

研究快讯

177.6 W 全光纤超连续谱光源*

宋锐 侯静[†] 陈胜平 王彦斌 陆启生

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2011年9月21日收到; 2011年10月24日收到修改稿)

超连续谱光源在众多科学领域具有广泛而重要的应用, 近年来一直是国际研究热点. 回顾了利用连续光激光器和脉冲光激光器抽运光子晶体光纤产生超连续谱光源的形成机制以及近几年来两种机制下高功率超连续谱光源所取得的进展, 分析了在提高超连续谱光源输出平均功率过程中需要克服的难题. 报道了国防科学技术大学通过优化超连续谱光源的整体结构, 攻克了低损耗熔接、光纤端面抗损伤、热处理以及非线性效应的有效控制等关键技术, 成功研制出一种全光纤结构、输出平均功率为 177.6 W 的超连续谱光源, 光谱范围覆盖 1064—2000 nm, 10 dB 光谱带宽约 740 nm, 光-光转换效率高达 56%, 功率水平为国际领先.

关键词: 光纤激光器, 超连续谱, 光子晶体光纤

PACS: 42.55.Wd, 42.60.-V, 42.65.-K, 42.65.Tg

窄线宽光脉冲在非线性介质中由于非线性效应^[1](如自相位调制、交叉相位调制、四波混频、受激 Raman 散射、受激 Brillouin 散射等) 光谱被展宽, 这种能够输出光谱被大范围连续展宽的脉冲光源称为超连续谱光源. 从 1970 年首次在介质中发现^[2,3] 至今, 超连续谱光源就由于良好的空间相干性、高亮度和宽带光谱吸引了全球科研工作者的注意. 光子晶体光纤^[4] 的诞生给超连续谱光源的研究注入了新的活力, 其灵活的色散特性和独特的高非线性, 极大促进了超连续谱光源的发展^[5,6]. 超连续谱光源由于在超短脉冲产生、超精密时间及频率测量、宽带光纤通信、光谱分析、光学相干层析等领域广泛而重要的应用, 在过去几年里一直是国际上的研究热点^[7-11].

目前产生超连续谱光源的方法是用一台激光器抽运源连接一段光子晶体光纤, 抽运源有连续光激光器抽运源和脉冲光激光器抽运源两种. 在利用连续光激光器抽运光子晶体光纤产生超连续谱光源的机制中, 超连续谱的形成始于噪声. 典型的

形成机制为调制不稳 (modulation instability, MI) 把连续光分裂为一系列的脉冲并产生一阶孤子, 这些孤子经历脉冲内 Raman 散射效应导致孤子自频移, 从而在长波方向形成 Raman 孤子超连续谱^[12]. 短波方向超连续谱的形成可以通过四波混频以及孤子捕获机制. 利用连续光激光器抽运光子晶体光纤产生超连续谱光源的结构比较简单, 但需要较长的光子晶体光纤^[12-16]; 且当连续光激光器的输出功率较高时, 对熔接损耗和热处理技术的要求比较高. 文献 [12] 报道了用平均功率为 47.3 W, 中心波长为 1.071 μm 的商用掺镱光纤激光器抽运 100 m 长光子晶体光纤输出平均功率为 32.6 W 的全光纤超连续谱光源, OH^- 的吸收光谱范围覆盖 1—1.38 μm . 文献 [13] 报道了利用平均功率为 50 W 的商用掺镱光纤激光器抽运 20 m 长光子晶体光纤输出平均功率为 29 W 的超连续谱光源, 光谱范围覆盖 1.06—1.67 μm , 光谱平坦度优于 8 dB. 文献 [14] 报道了利用总功率为 20 W, 中心波长为 1.06 μm 的商用掺镱光纤激光器抽运 100 m 长零色散波长稳

* 教育部新世纪优秀人才项目 (批准号: NCET-08-0142) 和国家自然科学基金 (批准号: 61077076, 61007037, 10904173) 资助的课题.

[†] E-mail: houjing25@sina.com

定的光子晶体光纤与 100 m 长零色散波长随光纤长度递减的光子晶体光纤输出平均功率为 9.5 W 的超连续谱光源, 光谱范围覆盖 0.65—1.35 μm , 可见光部分沿短波方向在 550 nm 处有一单独的光谱成分, 远场光斑表明系统工作在多模模式下. 文献 [15] 报道了利用 400 W 商用单模掺镱光纤激光器抽运 20 m 长光子晶体光纤, 输出平均功率为 50 W 的超连续谱光源, 光谱范围覆盖 1.06—2.2 μm , 10 dB 带宽光谱宽度为 900 nm; 利用不同的光子晶体光纤还可以输出平均功率为 28 W 的超连续谱光源, 光谱范围覆盖 0.6—1.9 μm . 在利用脉冲光激光器抽运光子晶体光纤产生超连续谱的机制中, 如果抽运激光器的中心波长位于光子晶体光纤的反常色散区, 超连续谱的形成始于调制不稳; 如果抽运激光器的中心波长位于光子晶体光纤的正常色散区, 超连续谱的形成始于自相位调制. 受激 Raman 散射效应在长波方向不断形成新的频谱成分. 当在长波方向展宽到可以形成孤子时, 孤子在产生超连续谱过程中的功能与在连续光抽运光子晶体光纤产生超连续谱机制下的功能一样, 经历脉冲内 Raman 散射效应导致孤子自频移, 从而在长波方向形成 Raman 孤子超连续谱 [12]. 如果相位满足四波混频和孤子捕获机制的要求, 同时会在短波方向形成超连续谱. 文献 [16] 报道了利用平均功率为 100 W 的皮秒脉冲激光器抽运 2 m 长光子晶体光纤产生光谱范围覆盖 0.4—2.25 μm 的超连续谱光源, 输出平均功率为 39 W, 由于该系统为非全光纤结构, 大大降低了系统的稳定性和实用性. 文献 [17] 报道了利用平均功率为 100 W 的皮秒激光器抽运 5 m 长光子晶体光纤输出平均功率为 49.8 W 的全光纤超连续谱光源, 光谱范围覆盖 500—1700 nm, 10 dB 带宽为 960 nm, 该系统在整个光谱范围内工作在基模模式下, 在最高输出功率下能稳定工作一小时. 国防科学技术大学于 2009 年成功研制出全光纤结构的皮秒脉冲激光器, 输出平均功率为 96 W, 脉冲宽度为 16 ps, 光束质量 M^2 小于 1.5, 光 - 光转换效率为 61.5% [18]. 随后结合在光子晶体光纤后处理方面的研究, 成功解决了光子晶体光纤低损耗熔接问题 [19]. 2010 年 8 月研制出输出平均功率为 35.6 W 的全光纤超连续谱光源, 光谱范围覆盖 650—1700 nm, 光 - 光转换效率高达 62% [20]. 2011 年 3 月成功研制出输出平均功率为 70 W 的全光纤超连续谱光源, 光谱范围覆

盖 1064—1700 nm, 光谱平坦度优于 12 dB, 光 - 光转换效率高达 67.3% [21].

进一步提高超连续谱光源的输出功率需要克服以下几个方面的难题. 首先是光子晶体光纤的低损耗熔接, 包括光子晶体光纤与普通大模场面积双包层光纤之间的低损耗熔接以及不同光子晶体光纤之间的低损耗熔接; 由于高非线性光子晶体光纤的芯径通常较小, 与大模场面积双包层光纤之间的模场面积不匹配, 直接熔接会产生较大的熔接损耗, 导致系统的耦合效率下降, 热处理负担增加. 其次是光纤输出端面的损伤, 目前抽运激光器与超连续谱光源的输出功率水平还没有达到光纤纤芯的损伤阈值 [22], 所以输出光纤端面的损伤问题也是限制超连续谱光源功率提高的重要因素. 再次是整个系统的热处理, 包括抽运激光器中的掺杂光纤、光子晶体光纤以及各个熔接点的热处理, 为了保证整个系统的持久稳定性以及维护掺杂光纤与光子晶体光纤的性能不变, 超连续谱光源的整体温度不能过高, 这就对系统的热处理提出了非常高的要求和挑战. 最后是非线性效应的有效控制, 一方面, 抽运光一部分用来产生新的频率成分形成超连续谱, 另一部分则转换为热量被浪费掉, 如果系统不具有较高的光 - 光转换效率, 浪费掉的热量则会对整个系统的热处理带来较为沉重的负担; 另一方面, 光子晶体光纤中为产生超连续谱对峰值功率的要求是越高越好, 而抽运激光器中为抑制非线性效应对峰值功率的要求是越低越好, 二者是相互矛盾的; 解决上述两个方面的难题就需要对非线性效应进行有效的控制, 提高系统的光 - 光转换效率, 解决光子晶体光纤与抽运激光器对峰值功率不同要求之间的矛盾.



图 1 实验照片

近期, 国防科学技术大学通过进一步优化超

连续谱光源的整体结构,攻克了光纤的低损耗熔接技术;解决了光纤输出端面的抗损伤问题;对超连续谱光源的整体散热系统进行了独特设计;解决了光子晶体光纤与抽运激光器对峰值功率不同要求之间的矛盾;为进一步提高超连续谱光源的功率水平打开了新的通道;又成功研制出一种全光纤结构、输出平均功率为 177.6 W(Coherent EPM 2000 功率计)的超连续谱光源,该超连续谱光源的光谱范围覆盖 1064—2000 nm (985—1700 nm Aglient 86142B; 1700—2000 nm Princeton SP2300), 10 dB 带宽约 740 nm,光 - 电转换效率高达 56%. 图 1 为实验照片,图 2 为超连续谱光源的光谱图.

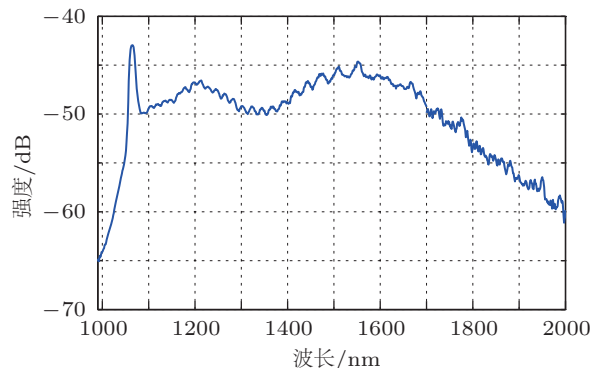


图 2 超连续谱光源输出光谱图

- [1] Govind P A 2009 *Nonlinear Fiber Optics* (4th Ed.) (Singapore: Elsevier Pte. Ltd.) p13
- [2] Alfano R R, Shapiro S L 1970 *Phys. Rev. Lett.* **24** 584
- [3] Alfano R R, Shapiro S L 1970 *Phys. Rev. Lett.* **24** 592
- [4] Knight J C, Birks T A, Russell P S J, Atkin D M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547
- [5] Jonathan C K 2003 *Nature* **424** 847
- [6] Philip R 2003 *Science* **299** 358
- [7] Wadsworth W J, Joly N, Knight J C, Birks T, Biancalana F, Russell P 2004 *Opt. Express* **12** 299
- [8] Hsiung P L, Chen Y, Ko T H, Fujimoto J G, de Matos C J S, Popov S V, Taylor J R, Gapontsev V P 2004 *Opt. Express* **12** 5287
- [9] Cumberland B A, Travers J C, Popov S V, Taylor J R 2008 *Opt. Express* **16** 5954
- [10] Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W 2002 *Nature* **416** 233
- [11] Diddams S A, Bergquist J C, Jefferts S R, Qates C W 2004 *Science* **306** 1318
- [12] Cumberland B A, Travers J C, Popov S V, Taylor J R 2008 *Opt. Lett.* **33** 2122
- [13] Cumberland B A, Travers J C, Popov S V, Taylor J R 2008 *Opt. Express* **16** 5954
- [14] Kudlinski A, Mussot A 2008 *Opt. Lett.* **33** 2407
- [15] Travers J C, Rulkov A B, Cumberland B A, Popov S V, Taylor J R 2008 *Opt. Express* **16** 14435
- [16] Chen K K, Alam S, 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
- [17] Hu X H, Zhang W, Yang Z, Wang Y S, Zhao W, Li X H 2011 *Opt. Lett.* **36** 2659
- [18] Chen S P, Chen H W, Hou J, Liu Z J 2009 *Opt. Express* **17** 24008
- [19] Chen Z L, Xiong C L, Xiao L M, William W, Timothy B 2009 *Opt. Lett.* **34** 2240
- [20] Chen S P, Wang J H, Chen H W, Chen Z L, Hou J, Xu X J, Chen J B, Liu Z J 2010 *Chin. J. Laser* **37** 3018 (in Chinese) [陈胜平, 王建华, 谌鸿伟, 陈子伦, 侯静, 许晓军, 陈金宝, 刘泽金 2010 中国激光 **37** 3018]
- [21] Song R, Chen S P, Hou J, Lu Q S 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 569 (in Chinese) [宋锐, 陈胜平, 侯静, 陆启生 2011 强激光与粒子束 **23** 569]
- [22] Jay W D, Michael J M, Raymond J B, Miroslav Y S, Eddy A S, Arun K S, Paul H P, John E H, Craig W S 2008 *Opt. Express* **16** 13240

Rapid Communication

All-fiber 177.6 W supercontinuum source*

Song Rui Hou Jing[†] Chen Sheng-Ping Wang Yan-Bin Lu Qi-Sheng

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

(Received 21 September 2011; revised manuscript received 24 October 2011)

Abstract

Supercontinuum has wide and important applications in a range of fields, so it is one of the hot research spots in recent years. In this paper the mechanism and the latest achievements in high power supercontinuum generation under continuous wave laser pump and pulsed laser pump regimes during the past several years are reviewed. The challenges and the problems that need to overcome in scaling the average output power of supercontinuum generation are analyzed. An all-fiber supercontinuum source constructed at the national university of defense technology is demonstrated with 177.6 W average output power which overcomes the problems of low splicing loss, facet damage of the output fiber, the heat treatment and the effective control of the nonlinear effects through the optimization of the whole system. To the best of the author's knowledge, the 177.6 W average output power is the highest value in ever reported ones.

Keywords: fiber laser, supercontinuum, photonic crystal fiber

PACS: 42.55.Wd, 42.60.-V, 42.65.-K, 42.65.Tg

* Project supported by the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education, China (Grant No. NCET-08-0142) and the Projects of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61077076, 61007037, 10904173).

[†] E-mail: houjing25@sina.com