

研究快讯

七芯光子晶体光纤中百瓦量级超连续谱的产生*

谌鸿伟¹⁾ 韦会峰²⁾ 刘通¹⁾ 周旋风¹⁾ 李江²⁾ 童维军²⁾
陈子伦¹⁾ 陈胜平¹⁾ 侯静^{1)†} 陆启生¹⁾

1) (国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

2) (光纤光缆制备技术国家重点实验室, 长飞光纤光缆有限公司研发中心, 武汉 430073)

(2013年11月15日收到; 2013年12月8日收到修改稿)

采用平均功率为141.6 W的皮秒光纤激光泵浦一段国产七芯光子晶体光纤, 获得了平均功率为104.2 W、连续光谱覆盖范围从750至1700 nm以上的超连续谱输出. 详细研究了超连续光谱随泵浦功率增加的演变过程, 并对基于该七芯光子晶体光纤的超连续谱光源的光谱拓展和功率提升潜力进行相关的分析和讨论. 该研究结果对高功率超连续谱光源的发展具有一定的参考价值.

关键词: 多芯光子晶体光纤, 非线性光纤光学, 超连续谱

PACS: 42.65.-k, 42.65.Tg, 42.65.Re, 42.55.Wd

DOI: 10.7498/aps.63.044205

1 引言

1996年, Knight等^[1]成功拉制出第一根光子晶体光纤. 因为结构具有很大的设计自由度, 光子晶体光纤可在满足产生超连续谱所需的高非线性的同时又具有灵活的色散特性, 所以利用光子晶体光纤能够产生性能优良的超连续谱. 1999年, Ranka等^[2]采用飞秒脉冲泵浦一段光子晶体光纤, 观察到400—1600 nm的超连续谱产生. 此后, 国内外科研工作者对基于光子晶体光纤的超连续谱产生开展了大量研究工作^[3-12]. 在过去的十年间, 光子晶体光纤设计和制作工艺日趋成熟. 与此同时, 由于半导体激光器的发展和双包层光纤的广泛应用, 光纤激光器, 特别是工作波段在1 μm附近的掺镱光纤激光器的输出功率迅速提升^[13,14]. 由于光纤激光器与光子晶体光纤在波导结构和工作波段上具有天然的匹配性, 采用光纤激光泵浦光子晶体光纤使超连续谱光源的输出功率也得到快速提升, 目前已经达到百瓦量级^[15-18].

需要指出的是, 前期报道的这些超连续谱光源主要是基于单芯光子晶体光纤来实现的. 文献^[18]指出, 如何将泵浦激光高效率地耦合进入到光子晶体光纤是基于单芯光子晶体光纤的超连续谱光源在功率提升时所面临的巨大挑战. 即使泵浦激光的耦合问题得以解决, 由于单芯光子晶体光纤的模场直径相对较小, 热效应以及激光损伤等因素也从根本上限制了基于单芯光子晶体光纤的超连续谱光源的输出功率^[19]. 2011年, Modotto等^[20]采用Nd:YAG调Q微芯片激光器泵浦双折射多芯光子晶体光纤实现了毫瓦量级的宽带超连续谱产生. 2012年, 方晓惠等^[21]采用飞秒光纤激光泵浦多芯光子晶体光纤产生了5.4 W超连续谱. 尽管文献^[21]中超连续谱光源的平均功率水平不高, 但是该实验采用了多芯光子晶体光纤作为超连续谱产生的非线性介质, 并且产生的超连续谱在整个光谱波段内实现了同相超模输出, 这为实现高功率超连续谱的产生提供了新的思路. 我们在前期的研究工作中采用自制的皮秒光纤激光器泵浦一段多芯光子晶体光纤, 获得了平均输出功率为42.3 W的全

* 科技部国际科技合作专项(批准号: 2012DFG11470)和国防科学技术大学研究生创新基金(批准号: B110704)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: houjing25@sina.com

光纤化超连续谱输出^[22].

本文采用平均功率为 141.6 W 的皮秒光纤激光泵浦一段 20 m 长的国产双包层七芯光子晶体光纤, 获得了连续光谱覆盖范围从 750 至 1700 nm 以上, 平均输出功率为 104.2 W 的超连续谱. 详细研究了超连续光谱随泵浦功率增加的演变过程, 并对基于该七芯光子晶体光纤的超连续谱光源的功率提升和光谱拓展潜力进行相关的分析和讨论.

2 实验装置

实验中所用的皮秒脉冲光纤激光器采用主振荡功率放大结构, 包括与文献^[23]相同的被动锁模种子源和与类似的光纤激光放大链路. 被动锁模种子源输出脉冲的脉冲宽度为 13 ps, 脉冲重复频率约为 1.9 GHz, 中心波长为 1064 nm. 该皮秒光纤激光器的平均输出功率为 141.6 W, 脉冲峰值功率约为 3.6 kW. 该光纤激光器的输出尾纤采用纤芯/内包层尺寸为 15/130 μm 的双包层光纤.

作为超连续谱产生介质的七芯光子晶体光纤的端面光学显微照片如图 1 所示. 该七芯光子晶体光纤的空气孔按照六边形双包层结构排布, 其中内包层是 6 圈圆形空气孔, 空气孔直径为 1.45 μm , 空气孔间距为 2.45 μm ; 外包层是一圈椭圆型空气孔, 空气孔的长轴为 3.10 μm , 短轴为 2.25 μm ; 七芯光子晶体光纤的玻璃直径为 128 μm . 数值计算得到该七芯光子晶体光纤同相模的零色散波长为 1014 nm. 本实验研究中所用的七芯光子晶体光纤的长度为 20 m.

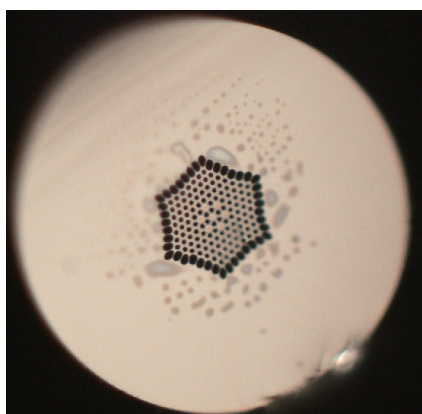


图 1 七芯光子晶体光纤端面结构

采用光子晶体光纤后处理技术^[24], 对七芯光子晶体光纤内包层的空气孔进行塌孔扩芯处理, 然后将皮秒光纤激光器的输出尾纤同输入端经过模

场直径扩大处理的七芯光子晶体光纤直接进行熔接, 构成全光纤化的超连续谱光源系统. 实验测试表明, 皮秒光纤激光器的输出尾纤与七芯光子晶体光纤的熔接点处的泵浦激光透过率大于 95%. 实验中, 泵浦光纤激光器和七芯光子晶体光纤都放置在水冷板上, 并且将两者之间的熔接点进行强制制冷, 从而对整个实验装置有效地进行热管理, 防止了热损伤. 七芯光子晶体光纤的输出端被研磨成八度斜角, 可有效地减少端面回光和防止端面激光损伤. 采用 Coherent EPM 2000 型功率计和 YOKOGAWA AQ6370C 型光谱仪对泵浦激光器以及产生的超连续谱的输出特性进行测量.

3 实验结果与讨论

实验首先测量了七芯光子晶体光纤中产生的超连续谱的光谱特性, 输出光谱随泵浦激光功率的演化如图 2 所示. 注意到泵浦激光的脉冲宽度为 20 ps 左右, 根据文献^[25]分类, 属于“长脉冲”泵浦. 泵浦激光中心波长为 1064 nm, 位于七芯光子晶体光纤的反常色散区, 且离零色散波长较远. 超连续谱的展宽过程与文献^[26]中的 PCF3 在 1064 nm 皮秒光纤激光泵浦下的超连续产生过程类似. 当泵浦功率为 4.21 W 时, 输出光谱向泵浦波长的两边对称地展宽. 由于脉冲峰值功率较低, 光场在七芯光子晶体光纤中分布面积大, 泵浦脉冲尚未在七芯光子晶体光纤中明显地激发非线性效应, 故此时测量到的基本为皮秒光纤激光器自身的光谱, 而自相位调制效应导致了皮秒光纤激光输出光谱出现对称展宽^[27]. 继续增加泵浦功率, 如图 2 中皮秒激光为 14.7 W 的情形, 输出光谱不再对称, 大部分的光谱成分向长波方向拓展. 在这一阶段, 由于调制不稳定性等因素导致泵浦脉冲分解成一系列的子脉冲, 进而孤子自频移效应导致光谱向长波方向展宽. 976 nm 处的光谱峰是由于皮秒光纤激光器中尚有半导体泵浦激光残余所致. 增加泵浦功率, 光谱继续向长波方向展宽, 并在正常色散区开始产生色散波. 如泵浦激光为 25.3 W 时, 950 nm 附近的光谱峰正是由于色散波产生而形成的. 继续增加泵浦功率, 孤子和色散波俘获、交叉相位调制等一系列的非线性过程牵引超连续光谱同时向两端扩展. 在 141.6 W 皮秒激光泵浦下的超连续光谱如图 2 中最上方的一条曲线所示, 光谱覆盖从 750—1700 nm 以上波段(由于仪器

限制, 超过 1700 nm 的光谱没能测量). 但是, 最终输出的超连续谱在泵浦波长的短波一侧的激发并不充分, 向短波方向拓展的连续光谱范围相对较窄, 仅 300 nm 左右 (1064—750 nm), 而长波方向达到 600 nm 以上.

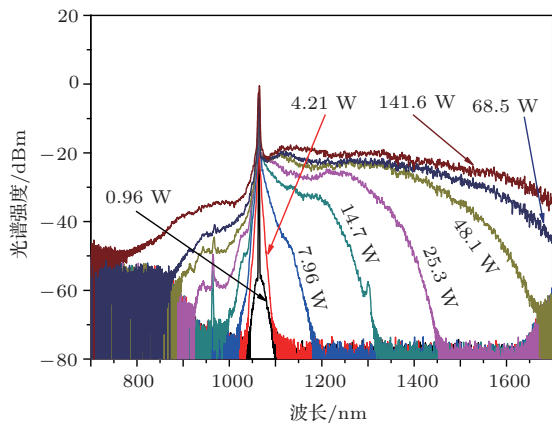


图 2 超连续光谱随泵浦激光功率的演化

根据反常色散泵浦产生超连续谱的相关理论, 脉冲内拉曼散射和孤子自频移效应会导致光谱红移展宽, 与此同时, 高阶孤子脉冲发生分解, 并向与之匹配的色散波转移能量, 从而产生短波方向的超连续光谱^[25]. 实验中, 在较低的泵浦功率下就观测到孤子自频移效应导致光谱向长波方向展宽. 但是, 因为泵浦波长远离光纤的零色散波长, 初始的调制不稳机制并未形成足够宽的光谱, 所以不能有效地激发位于正常色散区的色散波, 导致最后输出的超连续谱在泵浦波长的短波一侧并不理想^[28]. 可通过增加泵浦脉冲峰值功率来加剧孤子形成、高阶孤子分解、孤子自频移等过程, 进而有效激发短波端的色散波产生, 达到优化超连续光谱的目的, 这一点已被文献^[26]的实验所验证.

七芯光子晶体光纤中产生的超连续谱的输出功率特性如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 超连续谱输出功率曲线的线性度比较好. 在最大泵浦功率下, 实现了 104.2 W 的超连续谱输出. 据查阅文献所知, 这是在多芯光子晶体光纤中实现的最高平均输出功率的超连续光源. 目前报道的基于单芯光子晶体光纤的超连续光源中, 皮秒泵浦光的脉冲峰值功率和平均功率分别可高达 24 kW^[29] 和 129 W^[30]. 其对应系统中所用的单芯光子晶体光纤的纤芯直径分别为 4.37 和 7 μm , 而本实验中所用七芯光子晶体光纤的超模光场分布直径大约为 12 μm . 根据图 3 和文献^[29, 30], 可以确定该七芯光子晶体光纤

还可承受更高功率的泵浦激光. 目前, 由于采用了大模场双包层光纤, 具有高平均功率和高脉冲峰值功率的光纤激光器已经被广泛报道. 通过采用光纤后处理技术, 将大模场光纤进行拉锥, 对光子晶体光纤进行堵孔扩芯, 可以解决大模场光纤与光子晶体光纤的低损耗熔接问题, 实现高效率的泵浦光耦合. 通过高功率的光纤激光器结合该七芯光子晶体光纤, 可以获得平均功率更高、光谱更优化的超连续谱.

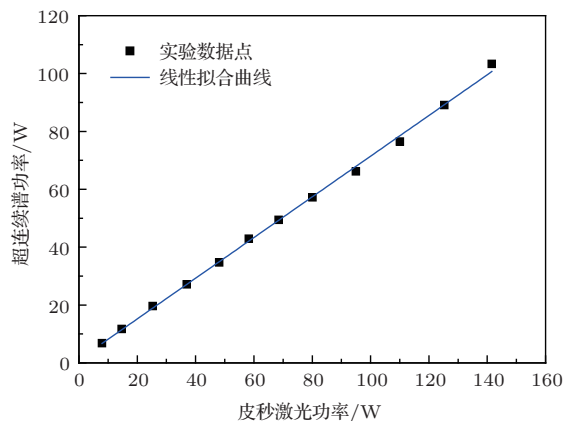


图 3 超连续谱的输出功率特性

4 结 论

采用平均功率为 141.6 W 的皮秒光纤激光泵浦一段国产七芯光子晶体光纤, 获得了平均功率 104.2 W, 连续光谱覆盖范围从 750—1700 nm 以上的超连续谱输出. 由于泵浦脉冲峰值功率不够高, 未能有效地激发色散波的产生, 最后输出的超连续谱在泵浦波长的短波一侧的激发并不充分. 目前, 该超连续谱光源的输出功率仅受限于泵浦激光功率. 通过合理的系统设计, 基于该七芯光子晶体光纤有望获得平均功率更高、光谱更优化的超连续谱. 该结果对高功率超连续谱光源的发展具有一定的参考价值.

参考文献

- [1] Knight J C, Birks T A, Russell P J, Atkin D M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547
- [2] Ranka J K, Windeler R S, Stentz A J 2000 *Opt. Lett.* **25** 25
- [3] Dudley J M, Taylor J R 2010 *Supercontinuum Generation in Optical Fibers* (New York: Cambridge University Press)

- [4] Wang Q Y, Hu M L, Chai L 2006 *Chinese Journal of Lasers* **33** 57 (in Chinese) [王清月, 胡明列, 柴路 2006 中国激光 **33** 57]
- [5] Li S G, Yao Y Y, Fu B, Zhang L, Zheng Y, Hou L T 2010 *Physics* **39** 682 (in Chinese) [李曙光, 姚艳艳, 付博, 张磊, 郑义, 侯蓝田 2010 物理 **39** 682]
- [6] Hou J, Chen S P, Chen Z L, Wang Z F, Zhang B, Song R 2013 *Laser and Optoelectronics Progress* **50** 080010 (in Chinese) [侯静, 陈胜平, 陈子伦, 王泽锋, 张斌, 宋锐 2013 激光与光电子学进展 **50** 080010]
- [7] Chen H W, Chen S P, Hou J 2011 *Laser Phys.* **21** 191
- [8] Li Y, Hou J, Wang Y B, Jin A J, Jiang Z F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 094212 (in Chinese) [李炎, 侯静, 王彦斌, 靳爱军, 姜宗福 2012 物理学报 **61** 094212]
- [9] Li S G, Zhu X P, Xue J R 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 204206 (in Chinese) [李曙光, 朱星平, 薛建荣 2013 物理学报 **62** 204206]
- [10] Jin A J, Wang Z F, Hou J, Guo L, Jiang Z F, Xiao R 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 154201 (in Chinese) [靳爱军, 王泽锋, 侯静, 郭良, 姜宗福, 肖瑞 2012 物理学报 **61** 154201]
- [11] Zhu X, Zhang X B, Chen X, Peng J G, Dai N L, Li H Q, Li J Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 094217 (in Chinese) [祝贤, 张心贲, 陈翔, 彭景刚, 戴能利, 李海清, 李进延 2013 物理学报 **62** 094217]
- [12] Li Y, Hou J, Leng J Y, Wang W L, Jiang Z F 2013 *Chin. Phys. B* **22** 074205
- [13] Xiao H, Ma Y X, Zhou P, Si L, Chen J B 2012 *Chin. Opt. Lett.* **10** 021404
- [14] Zhu J J, Zhou P, Ma Y X, Xu X J, Liu Z J 2011 *Opt. Express* **19** 18645
- [15] Chen H W, Chen S P, Wang J H, Chen Z L, Hou J 2011 *Opt. Commun.* **284** 5484
- [16] Zhao W, Hu X H, Wang Y S, Li C, Zhang W, Yang Z, Wang H S 2011 *Chinese Journal of Lasers* **38** 1107002 (in Chinese) [赵卫, 胡晓鸿, 王屹山, 李成, 张伟, 杨直, 王虎山 2011 中国激光 **38** 1107002]
- [17] Chen H W, Jin A J, Yang W Q, Chen S P, Hou J, Lu Q S 2013 *Chin. Phys. B* **22** 064211
- [18] Chen H W, Chen Z L, Chen S P, Hou J, Lu Q S 2013 *Appl. Phys. Express* **6** 032702
- [19] Chen H W, Chen S P, Liu T, Chen Z L, Hou J, Lu Q S, Wei H F, Li J, Tong W J 2013 *High Power Laser and Particle Beams* **25** 1073 (in Chinese) [谌鸿伟, 陈胜平, 刘通, 陈子伦, 侯静, 陆启生, 韦会峰, 李江, 童维军 2013 强激光与粒子束 **25** 1073]
- [20] Modotto D, Manili G, Minoni U, Wabnitz S, Angelis C, Town G, Tonello A, Couderc V 2011 *IEEE Photo. J.* **3** 1149
- [21] Fang X H, Hu M L, Huang L L, Chai L, Dai N L, Li J Y, Tashchilina A Y, Zheltikov A M, Wang Q Y 2012 *Opt. Lett.* **37** 2292
- [22] Wei H F, Chen H W, Chen S P, Yan P G, Liu T, Guo L, Lei Y, Chen Z L, Li J, Zhang X B, Zhang G L, Hou J, Tong W J, Luo J, Li J Y, Chen K K 2013 *Laser Phys. Lett.* **10** 045101
- [23] Chen H W, Lei Y, Chen S P, Hou J, Lu Q S 2012 *Appl. Phys. B* **109** 233
- [24] Chen Z L, Hou J, Jiang Z F 2010 *Laser and Optoelectronics Progress* **47** 020602 (in Chinese) [陈子伦, 侯静, 姜宗福 2010 激光与光电子学进展 **47** 020602]
- [25] Dudley J M, Genty G, Coen S 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 1135
- [26] Chen H W, Jin A J, Chen S P, Hou J, Lu Q S 2013 *Chin. Phys. B* **22** 084205
- [27] Chen H W, Lei Y, Chen S P, Hou J, Lu Q S 2013 *Opt. Laser Technol.* **47** 278
- [28] Genty G, Coen S, Dudley J M 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1771
- [29] Chen K K, Alam S U, Price J H V, Hayes J R, Lin D J, Malinowski A, Codemard C, Ghosh D, Pal M, Bhadra S K, Richardson D J 2010 *Opt. Express* **18** 5426
- [30] Chen H W, Guo L, Jin A J, Chen S P, Hou J, Lu Q S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 154207 (in Chinese) [谌鸿伟, 郭良, 靳爱军, 陈胜平, 侯静, 陆启生 2013 物理学报 **62** 154207]

RAPID COMMUNICATION

Hundred-watt-level supercontinuum generation in seven-core photonic crystal fiber*

Chen Hong-Wei¹⁾ Wei Hui-Feng²⁾ Liu Tong¹⁾ Zhou Xuan-Feng¹⁾ Li Jiang²⁾
Tong Wei-Jun²⁾ Chen Zi-Lun¹⁾ Chen Sheng-Ping¹⁾ Hou Jing¹⁾† Lu Qi-Sheng¹⁾

1) (College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

2) (State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Yangtze Optical Fiber and Cable Company Ltd. R&D Center, Wuhan 430073, China)

(Received 15 November 2013; revised manuscript received 8 December 2013)

Abstract

A 104.2 W supercontinuum spanning from 750 nm to beyond 1700 nm is generated by pumping a piece of home-made seven-core photonic crystal fiber with a 141.6 W picosecond fiber laser. The evolution of the output spectrum is investigated in detail with the increase of the picosecond laser power. The feasibilities of broadening the spectral range and scaling the output power for the supercontinuum source based on the seven-core photonic crystal fiber are analyzed and discussed. The research results will make a contribution to the further development of high-power supercontinuum source.

Keywords: multi-core photonic crystal fiber, nonlinear fiber optics, supercontinuum

PACS: 42.65.-k, 42.65.Tg, 42.65.Re, 42.55.Wd

DOI: [10.7498/aps.63.044205](https://doi.org/10.7498/aps.63.044205)

* Project supported by the International Science and Technology Cooperation Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2012DFG11470) and the Postgraduate Innovation Foundation of National University of Defense Technology, China (Grant No. B110704).

† Corresponding author. E-mail: houjing25@sina.com