

文章编号: 1001-9014(2010)06-0445-04

光子晶体光纤红外超宽带连续谱的研究

崔海燕, 侯蓝田*, 韩颖

(亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 燕山大学 红外光纤与传感研究所, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 使用钛宝石飞秒激光器抽运一根长 30cm 的光子晶体光纤, 产生了从可见到近红外区的超连续谱, 波长范围为 465 ~ 2500nm, 光谱展宽范围达到了 2000nm 以上, 同时研究了超连续谱产生的机制。

关键词: 光子晶体光纤; 飞秒脉冲激光; 超连续谱

中图分类号: O437 文献标识码: A

GENERATION OF INFRARED ULTRA-WIDE BAND CONTINUUM SPECTRUM WITH PHOTONIC CRYSTAL FIBER

CUI Hai-Yan, HOU Lan-Tian*, HAN Ying

(Key Laboratory of Metastable Material Science & Technology, Institute of Infrared Optical
Fibres and Sensors, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Pumping a 30cm length of photonic crystal fiber with a femtosecond Ti-sapphire laser, the supercontinuum spectrum source of light in the near infrared region were generated. The wavelength ranges from 465nm to 2500nm, covering a wide band over 2000nm. The mechanism of the supercontinuum origination was studied.

Key words: photonic crystal fiber; femtosecond pulse laser; supercontinuum

引言

超连续谱 (super continuum) 是指当一束峰值功率很高的超短脉冲通过非线性材料后, 出射光谱中产生许多新的频率成分, 光谱宽度远远大于入射光脉冲的宽度, 一般光谱展宽可达几十纳米到几百纳米^[1,2]. 1970 年, R. R. Alfano 和 S. L. Shapiro 利用倍频锁模钕玻璃皮秒激光脉冲抽运 BK7 光学玻璃, 首次获得 400 ~ 700nm 的超连续谱^[3].

光子晶体光纤可以实现大数值孔径、小模面积的设计, 提高光学非线性作用的效率; 而且通过合理设计, 能够在很宽的谱带范围内支持低损耗的单模传输并且在可见光波段可具有反常色散, 这些特性满足了产生超连续谱的高非线性系数和色散要求, 因此光子晶体光纤被广泛用于产生超连续谱的研究^[4,5]. 光子晶体光纤中的超连续谱首次产生于 1999 年由 Ranka 等实验获得, 实验中采用高功率飞

秒级输入脉冲, 首次观察到 400 ~ 1600nm 的超连续谱; Kumar 等用软玻璃 (SF6) 光子晶体光纤作为传输介质, 用波长 1550nm、脉宽为 100fs 的脉冲在 75cm 长的软玻璃中产生了 350 ~ 2200nm 的特宽超连续谱^[6]; 利用亚碲酸盐玻璃, 达到了 789 ~ 4870nm; 采用红外玻璃, 达到了 3000nm 的波长展宽. 这些实例中, 要想获得超宽的光谱, 一般是加入非线性材料, 文中所用的光子晶体光纤没有加入任何非线性材料, 只是靠光纤本身的结构, 产生的超连续谱展宽范围就超过了 2000nm.

飞秒脉冲在 PCF 中传输时, 自相位调制 (Self-Phase Modulation, SPM)、交叉相位调制 (Across-Phase Modulation, XPM)、受激拉曼散射 (Stimulated Raman Scattering, SRS)、四波混频 (Four-Wave Mixing, FWM)、高阶孤子裂变、色散效应等非线性过程都可能起作用, 但每种效应的作用大小主要取决于初始超短激光脉冲的参数和光纤的色散及非线性等

收稿日期: 2009-11-10, 修回日期: 2010-06-10

Received date: 2009-11-10, revised date: 2010-06-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) (2003CB314905); 国家自然科学基金重点项目 (60637010); 国家高技术研究发展计划 (863) (2003AA311010) 资助的课题; 新型微结构光纤及宽带全光信号处理器 (F2008000867)

作者简介: 崔海燕 (1983-), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 研究方向为高非线性光子晶体光纤超连续谱的产生. cuihaiyan120@163.com.

* 通讯作者: hlt8068853@163.com

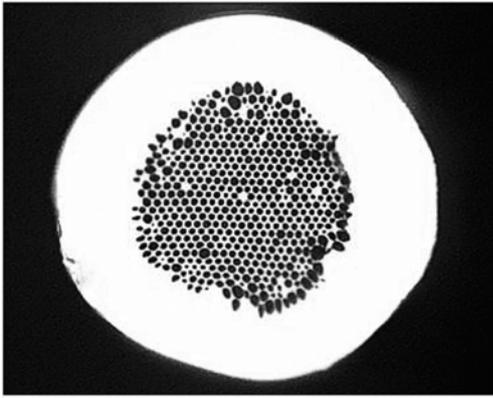


图1 光纤横截面结构
Fig.1 Cross-sectional structure of the fiber

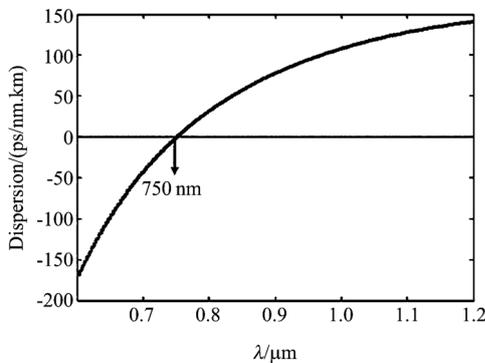


图2 色散参量
Fig.2 Dispersion parameter

特性^[7,8].

文中主要研究了在反常色散区泵浦光子晶体光纤超连续谱的产生,并对超连续谱的产生机理进行了研究.

1 光纤参数和实验装置

实验所用光子晶体光纤是由研究室拉制出来的,其纤芯直径为 $2.0\mu\text{m}$,空气填充率为 85%,横截面结构如图 1 所示,色散参量曲线如图 2 所示,非线性系数曲线如图 3 所示.

由图 2 和图 3 可知,该光纤的零色散波长为 750nm ,在钛宝石激光器可调波长范围内,该光纤有较大的非线性系数,容易产生非线性效应.

实验装置示意图如图 4 所示.

实验所用飞秒激光器由美国 Coherent 公司生产,型号为 Mira900 的钛宝石激光器,波长可调范围 $700 \sim 980\text{nm}$,脉冲宽度为 120fs ,重复频率为 76MHz ,其输出脉冲类型为双曲正割型.

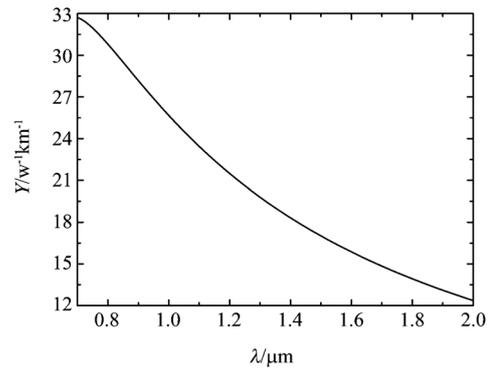


图3 非线性系数
Fig.3 Non-linear coefficient

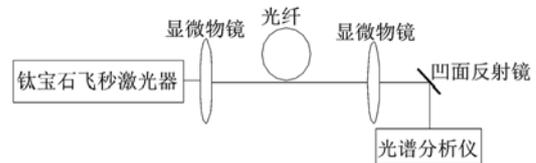


图4 实验装置示意图
Fig.4 Scheme of the experimental devices

飞秒激光器输出的激光经显微物镜聚焦耦合进长 30cm 的前文介绍的光子晶体光纤中.采用放大倍数为 40、数值孔径 $\text{NA} = 0.65$ 的显微物镜作为聚焦系统,将光纤放在六维微调架上进行耦合,采用两种光谱分析仪对输出光谱进行测量,一种是可见光谱分析仪 (Avaspec-2048-USB2),波长范围为 $200 \sim 1100\text{nm}$;另一种是红外光谱分析仪 (Avaspec-NIR256-NIR-2.5),波长范围为 $900 \sim 2500\text{nm}$.由光纤输出的光经 40 倍物镜聚焦后,再由凹面反射镜直接反射到光谱分析仪的接收处,避免了光谱分析仪的尾纤对接收的光谱造成干扰.

2 实验结果及分析

将泵浦平均功率为 760mW 、中心波长为 800nm 的泵浦脉冲,入射到光子晶体光纤中,产生的超连续谱如图 5 所示.由图 5 可以看出其超连续谱谱宽为 $465 \sim 2500\text{nm}$,范围超过 2000nm .

从图 5 可以看出,在 $1150, 1294, 1507, 1595$ 和 2112nm 左右有 5 个峰值,这就是孤子裂变后的基频孤子辐射峰,由于在分裂后会发四波混频效应,能量已向其他频率分量上转移,所以其强度并不特别高.在光纤的零色散波长 750nm 左右有一个凹陷,这是由于在零色散波长两边脉冲传输的群速度不同引起的,泵浦波长离 PCF 的零色散点越远,形成相

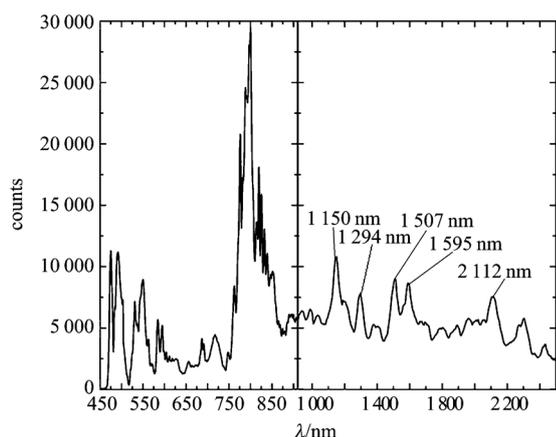


图5 平均功率为760mW、中心波长为800nm时产生的超连续谱

Fig. 5 Average power of 760mW, the center wavelength of 800nm supercontinuum generated

位匹配的四波混频效应就越弱,零色散点附近的光谱带隙就越明显^[9].

输入脉冲的中心波长 $\lambda_0 = 800\text{nm}$ 位于光纤的反常色散区,在光纤的反常色散区,由于非线性效应(主要是SPM)和色散(GVD)效应之间的互相作用,可产生一种非常引人注目的现象——光孤子.自陡效应对高阶孤子的影响非常显著,它导致这种孤子分裂成其它成分,这种现象称为孤子衰变.自陡效应将打破简并,使得两个孤子以不同的速度传输,结果,它们互相分开,并且随传输距离线性增加^[10].

SRS产生的拉曼脉冲可表现出孤子效应,拉曼效应导致脉冲内拉曼散射,其表现为孤子自频移.可以通过受激拉曼散射来理解红移现象,这是因为当激光脉冲在光纤反常色散区传输时,蓝移分量较红移分量传输得快,脉冲的蓝移分量可作为泵浦,通过拉曼增益有效地放大相同脉冲的红移分量.此过程在光纤中连续进行,致使能量不断地从蓝移分量转移到红移分量,随着距离的增加,这种能量转移就表现为孤子频移的红移^[11,12].高阶孤子的裂变会是频谱展宽出现多峰结构,而四波混频(FWM)则使频谱上有分立的新频产生.

超短脉冲在光纤中传输时,FWM过程伴随着多个其他的非线性效应,如SPM、XPM、SRS等,所有这些非线性过程能在原始脉冲频谱内产生新的频率成分,使光谱被展得很宽^[13].高阶色散的作用也很明显,使光谱变得不再对称,特别是由于光谱被展宽到了正常色散区,发生强烈的FWM效应,光谱朝长波方向展宽比短波方向要剧烈,使光谱变得更加不对称.在PCF的反常色散区,PCF中的群速度色散和

自相位调制相互抵消,形成孤子传输,在脉宽较宽时,孤子的阶数 N 就越大,由于高阶色散的影响, N 阶孤子裂变为 N 个脉冲,同时每个脉冲会发出对应的蓝移,而且是相位匹配的非孤子波.这 N 个脉冲最终稳定并形成红移的 N 个一阶孤子,同时由于四波混频效应,光谱相互兼并形成超连续谱.

光子晶体光纤在飞秒激光的强场作用下产生电子轨道畸变和原子核位移,同时引起了分子的高激发态的变化,这些都造成原子极化率的增强,而且响应非常快.介质对激光的吸收引起升温,升温后改变了介质的密度同样影响了分子的极化率,导致了非线性折射率的增强,这种改变与激光能量密度有关,这些非线性效应可以显著地加强红外波段超连续谱的形成^[14].

由于实验中泵浦功率很强,所用光纤又比较短,导致输出端剩余的泵浦光的强度很大,加之实验所用的光谱分析仪的量程仅到2500nm,无法看到比2500nm更远的中红外超连续谱.

3 结论

主要研究了在反常色散区泵浦PCF所产生的超连续谱.由实验图形可以看出,该光纤产生的超连续谱范围可达2000nm以上,此光纤没有掺杂任何非线性介质,仅靠光纤本身的结构就能产生如此宽的光谱展宽,这在目前是非常罕见的.另外,在光纤的端面结构中,除了中心的纤芯外,在其包层中也出现了几个纤芯,当耦合光斑尺寸较大时,这些纤芯对光纤超连续谱的产生也起了一定得作用,其作用的过程,还需要进一步的研究.此光纤结构,也为光子晶体光纤产生范围更宽的超连续谱提供了一种新的研究方法.

REFERENCES

- [1] Mendlovic D, Ozaktas H M. Fractional Fourier transforms and their optical implementation. I [J]. *JOSA*, 1993, **A10** (9): 1875—1881.
- [2] Ozaktas H M, Mendlovic D. Fractional Fourier transforms and their optical implementation. II [J]. *JOSA*, 1993, **A10** (12): 2522—2531.
- [3] Alfano R R, Shapiro S L. Emission in the region 4000 to 7000Å via four-photon coupling in glass [J]. *Phys. Rev. Lett.* 1970, **24** (11): 584—587.
- [4] Birk T A, Knight J C, Russell P St J, et al. Endlessly single mode photonic crystal fibre [J]. *Opt Lett*, 1996, **22** (13): 961—963.
- [5] Knight J C, Arriaga J, Birks T A, et al. Anomalous dispersion in photonic crystal fibre [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **12** (7): 807—809.

(下转 451 页)

5 结论

通过热释电红外传感器对目标(行人)探测距离的试验,分析了目标(行人)的感知部位、环境与目标温度差值、透镜的面积和区段数量等探测中存在的因素。结合各自特点,利用设计的测试方法对不同影响因素下的目标(行人)进行探测,快速直观的分析比较出对探测距离的影响,具有测试效率高和复用灵活的特点。试验结果表明,菲涅尔透镜的面积和区段数量以及环境温度极大的影响了被动式红外传感器探测系统的感知距离,通过改进,探测距离在原有基础上提高了近 4 倍。本方法对其他同类探测系统的研究有一定的指导和借鉴意义。

REFERENCES

- [1] JI Xin-Ming, WU Fei-Die, WANG Jian-Ye, *et al.* The application of the portable infrared absorption sensor in fire detection[J]. *Chinese Journal of Sensor Actuators*(纪新明, 吴飞蝶, 王建业, 等. 用于火灾探测的非色散红外吸收气体传感器. *传感技术学报*), 2006, **3**(15): 64—67.
- [2] Ho J-J, Fang Y K, Lee W J, *et al.* The dynamic response analysis of a pyroelectric thin-film infrared sensor with thermal isolation improvement structure[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1999, **46**(12): 2289—2294.
- [3] PU Chao-Guang, XIANG Lan. Pyroelectric coefficient measurement for ferroelectric materials[J]. *Infrared and Laser Engineering*(普朝光, 向兰. 铁电材料红外热释电系数测试研究. *红外与激光工程*), 2006, **35**(6): 771—776.
- [4] Lee S, Ha K N, Lee K C. A pyroelectric infrared sensor-based indoor location-aware system for the smart home[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronic*, 2006, **52**(4): 1311—1317.
- [5] Liu W G, Sun L L, Zhu W G, *et al.* Thermal analysis of pyroelectric infrared sensors fabricated by a flip-chip transfer method[J]. *Integrated ferroelectrics*, 2002, **49**(1): 245—254.
- [6] YU Sheng-Yun, SUN Sheng-Li. The design of multi-wireless infrared detectors and intelligent burglary-resisting system[J]. *Laser and Infrared*(于胜云, 孙胜利. 多路无线红外探测智能安防系统设计. *激光与红外*), 2008, **4**(11): 42—44.
- [7] GU Rong-Ye. A kind of new type moving detector[J]. *Electronic Test*(顾荣业. 一种新颖的微动探测器. *电子测试*), 2007, **7**(19): 75—78.
- [8] CHEN Shu-Jing, XIONG Juan. Design and implementation of a high performance infrared signal detection switch[J]. *Modern Electronic Technique*(陈淑静, 熊娟. 一种高性能红外信号检测开关的设计与实现. *现代电子技术*), 2009, **32**(8): 138—139.
- [6] Ravi Kumar V V, Gorge A, Reeves W, *et al.* Extruded soft glass photonic crystal fibre for ultrabroad supercontinuum generation[J]. *Optics Express*, 2002, **10**(25): 1520—1525.
- [7] LI Ai-Ping, ZHENG Yi, ZHANG Xing-Fang, *et al.* The supercontinuum generation in a photonic crystal fiber pumped at the anomalous dispersion region[J]. *Laser Technology*(李爱萍, 郑义, 张兴坊, 等. 反常色散区抽运光子晶体光纤产生的超连续谱. *激光技术*), 2008, **32**(1): 50—51.
- [8] ZHANG Ming-Hui, ZHU Zi-Min. Study on relationship of supercontinuum spectral width and wavelength in photonic crystal fiber[J]. *Optical Instruments*(张明辉, 竺子民. 光子晶体光纤中超连续谱宽与波长关系的研究. *光学仪器*) 2007, **29**(3): 41—43.
- [9] Lehtonen M, Genty G, Ludvigsen H. Supercontinuum generation in a highly birefringent microstructured fiber[J]. *Appl Phys Lett*, 2003, **82**(14): 2197—2199.
- [10] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics, Third Edition & Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Elsevier Science, 2001(贾东方 余震虹等译. *非线性光学原理及应用*. 第一版, 北京, 电子工业出版社), 2002, 208—211.
- [11] JIA Ya-Qing, YAN Pei-Guang, LV Ke-Cheng, *et al.* Experimental study and numerical analysis of femtosecond propagation and supercontinuum generation in high nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*(贾亚青, 严培光, 吕可诚等. 高非线性光子晶体光纤中飞秒脉冲的传播特性和超连续谱产生机制的实验研究及模拟分析. *物理学报*), 2006, **55**(04): 1809—1811.
- [12] YAN Pei-Guang, RUAN Shuang-Chen, DU Chen-Lin, *et al.* Supercontinuum generation in photonic crystal fiber pumped by femtosecond pulses[J]. *Acta Photonica Sinica*(闫培光, 阮双琛, 杜晨林, 等. 飞秒脉冲作用下光子晶体光纤超连续谱的产生. *光子学报*), 2003, **32**(11): 1209—1300.
- [13] ZHOU Bing, JIANG Yong-Liang, CHEN Xiao-Wei, *et al.* Numerical simulation on propagation of ultra-short laser pulse in photonic crystal fibers with different group velocity dispersion parameters[J]. *Acta Optica Sinica*(周冰, 姜永亮, 陈晓伟, 等. 超短激光脉冲在不同色散参量光子晶体光纤中传输的数值模拟. *光学学报*), 2007, **27**(2): 324—327.
- [14] Rabin H, Tang C L. *Quantum electronics; A Treatise. volume 1-nonlinear optics. part A*[M]. New York, Academic press. Inc, 1975.

(上接 447 页)