

飞秒激光在光子晶体光纤中产生超连续 光谱机制的实验研究*

胡明列 王清月 栗岩峰 王 专 张志刚 柴 路 章若冰

(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)

(2004 年 2 月 3 日收到, 2004 年 7 月 1 日收到修改稿)

报道了利用零色散在 780 nm 处的光子晶体光纤与纳焦耳量级的飞秒激光脉冲相互作用的实验结果. 实验使用 35 fs, 中心波长 810—840 nm, 单脉冲能量可达 14 nJ 的飞秒激光光源获得了超过一个倍频程的平坦超连续光谱 (500—1100 nm). 在不同功率、不同中心波长、不同啁啾和有直流成分的多种飞秒脉冲激光的条件下, 研究了超连续光谱的产生情况, 并对一系列现象进行了对比, 分析了超连续光谱产生的机制.

关键词: 光子晶体光纤, 飞秒脉冲激光, 超连续光谱

PACC: 4270Q, 4265C, 4280W

1. 引 言

微结构光纤 (microstructure fiber), 又叫光子晶体光纤 (photonic crystal fiber) 多孔光纤 (holey fiber)^[1-3], 正在吸引越来越多研究人员的注意力. 这种光纤具有的增强非线性效应和可控色散特性, 使其成为产生超连续光谱的有效手段——未经过放大的纳焦量级的飞秒激光脉冲能够在几十厘米长产生一个倍频程甚至两个倍频程的超连续光谱. 自从 Ranka 等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^[4,5]以来, 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^[6-9], 而且作为超连续光源在控制飞秒激光脉冲的相位稳定^[10]、光学频率测量^[11-13]、光学相干层析^[14]等方面的应用已经带来重要突破. 传统光纤主要依赖自相位调制效应产生在中心频率两侧对称分布的钟形超连续光谱, 而在光子晶体光纤中自相位调制、高阶孤子分裂、群速度色散、三阶色散、四波混频、交叉相位调制、双折射以及自陡峭等诸多效应对超连续光谱的形成都有贡献^[15,16]. 功率、中心波长、啁啾、脉冲宽度不同的激光脉冲作用下, 光子晶体光纤中超连续光谱产生的机制是不同的. Gaeta^[17]采用

Ranka 等^[4]实验中的参数进行了数值计算, 结果表明当入射脉冲波长在靠近零色散点的反常色散区时, 光谱包络的展宽主要由高阶色散决定, 三阶色散和自相位调制的相互作用决定了光谱短波波段的宽度, 同时限制了长波方向的相对展宽. Coen 等^[18]将入射脉冲宽度为皮秒量级时的超连续光谱的主要产生机理解释为受激拉曼散射和参量四波混频, 而自相位调制的作用可以忽略. 理论和实验^[19,20]表明: 当入射的低平均功率飞秒脉冲位于反常色散区时, 在同样强度下宽脉冲产生的超连续光谱可以比窄脉冲更宽. 这时的超连续光谱的产生机理被解释为高阶孤子裂变和四波混频. 在脉冲宽度较宽时, 孤子的阶数更大, N 阶孤子裂变为 N 个基孤子脉冲, 每个孤子脉冲会发出对应的蓝移而且相位匹配的非孤子波, 最终脉冲稳定形成红移的 N 个具有不同中心波长的基孤子, 同时发生的四波混频效应使得光谱加宽并更加平滑. 对于超连续光谱的应用, 研究各种效应对产生平坦、稳定的超连续光谱而言是非常必要的. 此外, 超连续光谱在光通信、超短脉冲压缩、激光光谱学、传感技术等方面有着极大的应用潜力. 本文通过分析文献中的参数^[4-9,21,22], 选取了 35 fs 脉冲作为输入脉冲宽度, 获得了一些新的实验结果, 并做了系统的对比分析.

* 国家重点基础研究专项基金(批准号: G1999075201, 2003CB314904)、国家自然科学基金(批准号: 60278003)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2003AA311010)资助的课题.

2. 实验装置

实验中使用的光源是自行研制的飞秒激光振荡级系统. 该激光器由于使用了自行设计的半导体可饱和吸收镜, 故可以实现自启动锁模, 具有很高的稳定性. 输出的最高平均功率可达到 1.7 W ^[23, 24]. 参考以前的实验参数, 本实验中使用的飞秒激光脉冲宽度为 35 fs , 中心波长在 $810\text{--}840\text{ nm}$ 范围可调. 使用了 40 倍的耦合透镜输入输出, 并采用 Jettet 公司的 CCD 监视仪和功率计监控耦合输入和输出的情况, 实验装置如图 1(a) 所示. 实验中所使用的为 Crystal Fibre A/S 公司生产的增强非线性微结构光纤, 由纯硅制成, 零色散在 780 nm 处, 光纤端面结构的电子扫描显微镜图如图 1(b) 所示. 光纤的外径为 $150 \pm 3\ \mu\text{m}$, 芯径为 $2 \pm 0.2\ \mu\text{m}$, 空气孔间距为 $1.3 \pm 0.2\ \mu\text{m}$, 空气比为 60%, 单模截止波长在 450 nm , 实验用光纤长度为 1 m . 输入输出光谱分别由两个光谱仪接收. 输入光谱由 0.5% 的分束镜分束后由 S2000 光谱仪接收用以实时观测, 测量精度设定为 $5\text{--}10\text{ nm}$.

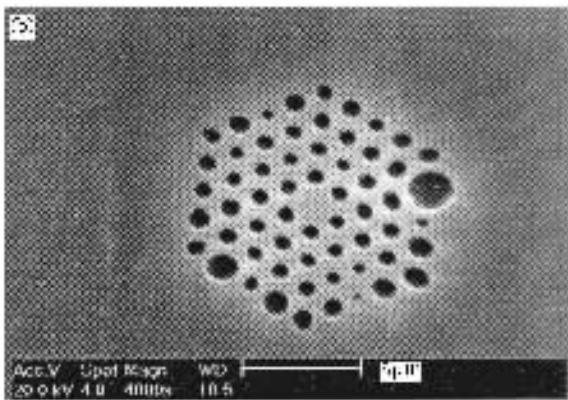
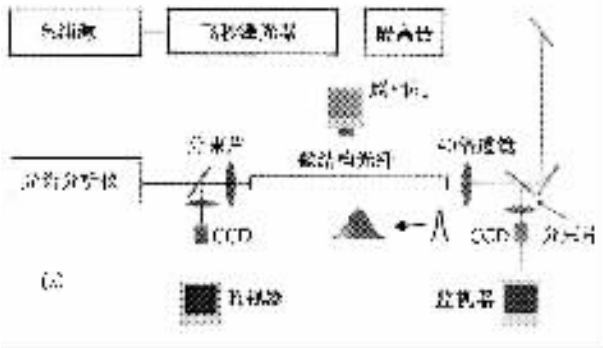


图 1 实验装置示意图(a)和电子扫描显微镜扫描获得的光子晶体光纤端面图(b)

3. 实验结果及分析

在不同功率输入时, 光谱随着功率的增加而展宽, 并趋于更加平坦. 在功率增加过程中, 光谱的展宽包含了孤子自频移、高阶孤子的形成、高阶孤子分裂成几个基孤子的现象, 以及在四波混频效应下, 光谱趋向平坦. 图 2 为实验获得的在输入脉冲宽度为 35 fs 、中心波长为 825 nm 、不同平均功率飞秒激光脉冲作用下产生的超连续光谱. 从图 2 可以看到, 在低功率时有很明显的自频移效应, 在红外波段形成一个明显的峰, 同时在可见光波段也有相应的峰出现. 随着功率的增加, 飞秒激光脉冲在红外波段形成的高阶孤子在高阶色散的影响下, 分裂成三个明显的基孤子, 并伴随相应的非孤子辐射, 光谱显示为红外波段的峰往长波扩展, 并出现几个峰, 而短波段的峰则移向低频端, 峰与峰之间的间隔也逐渐被新的成分所占据, 从而使整个光谱变得平坦. 当频谱展宽到一定程度时, 功率的增加对光谱展宽的影响越来越小, 从 400 到 600 mW 功率增加了 200 mW , 频谱却只增加了十几个纳米. 这是因为当光谱展宽到短波波段时, 距离该光子晶体光纤的零色散点(780 nm)越来越远, 因此二阶和三阶色散值变化得更加迅速, 使得脉冲宽度迅速增宽、强度变弱, 影响了光谱的展宽. 当抽运功率继续增加时, 超连续光谱在整个波段更加平坦化, 但是在短波波段始终有一个明显的峰, 抽运功率越高这个峰越明显, 这是四波混频过程中具有长波成分的光谱作用的必然结果.

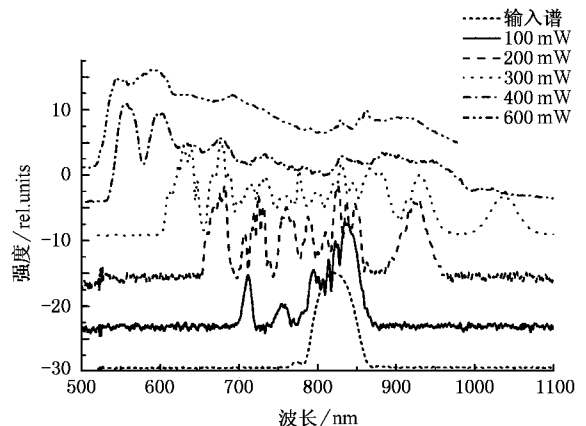


图 2 在不同功率的飞秒脉冲输入下所获得的超连续光谱(本文中所有光谱数据都在纵坐标上做了调整以方便对比, 实际数据在强度上都近似相等)

相对于功率因素而言,输入脉冲中心波长对超连续光谱的影响更大.平均功率为 450 mW、中心波长为 840 nm 的脉冲获得的超连续光谱比平均功率为 600 mW、中心波长为 825 nm 的脉冲所获的光谱还要宽.图 3 为脉冲宽度 35 fs、平均功率 450 mW、中心波长分别为 810、820、830、840 nm 的飞秒激光脉冲产生的超连续光谱.一个明显的趋势是在相同平均功率的飞秒激光脉冲作用下,中心波长离零色散点越远光谱的展宽程度越大.对这一趋势的物理机制可解释如下:在较高功率(450 mW)的脉冲抽运下自相位调制效应较强,要形成高阶孤子需要更多的负色散与之平衡.而所有输入脉冲的中心波长都处在负色散区,中心波长偏离零色散点越远越易形成高阶孤子,其分裂的结果就会产生更宽的光谱.

实验中还发现在较高平均功率脉冲作用下,初始啁啾对光谱展宽的影响是很小的.当输入脉冲的中心波长为 815 nm、平均功率为 550 mW 时,发现无啁啾时获得的超连续光谱最宽,但与具有正负啁啾的脉冲产生的光谱在宽度上区别并不大,只是在超连续光谱某些区间有峰值的变化.这是由于光子晶体光纤的纤芯和包层之间很大的折射率差所引起对传输光场强烈的局域特性极大地增强了非线性效应,使得脉冲的初始啁啾很快被这种强烈非线性效应产生的啁啾所淹没.

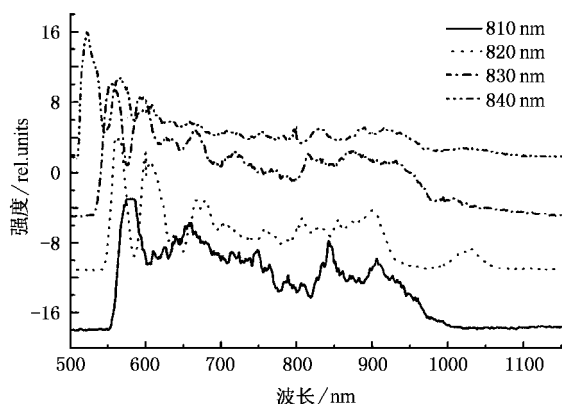


图 3 在不同中心波长的飞秒激光脉冲抽运下产生的超连续光谱

锁模激光器受到外界微扰会出现直流成分,如图 4 中尖峰所示.有趣的是,这种直流成分对超连续光谱的展宽也有影响.在相同平均功率的输入下,有直流成分的飞秒激光脉冲能在短波波段伸展得更多,从而可获得更宽的光谱.如图 5 所示,在获得的超连续光谱中,曲线 *c* 是不含直流成分的脉冲展宽

所得的超连续光谱,曲线 *a* 和曲线 *b* 分别为含有一个直流成分和多个直流成分展宽所得的超连续光谱,后者明显比前者更向短波波段延展.从图 4 可以发现,直流分量都发生在比中心波长更短的波段,而对于四波混频过程,更容易产生短波分量,这就是含有直流成分的飞秒激光脉冲反而能更加展宽光谱的原因.

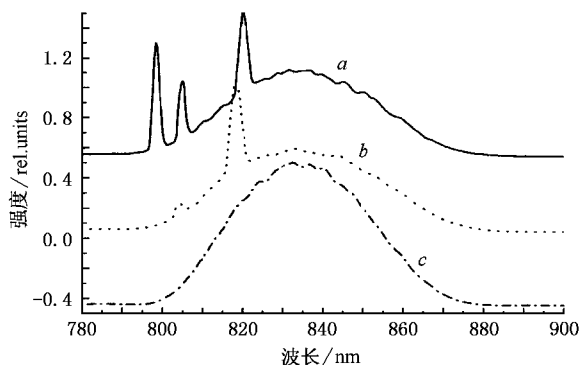


图 4 具有直流成分的飞秒激光抽运脉冲光谱中的直流成分

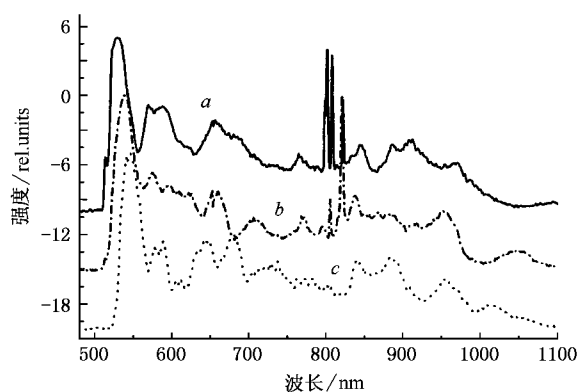


图 5 直流成分对超连续光谱的影响

4. 结 论

实验研究了零色散在 780 nm 处的光子晶体光纤与纳焦耳量级的飞秒激光脉冲相互作用中不同实验条件对超连续光谱产生的影响.通过调整 35 fs 输入脉冲的功率、中心波长和初始啁啾,获得了在不同条件下的超连续光谱,并做了相应的对比分析和物理解释.在同样宽度的脉冲输入时,能量越高超连续光谱趋向更宽、更平坦.输入脉冲的中心波长在负色散区越偏离零色散点光谱展宽就越强.在较高平均功率的脉冲作用下,初始正负啁啾对光谱展宽的影

响不大,这是因为在与飞秒脉冲激光相互作用时的强烈非线性效应产生的啁啾很快补偿了初始啁啾的

影响.实验还发现,导致激光器锁模不稳定的直流成分也能参与光谱的展宽,这是一个很有意思的现象.

- [1] Knight J C , Birks T A , Russell P S J *et al* 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547
- [2] Birks T A , Knight J C , Russell P S J *et al* 1997 *Opt. Lett.* **22** 961
- [3] Knight J C , Russell P S J 2002 *Science* **296** 276
- [4] Ranka J K , Windeler R S , Stentz A J *et al* 2000 *Opt. Lett.* **25** 25
- [5] Birks T A , Wadsworth W J , Russell P S J 2000 *Opt. Lett.* **25** 1415
- [6] Wadsworth W J , Blanch A O , Knight J C *et al* 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2148
- [7] Husakou A V , Herrmann J 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2171
- [8] Apolonski A , Povazay B , Unterhuber A *et al* 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2165
- [9] Fedotov A B , Naumov A N , Zheltikov A M 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2156
- [10] Jones D J , Diddams S A , Ranka J K *et al* 2001 *Science* **288** 635
- [11] Diddams S A , Jones D J , Ye J *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5102
- [12] Holzwarth R , Udem T , Hansch T W *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2264
- [13] Udem T , Holzwarth R , Hansch T W 2002 *Nature* **416** 233
- [14] Hartl I , Li X D , Chudoba C *et al* 2001 *Opt. Lett.* **26** 608
- [15] Coen S , Chau A H L , Leonhardt R *et al* 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 753
- [16] Sharping J E , Fiorentino M , Coker A *et al* 2001 *Opt. Lett.* **26** 1048
- [17] Gaeta A L 2002 *Opt. Lett.* **27** 924
- [18] Coen S , Chau A H L , Leonhardt R *et al* 2001 *Opt. Lett.* **26** 1356
- [19] Husakou A V , Herrmann J 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 203901
- [20] Herrmann J , Griebner U , Zhavoronkov N *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 173901
- [21] Zhang J , Wei Z Y , Wang Z H 2003 *Acta Opt. Sin.* **23** 511 (in Chinese) [张 军、魏志义、王兆华等 2003 光学学报 **23** 511]
- [22] Li S G , Ji Y L , Zhou G Y *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 478 (in Chinese) [李曙光、冀玉领、周桂耀等 2004 物理学报 **53** 478]
- [23] Sun J H , Zhang R B , Hu Y F *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1272 (in Chinese) [孙敬华、章若冰、胡有方等 2002 物理学报 **51** 1272]
- [24] Zhang R B , Wang Q Y , Bian Z P *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 756 (in Chinese) [章若冰、王清月、边自鹏等 2000 物理学报 **49** 756]

Experimental analysis of the dependence factor during supercontinuum generation in photonic crystal fiber^{*}

Hu Ming-Lie Wang Qing-Yue Li Yan-Feng Wang Zhuan Zhang Zhi-Gang Chai Lu Zhang Ruo-Bing

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

(Received 3 February 2004 ; revised manuscript received 1 July 2004)

Abstract

An experimental study of supercontinuum generation in a photonic crystal fiber with zero dispersion wavelength 780 nm by femtosecond laser and its dependence factor is presented. Supercontinuum light with a spectrum more than one octave broad (500 – 1100 nm) was generated in a photonic crystal fiber by femtosecond pulses from a self-starting , self-mode locked Ti : sapphire oscillator running at center wavelength of 810 – 840 nm. Different supercontinuuums were generated by the 35 fs pulses with different power , central wavelength , pre-chirp , and the continuous noise in the femtosecond pulses . Some reasonable analysis result is obtained from the comparisons of the experimental results , and the mechanism of the supercontinuum generation is analyzed .

Keywords : photonic crystal fiber , femtosecond laser , supercontinuum

PACC : 4270Q , 4265C , 4280W

^{*} Project supported by the Special Foundation for State Major Basic Research Program of China(Grant Nos. G1999075201 , 2003CB314904) , the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 60278003) , and the National High Technology Development Program of China(Grant No. 2003AA311010).