

多色脉冲激光光源研究*

程安运 阮双琛** 于永芹 曾剑春

(深圳大学工程技术学院, 深圳 518060)

摘要 采用钛宝石锁模飞秒激光器作为泵浦光源, 利用 $1.8 \mu\text{m}$ 纤芯的保偏光子晶体光纤的高非线性特性产生超连续谱, 通过调节泵浦光源和光子晶体光纤之间的耦合, 在可见光区, 获得了中心波长分别在 431 nm, 497 nm, 520 nm, 575 nm 的 mW 量级的不同颜色的激光输出, 并且测量输出的脉冲序列重复频率与泵浦光的一致, 具有良好的稳定性.

关键词 光子晶体光纤; 钛宝石锁模激光器; 非线性

中图分类号 TN245 **文献标识码** A

0 引言

通过超短飞秒或皮秒高功率脉冲在非线性介质中传输产生宽带连续光谱(SC)是一种众所周知的现象, 但是直到最近几年随着高非线性、微小纤芯光子晶体光纤(PCFs)的出现^[1]才引起人们极大的关注^[2~4]. 因为光子晶体光纤具有极小的有效纤芯面积, 大大增强了其中的非线性效应, 而且 PCFs 可以实现新的色散特性, 如: 在可见光区实现零色散以及在很大的波长范围内实现近零色散等, 而且 PCF 可以实现无截止单模传输和极强的双折射效应. 研究表明采用光子晶体光纤使得产生超连续谱所需要的光强度大大降低. 在标准光纤中, 产生超连续谱需要的光强度至少比 PCF 中需要的光强度高两个数量级, 因此采用较低能量的飞秒种子光脉冲即可产生宽带的超连续光谱. 利用 PCF 产生的 SC 是一种新型的光源, 由于它具有高的输出功率、平坦的宽带光谱、高度的空间相干性(聚焦)等特性, 能大大提高信噪比、减小测量时间以及加宽光谱测量范围. 光纤 SC 光源的应用前景非常广阔^[5~9], 可广泛应用在光纤衰减测量、干涉测量仪、光相干摄影术、光谱学分析等方面, 而且在光纤通信方面^[10~12]还可用作未来高速波分复用(WDM)/时分复用(OTDM)系统的发射光源, 近年又开始研究用作 WDM 光源. 另外, 它还可以应用在波长转换、WDM 光网的全光再生、光纤的色散测量及光学采样等.

文中采用钛宝石锁模飞秒激光器作为泵浦源, 其平均输出功率为 800mW, 对应的输出单脉冲能量为 10.5 nJ, 在 2.5 m 长、平均纤芯尺寸为 $1.8 \mu\text{m}$ 、空气占空比为 0.8 的光子晶体光纤中产生超连续谱, 利用准直透镜和分光棱镜将所得超连续谱进行分光, 测量了可见光范围内不同波长的输出功率.

1 光纤参数和实验装置

所用光子晶体光纤是由丹麦 Crystal Fiber A/S 公司提供的, 其端面显微图如图 1. 光纤设计的是类椭圆纤芯而不是圆形纤芯, 使得光纤具有双折射特性(存在快、慢轴), 这样光脉冲在光纤中传输时, 会保留脉冲的偏振态, 所以称这种光纤为保偏光纤(PM-PCF), 保偏特性有利于在光子晶体光纤中产生有效和稳定的超连续谱. 其包层和被覆层的直径分别为 $127 \mu\text{m}$ 和 $235 \mu\text{m}$, 平均纤芯尺寸为 $1.8 \mu\text{m}$ 、包层中的空气孔间距为 $1.6 \mu\text{m}$ 、气孔直径与平均孔

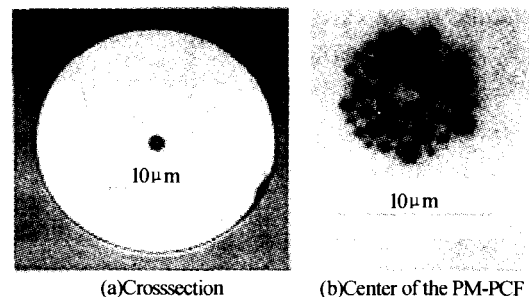


图 1 光子晶体光纤的端面显微图片

间距之比为 0.8, 这些参数的设计可以获得低的色散系数和高的非线性效应. 该光纤在 780 nm 处光纤的数值孔径约为 0.46. 光纤长度为 2.5 m. 基于非线性效应的 PCF 折射率在特定功率下可以表示为

$$n = n_L + n_2 |E|^2 \quad (1)$$

n_L 是线性折射率部分, n_2 是 PCF 的非线性折射率系数, 对于飞秒脉冲在光子晶体光纤中传输时, n_2 可以取为 $2.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}^2$ ^[4]. 采用纤芯面积近似作为纤芯有效面积^[5] A_{eff} , PCF 在 800 nm 处的非线性系数 $\gamma (\gamma = n_2 \omega / (c A_{\text{eff}}))$ 计算为 $67 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$, 式中 ω 为中心角频率, c 为真空中的光速.

图 2 是实验装置示意图, 锁模钛宝石激光器 (Mira 900F) 产生超短飞秒脉冲的重复频率为 76 MHz、脉宽约为 200 fs、中心波长在 800 nm 左右. 由于光纤表面 4% 的反射会使脉冲序列失真, 严重情况下

* 广东省自然科学基金项目 (No. 031809) 资助项目

** Tel: 0755-26536215 Email: scruan@szu.edu.cn

收稿日期: 2005-03-09

还会导致激光器失锁,故采用了法拉第隔离器来防止反射光返回到激光器. 法拉第隔离器包括格兰一泰勒棱镜和法拉第旋光器,采用两个全反镜把泵浦光引进显微镜物镜,然后耦合进 PCF. 采用放大倍数为 $25\times$ 和数值孔径 $NA=0.4$ 的显微镜物镜作为聚焦系统,因为 0.4 的数值孔径比所用的光子晶体光纤的数值孔径小,所以可以有效的将泵浦功率耦合进光子晶体光纤. 将光子晶体光纤放置在六维微移平台上,这样光纤调节可以具有很高的精度. 实验中输出光谱采用光谱仪(Ocean optics OOIBase S2000)进行光谱测量,其测量波长范围为 300 nm 到 950 nm . 采用美国 Spectra-Physics 的功率计(407A)进行了功率的测量.

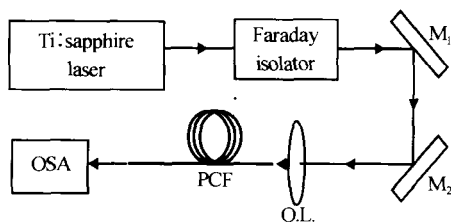


图 2 实验装置

Fig. 2 The schematic diagram of the experimental setup

2 实验结果与讨论

采用锁模钛宝石激光器输出中心波长 800 nm 的飞秒脉冲作为泵浦光源,输出功率为 800 mW , 对应的输出单脉冲能量为 10.5 nJ , 泵浦波长处于 PCF 的反常色散区,目前普遍认为^[13~15],处于 PCF 的反常色散区的超连续光谱的产生机理被认为是高阶孤子裂变(fission)和四波混频效应. 首先因为泵浦超短脉冲本身有一个光谱宽度而且处于 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,而脉冲内拉曼散射效应,使传输能量向长波方向转移,产生新的红移频率成分,形成高阶孤子. 由于高阶色散的影响,高阶孤子分裂形成不同红移频率的基态孤子脉冲,同时每个脉冲会发出对应的蓝移而且相位匹配的非孤子波辐射以释放掉多余的能量,产生了蓝移的频率成分,同时由于四波混频效应,产生新的频率成分,最后相互兼并形成超连续谱. 产生超连续光谱的宽度和平坦度依赖于光纤长度和脉冲宽度、泵浦功率等具体参数. 蓝移的非孤子波辐射和四波混频形成了可见光区的光谱成分. 在泵浦功率为 800 mW 时,获得的可见光及近红外区的典型的超连续谱谱图如图 3,用功率计测量总的输出功率最大可达 110 mW . 从图中可以看出,采用准直透镜和分光棱镜将光纤输出的光束进行分光,可以获得可见光区的几乎所有不同颜色的激光. 下面我们给出了几种不同颜色和中心波长的光束的光谱图和测量得到的相应的功率.

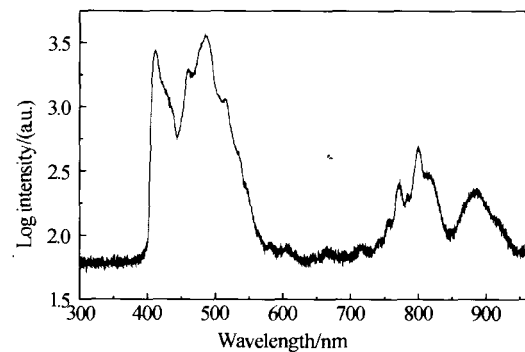
图 3 泵浦功率为 800 mW 时,获得的超连续谱图,其总输出功率最大可达 110 mW Fig. 3 The supercontinuum was generated with a pump power of 800 mW , and the maximum output power was measured to be 110 mW

图 4 是在可见光区用准直透镜和分光棱镜将光

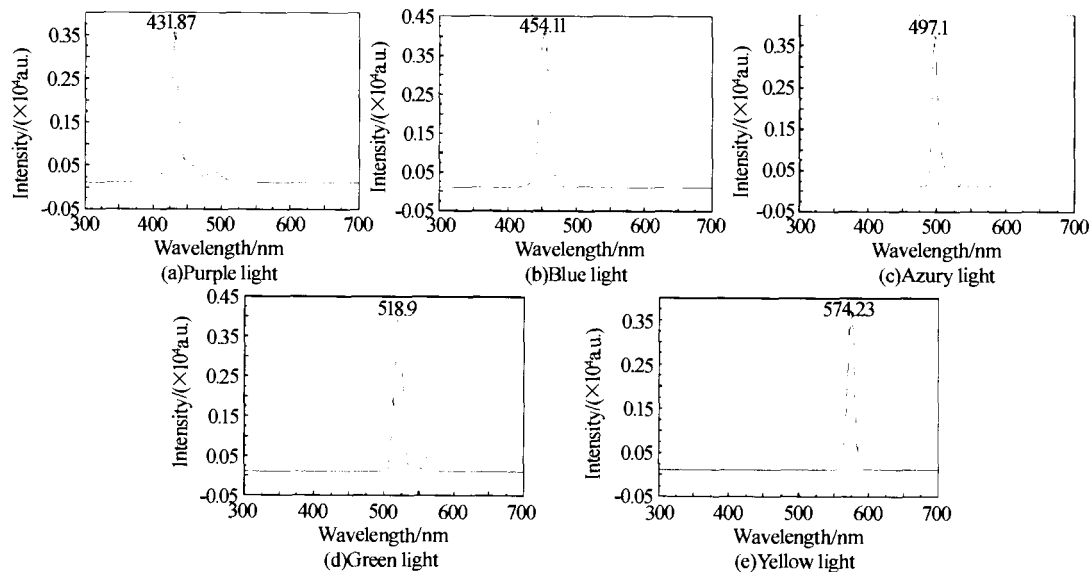


图 4 光纤输出的可见光区不同颜色的激光光谱图

Fig. 4 The spectra with different colors from the PCF in the visible region

纤输出的光束进行分光得到的几种不同颜色的输出光谱图,测得中心波长在 431 nm,光谱半宽度(FWHM)为 10 nm 的紫光输出功率为 3.5 mW,FWHM 为 17 nm,中心波长为 454 nm 的蓝光输出功率为 4.8 mW,FWHM 为 10.5 nm,中心波长为 497 nm 的蓝绿光对应的输出功率为 4.5 mW,FWHM 为 15 nm,中心波长为 520 nm 的绿光对应的输出功率为 3 mW,FWHM 为 12 nm,中心波长为 575 nm 黄光对应的输出功率为 6 mW. 考虑到透镜和分光棱镜的损耗,各个波长相应的功率应该比测量值更高. 可见光区的不同颜色的激光在生物医疗和显示等领域具有重要的应用价值.

采用最大速率为 2.5 Gs/s、带宽 300 MHz 的示波器(TDS3032B 型)测量了各个不同颜色的输出激光对应的脉冲序列,其中绿光对应的脉冲序列如图 5. 表明各个波长的脉冲具有良好的稳定性,而且测得的脉冲重复频率与泵浦光的一致.

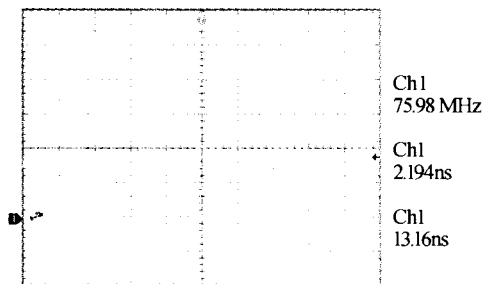


图 5 绿光对应的脉冲序列

Fig. 5 Optical pulses of green light measured by oscilloscope

3 结论

采用锁模钛宝石激光器输出中心波长 800 nm 的 nJ 量级的飞秒脉冲作为泵浦光源,利用光子晶体光纤中具有强的非线性效应,获得了在可见光区的黄、绿、蓝、紫色等不同颜色的激光输出,并且输出具有稳定的脉冲序列特性.

参考文献

- 1 Knight J C, Birks T A, Russell P S J, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding. *Opt Lett*, 1996, **21**(19):1547~1549
- 2 Ranka J K, Robert S W, Andrew J S. Visible continuum generation in air-silica microstructure fibers with anomalous dispersion at 800 nm. *Opt Lett*, 2000, **25**(1): 25~27
- 3 Birks T A, Wadsworth W J, Russell P S. Supercontinuum generation in tapered fibers. *Opt Lett*, 2000, **25**(19):1415~1417
- 4 Birks T A, Knight J C, Russell P S J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber. *Opt Lett*, 1997, **22**(13): 961~963
- 5 闫培光, 阮双琛, 杜晨林, 等. 飞秒光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):1299~1301
Yan P G, Ruan S C, Du C L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11):1299~1301
- 6 Yu Y Q, Ruan S C, Cheng C, *et al.* Spectral broadening in a polarization-maintaining photonic crystal fibre by femtosecond pulses from an optical parametric amplifier. *Chin Phys Lett*, 2005, **22**(2): 380~383
- 7 Yu Y Q, Ruan S C, Cheng C, *et al.* Supercontinuum generation using a polarization-maintaining photonic crystal fibre by a regeneratively amplified Ti:sapphire laser. *Chin Phys Lett*, 2005, **22**(2): 384~387
- 8 Yan P G, Ruan S C, Lin H J, *et al.* Supercontinuum generation in a photonic crystal fiber. *Chin Phys Lett*, 2004, **21**(6):1093~1095
- 9 陈泳竹, 徐文成, 崔虎. 光纤中超连续谱产生的频域分析. *光子学报*, 2003, **32**(2):148~151
Chen Y Z, Xu W C, Cui H. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2):148~151
- 10 Yu Y Q, Ruan S C, Cheng C, *et al.* Supercontinuum generation at 1.6 μm region using a polarization-maintaining photonic crystal fiber. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11):1301~1303
- 11 阮双琛, 于永芹, 程超. OPA 泵浦保偏光子晶体光纤产生超连续谱和非线性特性的研究. *光子学报*, 2004, **33**(7):789~792
Yu Y Q, Ruan S C, Cheng C. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7):789~792
- 12 Monro T M, Richardson D J, Bennett P J. Developing holey fibres for evanescent field devices. *Electronics Letters*, 1999, **35**(14):1188~1189
- 13 Husakou A V, Herrmann J. Supercontinuum generation of higher-order solitons by fission in photonic crystal fibers. *Phys Rev Lett*, 2001, **87**(20):203901-1-203901-4
- 14 Herrmann J, Griebner U, Zhavoronkov N, *et al.* Experimental evidence for supercontinuum generation by fission of higher-order solitons in photonic fibers. *Phys Rev Lett*, 2002, **88**(17):173901-1-173901-4
- 15 Lehtonen M, Genty G, Ludvigsen H. Supercontinuum generation in a highly birefringent microstructured fiber. *Appl Phys Lett*, 2003, **82**(14):2197~2199

Research on the Pulsed Laser Source with Multi-colors

Cheng Anyun, Ruan Shuangchen, Yu Yongqin, Zeng Jianchun

School of Engineering and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060

Received date: 2005-03-09

Abstract The femtosecond pulses produced by Ti : sapphire mode-locked laser were applied as the pump light, to generate the supercontinuum light source in the polarization-maintaining photonic crystal fiber with the average core size of 1.8 μm due to its high nonlinear properties. The multi-colors laser light source in the visible region with the central wavelengths of 431 nm, 497 nm, 520 nm, 575 nm, respectively, was achieved to be mW level with the adjusted coupling between the pump source and the photonic crystal fiber. And the output optical pulses were measured to be good stability with the same repetition rate of 250 kHz to the pump pulses.

Keywords Photonic crystal fiber; Ti : sapphire mode-locked laser; Nonlinearity



Chen Anyun was born in Oct. 1955, Xi'an, Shaanxi Province. He received his master degree from Beijing Aeronautical School in July 1986. He is working on the research of Electron Discharge Machining (EDM) in the field of Electro-Mechanical engineering. Now he is a lecturer in School of Engineering and Technology, Shenzhen University.

(上接封四)

注明图序、图题(图题为中英文对照)和图注(英文)。坐标图的标目使用标准物理量和法定计量单位符号,标目一般由三个要素组成:物理量名称、与物理量相应的符号、单位。与物理量相应的符号与单位之间用斜线隔开,不要用括号。例:Wavelength λ/nm 。坐标轴上要加上标值(即数字),标值的数字取得要完整。文字表格使用三线表(不用竖线),可加辅助线,表与图形、正文内容不能重复。

3.8 参考文献 在正文所引用之处以上脚带方括号的形式标出,引用文献一般不超过 20 篇。作者不超过 3 人(含 3 人)的全部列出,多于 3 人时一般只写前 3 人,后加“等”,或“*et al*”。姓名采用姓前名后的形式,作者之间不加“和”,或“and”。在参考文献表中,参考文献标号按该文献在文章中出现的先后顺序列出,上下文文献相同的项目,不宜用“同上”或“*ibid*”,等。引用的网上出版物必须是固定的、可一直查阅的文献。非英文文献,请在同一条下用英文标注(文献为书的请全译),如:

1 王小华.漫射光宽视场光学天线的设计.光子学报,2002,31(2):157~166

Wang X H. *Acta Photonica Sinica*, 2002,31(2):157~166

参考文献书写格式请遵照国家标准中顺序编码制的规定。著录格式如下:

●专著 作者.书名.版本(第 1 版不著录).出版地:出版者,出版年.起止页码 **示例**

1 胡天喜,陈 祀,陈克明,等.发光分析与医学.上海:华东师范大学出版社,1990.89~103

2 Sanderson R T. *Chemical Bond and Bond Energies*. New York:Academic Press,1976.23~30

●期刊 作者.文题名.刊名,出版年份,卷号(期号);起止页码 **示例**

1 关柏鸥,刘治国,开桂云,等.基于悬臂梁结构的光纤光栅位移传感研究.光子学报,1999,28(11):983~985

2 Birks T A, Culverhouse D O, Smaith R G, *et al*. 2×2 single-mode fiber routing switch. *Optical Letter*, 1996, 21(10):722~724

●论文集

作者.文题名.见(英文用 in);编者.论文集名(多卷集为论文集名,卷号).出版地:出版者,出版年.起止页码 **示例**

1 薛社普,周增桦,刘毅,等.C-醋酸棉酚在大鼠体内的药物动力学研究.见:薛社普,梁德才,刘裕主编.男用节育药棉酚的实验研究.北京:人民卫生出版社,1983.67~73

2 Howland D. A model for hospital system planning. in: Krewernas G, Morlat G, eds. *Actes de la 3eme Conference International de Recherche Operationells*, Oslo,1963. Paris: Dunod,1964.203~212

●专利文献 专利申请者.题名.其他责任者(供选择).附注项(供选择).专利国别,专利文献种类,专利号.日期 **示例**

1 曾德超.常速高速通用优化犁.中国专利,85203720,1.1986-11-13

2 Fleming G L, Martin R T. Ger Par. US patent, C08g,139291.1972-02-07

(下转 1136 页)