

文章编号: 0258-7025(2008)07-1041-04

# 微结构光纤正常色散区飞秒激光脉冲传输 光谱展宽的功率饱和效应

李曙光<sup>1</sup> 程同蕾<sup>1</sup> 张焕平<sup>2</sup> 侯蓝田<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 燕山大学理学院亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 河北 秦皇岛 066004; <sup>2</sup> 晋中学院物理系, 山西 榆次 030600)

**摘要** 利用自制的微结构光纤进行了飞秒激光脉冲传输实验, 输入激光脉冲的中心波长为 800 nm, 位于微结构光纤的正常色散区。随着输入激光脉冲的平均功率从 220 mW 逐渐增大到 300 mW, 输出光谱同时向长波和短波方向展宽, 光谱中的反斯托克斯线对应的能量逐渐占据主导地位。平均功率达到 280 mW 时, 光谱的展宽范围不再增大, 显示出了一种功率饱和效应。在微结构光纤的正常色散区实现了波长从 560~960 nm 的 20 dB 展宽谱。

**关键词** 非线性光学; 微结构光纤; 飞秒激光脉冲; 功率饱和效应

**中图分类号** O 437 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20083507.1041

## Effect of Power Saturation on Spectrum Expanding in Normal Dispersion Region of Microstructured Fiber by Femtosecond Laser Pulses

Li Shuguang<sup>1</sup> Cheng Tonglei<sup>1</sup> Zhang Huanping<sup>2</sup> Hou Lantian<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology,  
College of Science, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China  
<sup>2</sup>Department of Physics, College of Jinzhong, Yuci, Shanxi 030600, China

**Abstract** It is demonstrated that femtosecond pulses transmit in microstructured fiber manufactured by our group. An 800 nm central wavelength of input pulses locates in the normal dispersion regime of the microstructured fiber. When the average power of initial input pulses increases from 220 mW to 300 mW, output spectrum spreads to long wavelength and short wavelength simultaneously, and the anti-Stokes emission in output spectrum holds on dominant status gradually. When the average power of input pulses increases to 280 mW, the scope of spectrum increases no longer. Output spectrum about 20 dB from 560 nm to 960 nm has been obtained by ultra-short pulses transmitting in a normal dispersion nonlinear manufactured fiber.

**Key words** nonlinear optics; microstructured fiber; femtosecond laser pulse; effect of power saturation

## 1 引 言

近年来,微结构光纤中超短激光脉冲传输超连续谱的产生引起了人们的关注<sup>[1~5]</sup>,在微结构光纤或光子晶体光纤中输入超短激光脉冲产生超连续谱是一种强光与石英介质相互作用的典型非线性效应,超连续谱的产生在光学层析成像、频率转换器和连续可调激光器的研究方面有着潜在应用。一般来说,微结构光纤包层气体填充率越大,有效模面积越小,非线性系数越大,光谱展宽效应越显著。

Hilligsøe 等利用具有双零色散波长的光子晶体光纤产生超连续谱<sup>[1]</sup>,其输入激光脉冲的中心波长位于两个零色散波长之间的反常色散区;Zhang 等理论研究了输入脉冲的频率啁啾对双零色散波长光子晶体光纤中产生超连续谱效应的影响<sup>[2]</sup>;Hu 等实验研究了具有双折射特性的微结构光纤中超连续谱的产生及其显著的反斯托克斯线<sup>[5~7]</sup>,通过沿两个正交偏振方向输入脉冲以及利用高阶模激发产生频率可调的反斯托克斯辐射;Pierre-Alain Champert

收稿日期:2007-08-25;收到修改稿日期:2007-11-07

基金项目:中国博士后科学基金(2005038188),河北教育厅科研计划(2005310)和燕山大学博士基金资助项目。

作者简介:李曙光(1968—),男,山西人,教授,硕士生导师,主要从事光子晶体光纤及其应用技术方面的研究。

E-mail: shuguangli@ysu.edu.cn

等利用多波长抽运系统(其中一个抽运波长在正常色散区,另一个在反常色散区)在光子晶体光纤的正常色散区产生白光超连续谱<sup>[8]</sup>;理论和实验证明了微结构光纤的色散<sup>[3,4,9]</sup>和包层空气孔的多重散射产生的带隙效应<sup>[10]</sup>对超短激光脉冲传输的非线性效应具有很大的影响。本文利用自制的微结构光纤进行了飞秒激光脉冲传输实验,输入激光脉冲的中心波长位于微结构光纤的正常色散区,在正常色散区实现了波长从 560~960 nm 的 20 dB 展宽谱,并发现了一种功率饱和效应。

## 2 光纤结构及特性参数的数值模拟

利用高倍光学显微镜对微结构光纤的截面进行了测试,所用微结构光纤截面如图 1 所示,包层孔间距  $\Lambda = 3.73 \mu\text{m}$ ,包层孔直径  $d = 2.74 \mu\text{m}$ ,纤芯直径  $d_{\text{core}} = 3.93 \mu\text{m}$ 。根据所测试的光纤结构参数进行了数值计算,图 2(a)给出了图 1 所示微结构光纤的色散随波长的变化,图 2(b)给出了微结构光纤的有效模式面积和非线性系数随波长的变化。结果表明,该光纤的零色散波长  $\lambda_D = 1.0082 \mu\text{m}$ ,  $\lambda < \lambda_D$  时为正常色散区,在  $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$  时,其色散系数  $D = -74.4 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ,有效模式面积为  $S_{\text{eff}} = 6.3 \mu\text{m}^2$ ,非线性系数  $\gamma = 0.04 \text{ m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 。从数值研究结果可知,在整个可见到近红外波段该光纤的色散系数随波长的增大而增大,有效模式面积随波长的增大而增大,非线性系数随波长的增大而减小。

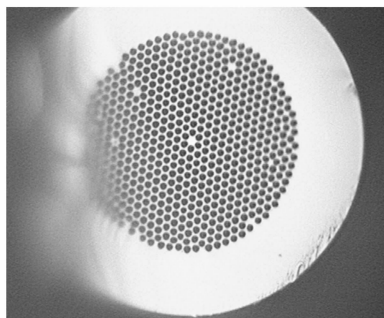


图 1 微结构光纤截面示意图,包层孔间距  $\Lambda = 3.73 \mu\text{m}$ ,包层孔直径  $d = 2.74 \mu\text{m}$ ,纤芯直径  $d_{\text{core}} = 3.93 \mu\text{m}$   
Fig. 1 Cross section of microstructured fiber, pitch  $\Lambda$  is  $3.73 \mu\text{m}$ , diameter of air hole  $d$  is  $2.74 \mu\text{m}$ , core diameter  $d_{\text{core}}$  is  $3.93 \mu\text{m}$

## 3 实验结果及分析

利用图 1 所示的微结构光纤进行了飞秒激光脉冲传输实验,如图 3 所示。所用脉冲参数为:脉冲宽

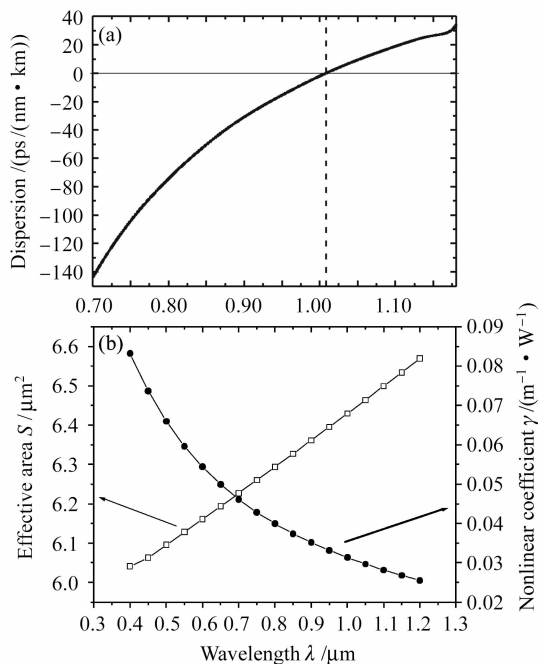


图 2 (a) 微结构光纤的色散随波长的变化;(b) 微结构光纤的有效模式面积和非线性系数随波长的变化  
Fig. 2 (a) Dispersion of microstructured fiber changes with the wavelength; (b) effective area and nonlinear coefficient of microstructured fiber change with the wavelength

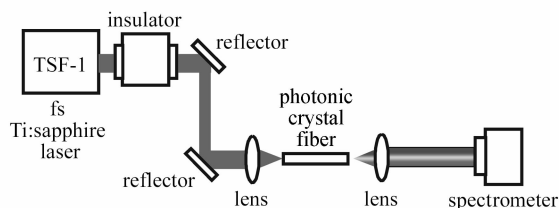


图 3 实验原理简图

Fig. 3 Experimental setup

度 10 fs, 脉冲重复频率  $f_{\text{rep}} = 300 \text{ MHz}$ , 脉冲中心波长  $0.8 \mu\text{m}$ , 即输入激光脉冲的中心波长位于微结构光纤的正常色散区。实验所用微结构光纤长度为 20 cm。图 4(a) 给出了输入激光脉冲的平均功率从 220~300 mW 逐渐增大时的脉冲展宽光谱, 图 4(b) 和 (c) 分别为 (a) 所示脉冲展宽谱的短波和长波部分。可见, 随着功率的增大, 输出光谱的能量同时向长波和短波两个方向展宽, 且光谱中的反斯托克斯线对应的能量逐渐占据主导地位。但当平均功率达到 280 mW 时, 光谱的展宽不再增大, 展宽宽度达到饱和, 显示出了一种功率饱和效应。图 5 给出了输入激光脉冲平均功率分别为 280 mW, 290 mW, 300 mW 时的脉冲展宽光谱图(即出现功率饱和效应时的光谱图)。可以明显地看到在光纤的正常色

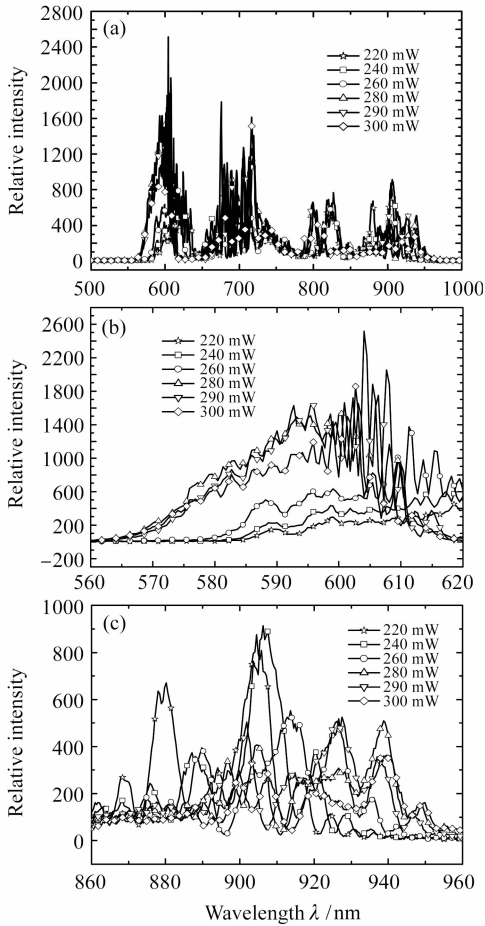


图 4 (a) 20 cm 光纤在平均功率从 220~300 mW 逐渐增大时的脉冲展宽光谱, 其中脉冲宽度 10 fs, 脉冲中心波长 800 nm, 脉冲重复频率 300 MHz; (b) 和 (c) 分别为 (a) 所示脉冲展宽光谱的短波和长波部分的放大

Fig. 4 (a) Ultra-short pulses propagating in microstructured fiber with the length of 20 cm at different average powers from 220 mW to 300 mW, pulse central wavelength is 800 nm, duration is 10 fs, and repetition rate is 300 MHz; (b) and (c) correspond to the short and long wave band, respectively, in (a)

散区实现了波长从 560~960 nm 的 20 dB 展宽谱, 展宽宽度达到了 400 nm。

## 4 结论

利用自制的微结构光纤进行了飞秒激光脉冲传输测试, 发现在微结构光纤的正常色散区输入飞秒激光脉冲能够产生显著光谱展宽并出现强斯托克斯辐射, 随着入射脉冲激光平均功率的增大光谱展宽范围增大, 但当平均功率达到一定值时光谱不再展宽, 会出现一种功率饱和效应, 在光纤的正常色散区实现了波长从 560~960 nm 的 20 dB 展宽谱, 展宽宽

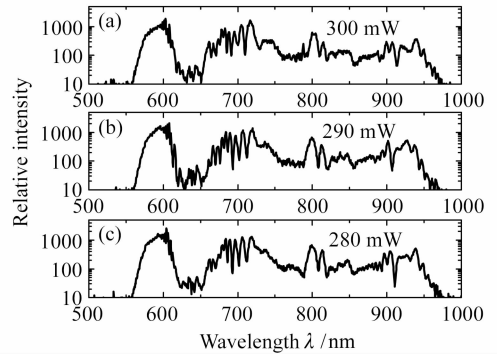


图 5 输入激光脉冲平均功率分别为 280 mW, 290 mW, 300 mW 时的脉冲展宽光谱, 光谱相对强度用对数坐标表示

Fig. 5 Expanding spectra of pulses when the average powers of initial pulses are 280 mW, 290 mW and 300 mW, respectively. The relative intensities of output spectra are shown in logarithm coordinate

度达到了 400 nm。实验结果说明在微结构光纤的正常色散区输入飞秒激光脉冲也可以产生强反斯托克斯辐射, 并揭示了光谱展宽过程中的功率饱和效应。

致谢 感谢中国科学院物理研究所魏志义研究员在实验测试中所提供的帮助。

## 参 考 文 献

- 1 Karen Marie Hilligse, Thomas Vestergaard Andersen, Henrik Nørgaard Paulsen *et al.*. Supercontinuum generation in a photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelengths [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(6):1045~1054
- 2 Hua Zhang, Song Yu, Jie Zhang *et al.*. Effect of frequency chirp on supercontinuum generation in photonic crystal fibers with two zero-dispersion wavelengths [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(3):1147~1154
- 3 Li Shuguang, Ji Yuling, Zhou Guiyao *et al.*. Supercontinuum generation in holey microstructure fibers by femtosecond laser pulses [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(2):478~483  
李曙光, 冀玉领, 周桂耀等. 多孔微结构光纤中飞秒激光脉冲超连续谱的产生 [J]. *物理学报*, 2004, **53**(2):478~483
- 4 Hu Mingle, Wang Qingyue, Li Yanfeng *et al.*. Enhanced spectral broadening by femtosecond pulses in large-air-filling fraction microstructure fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1429~1432  
胡明列, 王清月, 栗岩峰等. 飞秒激光在大空气比微结构光纤中增强的非线性光谱展宽 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(12):1429~1432
- 5 M. Hu, Q.-Y. Wang, Y. Li *et al.*. An anti-Stokes-shifted doublet of guided modes in a photonic-crystal fiber selectively generated and controlled with orthogonal polarizations of the pump field [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(9):805~809
- 6 Minglie Hu, Ching-yue Wang, Lu Chai *et al.*. Birefringence-controlled anti-Stokes line emission from a microstructure fiber [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2004, **1**(6):299~302
- 7 Minglie Hu, Ching-yue Wang, Lu Chai *et al.*. Frequency-tunable anti-Stokes line emission by eigenmodes of a birefringent microstructure fiber [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(9):1932~1937

- 8 Pierre-Alain Champert, Vincent Couderc, Philippe Leproux *et al.*. White-light supercontinuum generation in normally dispersive optical fiber using original multi-wavelength pumping system [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(19):4366~4371
- 9 Li Shuguang, Liu Xiaodong, Hou Lantian. Numerical simulation and analysis on photonic crystal fibers with closing to zero and flattened chromatic dispersion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):713~717

- 李曙光, 刘晓东, 侯蓝田. 接近于零色散的色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6):713~717
- 10 Cheng Tonglei, Li Shuguang, Zhou Guiyao *et al.*. Relation between power fraction in the core of hollow-core photonic crystal fibers and their bandgap property [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):249~254
- 程同蕾, 李曙光, 周桂耀 等. 空芯光子晶体光纤纤芯中的功率分数及其带隙特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):249~254

## 光学前沿——2008'全国信息光学与光子器件学术会议

### Optics Frontier——2008' China Information Optics and Photonic Devices Conference

光学前沿——2008'全国信息光学与光子器件学术会议(CIOC 2008')由中国光学学会指导,中国科学院上海光学精密机械研究所主办,是展示我国信息光学、光子器件、光电子技术研究和应用成果的平台。会议旨在推动我国信息光学与光子器件技术的发展。首届会议(CIOC 2008')由南京信息工程大学和光学期刊联合编辑部承办,将于2008年8月26~28日在南京信息工程大学举行。

会议面向全国高等院校、科研院所、光电器件相关高新技术企业征集高水平论文,投稿论文一经录用,至少需一名作者到会向大会作报告,会议将向报告人颁发报告证书。同时,被录用论文将在《光学学报》信息光学专刊发表,该专刊将于11月份出版(EI核心版全刊检索)。

本次会议将在录用的论文中评选出优秀学术论文,颁发证书和奖金。

会议地点:南京信息工程大学

主办单位:中国科学院上海光学精密机械研究所

支持单位:中国光学学会

承办单位:南京信息工程大学、光学期刊联合编辑部

媒体支持:《光学学报》、《中国激光》、《激光与光电子学进展》、*Chinese Optics Letters*、中国光学期刊网([www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net))。

组织机构:

大会共主席:王育竹(中国科学院院士,上海光机所)

吴培亨(中国科学院院士,南京大学)

李廉水(南京信息工程大学校长,教授)

节目委员会主席:刘立人(上海光机所,研究员,《光学学报》执行主编)

节目委员会副主席:任晓敏(北京邮电大学,教授,《中国激光》编委)

倪国强(北京理工大学,教授,中国光学学会秘书长)

委员:李刚 王明华 方祖捷 刘式墉 于荣金 吴重庆

周常河 余金中 徐雷 陈建平 黄惠杰 崔向群

王向朝 邱昆 何赛灵 袁小聪 王鸣 孙小茜

闵锦忠 瞿荣辉 徐安士 钱景仁 黄德修 谢世钟

曾和平 陈卫标 李传起

大会秘书处:

秘书长:李传起 杨蕾

秘书:段家喜 董菲 陈艳 李纯成

会议主要邀请报告:

姚建铨 院士 题目待定

吴重庆 教授 半导体光放大器的非线性偏振旋转及应用

于荣金 教授 题目待定

黄德修 教授 题目待定

刘式墉 教授 题目待定

余金中 研究员 从硅电子学到硅光子学

谢世钟 教授 基于双波长光纤激光器的光生毫米波技术

王明华 教授 集成光学研究的新进展

徐雷 教授 High efficiency Yb fiber laser prepared with sol-gel DC-RTA technique

曾和平 教授 掺Yb陶瓷飞秒激光及其放大

陈卫标 研究员 题目待定

方祖捷 研究员 题目待定

王向朝 研究员 高端光刻机投影物镜像质原位检测技术的研究

袁小聪 教授 题目待定

王鸣 教授 基于光纤的激光自混合干涉理论及应用研究

李传起 教授 OCDMA 网络系统关键技术的研究

会议主题/征稿范围:

1. 光信号处理技术
2. 光源与光放大器
3. 光通信网络组网技术
4. 光无源器件与集成光路
5. 光电子技术及其应用
7. 其他相关技术
6. 先进光功能材料技术及应用

重要日期:

预注册截止时间:2008年7月15日

论文摘要截止时间:2008年7月25日

(摘要要求使用5号字,1000字左右,可以使用图表,但全文内容必须控制在1个A4页面以内)

论文全文截止时间:2008年8月20日

日程安排:

报 到:8月26日全天

大会报告:8月27日9:00~17:00

分会场报告:8月28日9:00~17:00

优秀论文颁奖仪式:8月28日17:00~18:00

考 察:8月29日

注册报到事项:

1. 会址:南京信息工程大学(南京市浦口区宁六路219号)

2. 收费:本次会议收取会务费800元,学生凭学生证600元

3. 住宿:南京信息工程大学东苑宾馆

4. 说明:对于提交论文但不能参加论坛的作者,秘书处不负责向《光学学报》推荐其论文。

5. 联系方式:

电话:021-69918426(段老师) 025-58731017(李老师)

E-mail: [icc@nuist.edu.cn](mailto:icc@nuist.edu.cn)

6. 会议网站: <http://web.nuist.edu.cn/slxy/cioc>

<http://www.opticsjournal.net/meeting>