化

Fig. 2 Supercontinuum output power versus pump power

超连续谱展宽的过程如图 3 所示,图例上标出 2 个功率值,前一个为超连续谱输出功率,后一个为此时的抽运功率大小。观察超连续谱展宽的整个过程可以看出,在低功率下(抽运功率小于 0.781 W),随着抽运功率的增加,脉冲光谱随之展宽。除了 1064 nm 处的激光峰外,还在 1120,1170 和 1220 nm 处出现了一阶、二阶、三阶的斯托克斯峰,在 1020 nm 处出现了反斯托克斯峰,此时的光谱主要向长波方向展宽。这是由于在光谱展宽的初始阶段,拉曼效应起主要作用,由于拉曼效应导致光谱展宽的非对称性,光谱向长波方向展宽较多,短波方向展宽很小。

当抽运功率为 0.781 W 时,各个拉曼峰相互独立,棱角分明。但当抽运功率增加到 0.970 W 时,各个拉曼峰之间的深坑逐渐被填平,整个光谱呈现

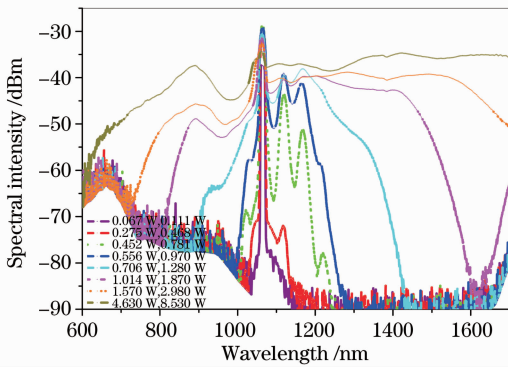


图 3 输出光谱随抽运功率的变化

Fig. 3 Spectrum variation with pump power

比较连续的形状,1020 nm 和 1220 nm 处的小峰几乎被展宽的光谱淹没。抽运功率进一步增加到 1.280 W 时,短波方向的展宽变得明显,在 930 nm 处又出现一个小峰。这是由于脉冲光谱展宽以后,拉曼效应产生的加宽光谱成分作为四波混频参量过程的抽运,满足相位匹配条件的四波混频开始起作用,使得光谱向长波和短波两个方向扩展。自相位调制、交叉相位调制将会影响四波混频的相位匹配过程。级联发生的四波混频过程使展宽的光谱逐渐变得连续、平滑。

当抽运功率大于 1.280 W 之后,光谱迅速向长波和短波两个方向扩展,并且抽运功率越高,超连续谱展得越宽,平坦度也越好。这是由于当超连续谱拓展到反常色散区以后,调制不稳定性导致长脉冲分解成许多超短脉冲,超短脉冲在反常色散区演化成高阶孤子,而高阶孤子又由于高阶色散效应发生孤子分解。在孤子分解和四波混频的共同作用下,光谱同时向长波和短波两个方向迅速拓展。抽运功率越高,则非线性效应越强,光谱就展得越宽,平坦度也越好。最终得到图 3 最上方曲线所示的光谱,超连续展宽超出所用光谱仪 600~1700 nm 的观测范围(主要是长波方向),1064~1700 nm 超连续谱的不平坦度小于 5 dB。从光谱图上看,600 nm 附近的可见光成分很少,但 PCF 的输出光束呈现红色。将输出光投射到白屏上,可看到输出光斑为一六角形包络的基模光斑。

4 结 论

报道了一个全光纤高功率超连续谱光源,该光源是由自行搭建的被动锁模皮秒脉冲掺镱光纤激光器输出端与国产 PCF 直接进行低损耗熔接而成。

利用该光源获得了平均功率为 4.6 W 的超连续谱,超连续谱展宽超出所用光谱仪的观测范围(600~1700 nm),光-光转换效率为 54%。

参 考 文 献

- 1 R. R. Alfano, S. L. Shapiro. Emission in the region 4000 to 7000 Å via four-photon coupling in glass[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, **24**(11): 584~587
- 2 J. K. Ranka, R. S. Windeler, A. J. Stentz. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 25~27
- 3 J. M. Dudley, G. Genty, S. Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2006, **78**(4): 1135~1184
- 4 B. A. Cumberland, J. C. Travers, S. V. Popov *et al.*. 29 W high power CW supercontinuum source[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(8): 5954~5962
- 5 J. C. Travers, A. B. Rulkov, B. A. Cumberland *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
- 6 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu *et al.*. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66
王清月,胡明列,柴路等.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
- 7 Zhang Hui, Guo Peng, Chang Shengjiang *et al.*. Supercontinuum spectra generation in the highly nonlinear liquid-core photonic-crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 134~138
张会,郭澎,常胜江等.高非线性液芯光子晶体光纤中超连续谱的产生[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s1): 134~138
- 8 Sun Tingting, Wang Zhi, Li Chuanqi. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber by using quasi-continuous pump[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 154~159
孙婷婷,王志,李传起.准连续光抽运光子晶体光纤产生超连续谱[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 154~159
- 9 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
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
- 10 Chen Shengping, Chen Hongwei, Hou Jing *et al.*. 30 W picosecond pulsed fiber laser and high power supercontinuum generation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1943~1949
陈胜平,湛鸿伟,侯静等.30 W 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
- 11 Zhao Lei, Wang Jianjun, Lin Honghuan *et al.*. Experimental research of high conversion efficiency all-fiber supercontinuum source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(8): 1143~1147
赵磊,王建军,林宏奂等.全光纤高效超连续谱光源实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(8): 1143~1147
- 12 Chen Zilun. Studies on mutual injection-locking of fiber lasers and post-processing techniques of photonic crystal fibers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009, 21~30
陈子伦.光纤激光器的相互注入锁定和光子晶体光纤的后处理技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2009,103~104