

文章编号: 0258-7025(2010)06-1585-04

## 3.95 W 高功率超连续光谱产生的实验研究

方晓惠 王清月 刘俊杰 刘博文 栗岩锋 柴路 胡明列\*

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 利用掺镱大模场面积光子晶体光纤飞秒激光放大器作为抽运源, 在高非线性光子晶体光纤中产生了可见光波段增强的超连续光谱。光纤色散曲线经过特殊设计, 使得红移孤子波与可见光波段蓝移色散波群速度匹配更好, 在光纤中同时传输, 并通过四波混频持续发生相互作用, 提高了超连续光谱中的可见光成分。实验得到了 3.95 W 的高功率超连续输出, 其中可见光波段占 1.2 W。进一步数值模拟表明, 增大光纤空气填充率和减小纤芯直径可以增强孤子波与色散波的相互作用, 使光谱的可见光成分得到进一步增强。

**关键词** 光纤光学; 光子晶体光纤; 超连续光谱; 高功率

**中图分类号** TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103706.1585

### Experimental Research on the 3.95 W High Power Supercontinuum Generation

Fang Xiaohui Wang Qingyue Liu Junjie Liu Bowen  
Li Yanfeng Chai Lu Hu Minglie

(College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** The experimental study on visible light enhanced supercontinuum generation pumped by Yb-doped large mode area photonic crystal fiber laser amplifier is reported. The high nonlinear photonic crystal fiber has suitable dispersion making the red shifted soliton and blue shifted dispersion wave have a same group velocity. They move together in the fiber and interact with each other through four wave mixing. A 3.95 W high power supercontinuum was obtained with 1.2 W in the visible region. The optimization of fiber structures was numerically designed. As a result, the fiber with smaller core size or larger air filling fraction can shift the wavelength to blue.

**Key words** fiber optics; photonic crystal fiber; supercontinuum; high power

## 1 引 言

自 1996 年 Knight 等<sup>[1]</sup>研制出第一根光子晶体光纤以来, 光子晶体光纤增强的非线性效应和可控的色散特性使其成为产生超连续光谱的有效手段。尤其是 Ranka 等<sup>[2]</sup>报道在光子晶体光纤中产生两个倍频程(390~1600 nm)的超连续光谱之后, 在光子晶体光纤中产生超连续光谱便成为一个新的研究

热点<sup>[3~5]</sup>, 最近甚至将研究范围拓展到了非硅材料光子晶体光纤中<sup>[6~8]</sup>。但是这些研究都主要集中在改善超连续光谱的宽度<sup>[9, 10]</sup>和平坦度方面<sup>[11~13]</sup>, 而在具有重要应用价值的可见光波段的功率提升方面并没有很多的报道。一方面受光纤纤芯直径的限制: 光子晶体光纤的零色散波长与纤芯直径成正比, 而超连续光谱的产生需要抽运光中心波长靠近零色

收稿日期: 2009-08-12; 收到修改稿日期: 2009-09-11

**基金项目**: 国家自然科学基金(60838004, 60978022), 国家 863 计划(2007AA03Z447), 国家 973 计划(2006CB806002, 2010CB327604), 教育部科学技术研究重点项目(108032), 全国优秀博士学位论文作者专项资金(2007B34)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0597)资助课题。

**作者简介**: 方晓惠(1984—), 女, 博士研究生, 主要从事光子晶体光纤非线性方面的研究。E-mail: fangxh@tju.edu.cn

**导师简介**: 王清月(1938—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事超快激光技术及其应用方面的研究。

E-mail: chywang@tju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: huminglie@tju.edu.cn

散点。因此要高效地产生可见光波段光谱,纤芯直径仅为  $1\sim 2\ \mu\text{m}$ ,是难以承受高功率的,而且对光纤拉制工艺以及耦合都提出了极高的要求。另一方面,产生超连续光谱的主要物理机制是脉冲内受激拉曼散射作用下的孤子自频移<sup>[14]</sup>,这意味着大部分能量被移到红外波段,大大削弱了可见光波段的能量密度。因此,要得到大功率的白光源,必须探索新的机制实现脉冲能量向可见光波段的转化。本文选用具有合适色散曲线的光子晶体光纤,有效满足了可见光波段色散波和红移孤子波的匹配过程,从而增加可见光波段能量。实验中在  $3.95\ \text{W}$  超连续光输出下,可见光波段功率达到  $1.2\ \text{W}$ 。

## 2 实验结果及分析

实验中采用的光源是掺镱大模场面积光子晶体光纤飞秒激光放大器,具有很高的稳定性,在最大功率为  $44\ \text{W}$  的  $976\ \text{nm}$  激光二极管的抽运下,输出的最高平均功率可达到  $28\ \text{W}$ ,重复频率为  $50\ \text{MHz}$ ,光栅对压缩后脉冲宽度为  $85\ \text{fs}$ ,中心波长为  $1040\ \text{nm}$ 。使用非球面镜耦合输入,并用 CCD 监视仪和光谱仪检测输入和输出的情况。实验中使用的光纤端面结构的扫描电子显微 (SEM) 图如图 1 所示。它由单纯的熔石英材料组成,纤芯直径为  $4.7\ \mu\text{m}$ ,空气填充率为  $0.643$ ,光纤长度为  $3\ \text{m}$ 。由于高非线性光子晶体光纤模场面积较小,能承受的峰值功率低,且空气孔的存在使得在大功率输入情况下,热效应导致空气孔中产生空气对流,干扰输出光谱的稳定性。因此,需要将此光子晶体光纤与普通单模光纤进行熔接处理。实验中选择  $800\ \text{nm}$  波段的单模光纤,它相较于  $1550\ \text{nm}$  波段的单模光纤具有更小的模场面积,从而更容易实现模场匹配。同时选择不同参数

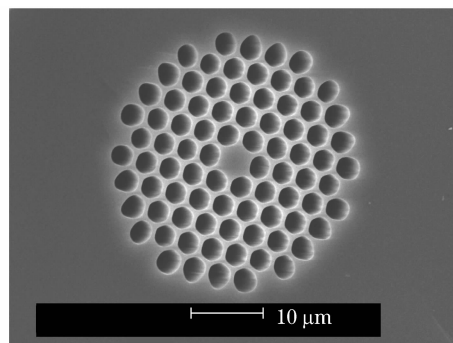


图 1 光纤端面结构的扫描电子显微图

Fig. 1 Scanning electron microscope (SEM) micrograph of the photonic crystal fiber

的放电电流和放电时间的组合,进行多次放电来扩大光子晶体光纤的模场面积,减小光子晶体光纤与单模光纤模场不匹配造成的损耗,可将熔接损耗降至  $0.4\ \text{dB}$ ,并获得很好的熔接强度。

在较低的输入功率下 ( $0\sim 250\ \text{mW}$ ),通过渐变衰减片改变输入光的功率,得到如图 2(a) 所示的输出光谱随输入光平均功率的变化。随着脉冲峰值功率的增加,孤子阶数逐渐升高,并在高阶色散作用下发生裂变,形成多个基态孤子。这些孤子在脉冲内拉曼散射作用下逐渐红移,同时产生蓝移的非孤子辐射。此过程即为光纤中超连续光谱产生过程中典型的高阶孤子分裂、孤子自频移以及非孤子辐射过程。而与普通高非线性光子晶体光纤不同的是,此光纤优化设计的色散曲线使得红移的孤子与蓝移的色散波具有相同的群速度,它们可以在较长传输距离下发生相互作用。这可以从图 2(b) 中明显看出:图 2(b) 实线为输入功率  $250\ \text{mW}$  时得到的超连续光谱,虚线为模拟得到的该光纤的群折射率曲线,可以看到每个孤子峰都与对应色散波的群速度很好匹配 (水平虚线标出)。

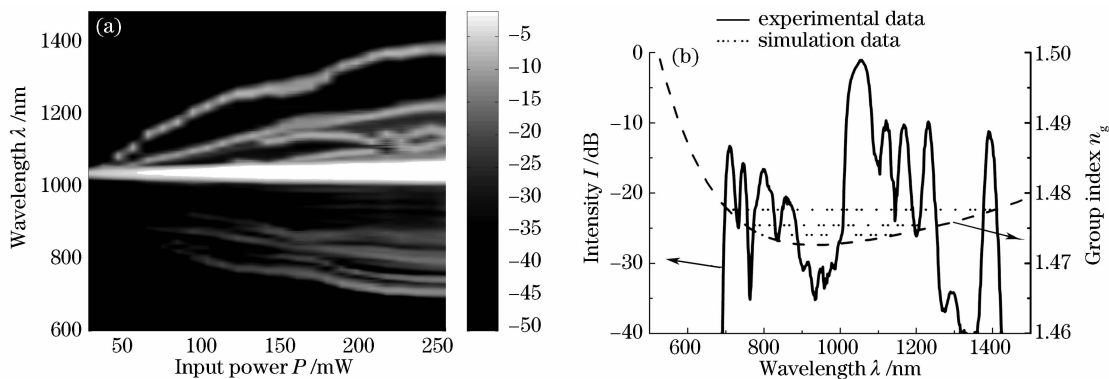


图 2 不同输入功率下所获得的超连续光谱。(a) 低输入功率;(b) 输入功率为  $250\ \text{mW}$

Fig. 2 Output spectrum with different pump powers. (a) low pump power; (b)  $P=250\ \text{mW}$

继续增大输入功率，光谱持续展宽并逐渐平坦化。当平均功率增大到11 W时，得到了3.95 W的超连续光谱输出，图 3(a)给出了此时的输出光谱。可以看到光谱得到了极大的展宽，红外波段已经完全超出了光谱仪的测量范围1750 nm。用宽带反射镜[反射率曲线如图 3(b)所示]将可见光部分滤出，得到可见光功率为1.2 W，占总输出功率的近 1/3，而且可见光波段光谱平坦。这种可见光波段的高功率和平坦光谱鲜见报道。一方面，这是由光纤结构

所决定的。由图 2(b)的群折射率曲线可以看出，抽运光接近曲线的最低值，而短波处斜率较大，长波较平滑。红移的孤子波在很大波长范围内都与可见光波段的色散波相位匹配，即孤子频移辐射出的色散波都集中在可见光波段的较小波长范围内。另一方面，在大功率输入情况下，1040 nm的光波仍有足够的能量[图 2(b)在1040 nm处仍有较强的峰值]，与相位匹配的孤子波和色散波发生作用，增强这一非线性过程。

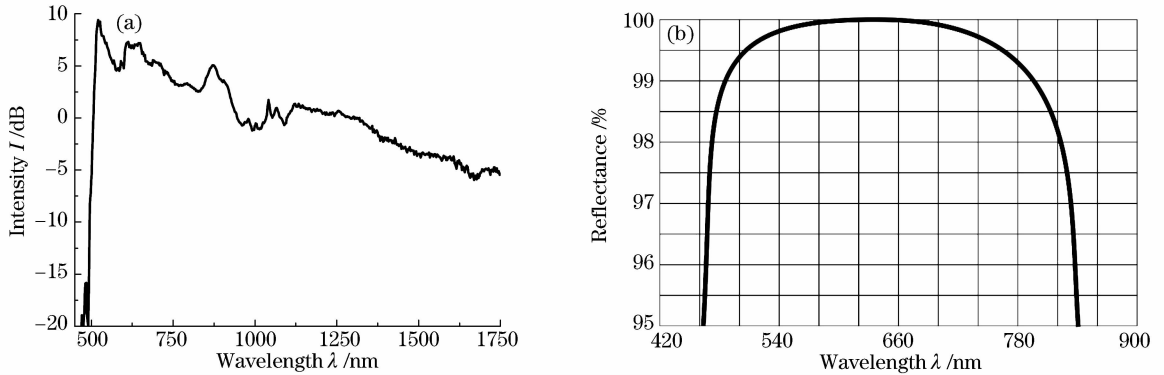


图 3 (a) 输入功率为 11 W 时得到的输出光谱；(b) 宽带介质膜反射镜反射率曲线

Fig. 3 (a) Output spectrum with 11 W pump power; (b) reflectance of broadband dielectric high-reflection mirror

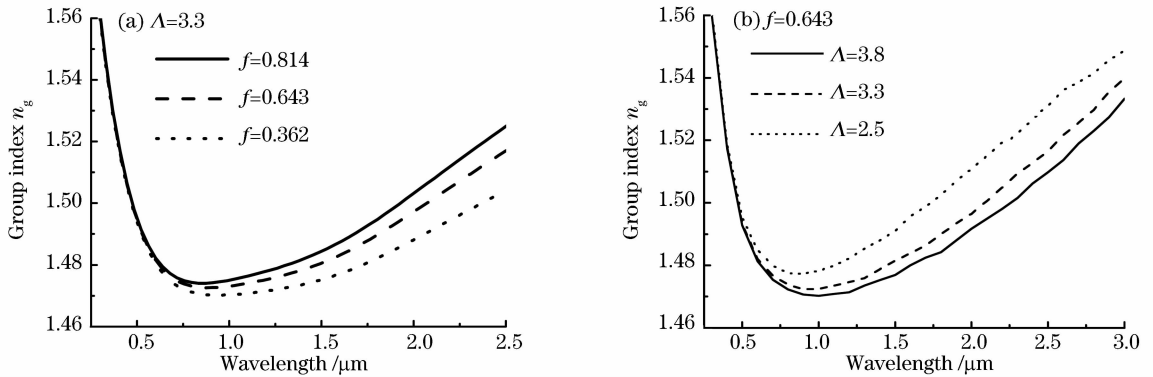


图 4 空气填充率(a)和空气孔间距(b)改变对群折射率的影响

Fig. 4 Comparison of the group index with different air filling fractions (a) and air hole pitches (b)

此光谱依然存在两方面的缺陷。一方面，光谱仅展宽到520 nm附近，并没有完全覆盖整个可见光波段，这是受倍频程的限制导致的。从输出光谱在520 nm附近的峰值也可以看出，简并四波混频在此光纤超连续光谱产生过程中起着重要的作用。简并四波混频作用下倍频程限制导致蓝光缺陷的存在，有必要进一步设计光纤结构，使得更短波长的色散波能与红移的孤子波相位匹配，从而得到相互作用增强的蓝光波段的输出。图 4 对比了空气填充率  $f$  (a)以及空气孔间距  $\Lambda$ (b)对群折射率的影响。在相同空气填充率下，空气孔间距的改变等效于纤芯直径的改变。从图 4 中可以明显看到，更高的空气填

充率( $f=0.814$ )以及更小的纤芯直径( $\Lambda=2.5 \mu\text{m}$ )下，孤子波可以与更短的色散波群速度匹配，两者在交叉相位调制等相互作用下可以产生更短的波长。但是纤芯直径受光纤零色散点必须靠近1040 nm以及模场面积的限制，并不是一个完全自由的参量。因此，进一步增大空气填充率将是一种行之有效的方法。

另一方面，输入光功率仅为11 W，并没有加到放大器能输出的最大功率。这是因为，为了减少熔接损耗，采用的光纤连接器是纤芯直径较小的800 nm波段普通单模光纤。较小的模场面积就意味着只能承受较低的峰值功率，继续增加入射功率

将会打坏光纤端面。下一步工作将对光子晶体光纤直接进行绝热塌陷研磨处理,进一步提升光纤端面损伤阈值。

### 3 结 论

利用高非线性光子晶体光纤,实验得到了可见光波段增强的超连续光谱,并针对光谱的蓝光缺陷提出了改进光纤结构的方法。在低功率输入下,观察到了明显的孤子自频移、非孤子辐射的过程,而且红移的自频移孤子与辐射出的色散波具有相同的群速度。它们在高功率输入情况下,与抽运光子持续发生四波混频作用,最终得到3.95 W的高功率超连续光输出并且可见光波段功率高达1.2 W。

**致谢** 感谢英国 Bath 大学提供的光纤,以及 T. A. Birks 教授对实验结果的有益讨论。

### 参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. S. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19):1547~1549
- 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 A. V. Husakou, J. Herrmann. Supercontinuum generation, four-wave mixing, and fission of higher-order solitons in photonic-crystal fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(9):2171~2182
- 4 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):57~66
- 5 Hu Minglie, Song Youjian, Liu Bowen *et al.*. Development and advanced applications of femtosecond photonic crystal fiber laser technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7):1660~1670
- 6 胡明列,宋有建,刘博文等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展及其前沿应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7):1660~1670
- 7 H. Hundertmark, D. Kracht, D. Wandt *et al.*. Supercontinuum generation with 200 pJ laser pulses in an extruded SF6 fiber at 1560 nm [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(24):3196~3201
- 8 H. Ebendorff-Heidepriem, P. Petropoulos, S. Asimakis *et al.*. Bismuth glass holey fibers with high nonlinearity [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(21):5082~5087
- 9 J. J. Miret, E. Silvestre, P. Andrés. Octave-spanning ultraflat supercontinuum with soft-glass photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(11):9197~9203
- 10 F. G. Omenetto, N. A. Wolchover, M. R. Wehner *et al.*. Spectrally smooth supercontinuum from 350 nm to 3  $\mu$ m in sub-centimeter lengths of soft-glass photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(11):4928~4934
- 11 P. Domachuk, N. A. Wolchover, M. Cronin-Golomb *et al.*. Over 4000 nm bandwidth of mid-IR supercontinuum generation in sub-centimeter segments of highly nonlinear tellurite PCFs [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(10):7161~7168
- 12 N. Nishizawa, J. Takayanagi. Octave spanning high-quality supercontinuum generation in all-fiber system [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8):1786~1792
- 13 C. M. B. Cordeiro, W. J. Wadsworth, T. A. Birks *et al.*. Engineering the dispersion of tapered fibers for supercontinuum generation with a 1064 nm pump laser [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(15):1980~1982
- 14 E. E. Serebryannikov, A. M. Zheltikov. Supercontinuum generation through cascaded four-wave mixing in photonic-crystal fibers: When picoseconds do it better [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **274**(2):433~440
- 15 D. A. Sidorov-Biryukov, A. Fernandez, L. Zhu *et al.*. Solitonic dynamics of ultrashort pulses in a highly nonlinear photonic-crystal fiber visualized by spectral interferometry [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(5):446~448