

大芯径光纤整形飞秒激光脉冲空间分布的研究<sup>\*</sup>

王向林<sup>1</sup>, 侯洵<sup>1</sup>, 魏志义<sup>2</sup>

(1 西安交通大学 a. 电子与信息工程学院; b. 陕西省信息光子技术重点实验室, 西安 710049)  
(2 中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100190)

**摘 要:**通过将 1 kHz 重复频率的飞秒放大激光脉冲耦合到大芯径(100  $\mu\text{m}$ )阶跃光纤, 在 27 mm 长的光纤中产生了环形空间光强分布, 并在 3 160 mm 的长光纤中观察到平台型的空间光强分布, 通过自聚焦效应对该现象进行了解释. 结果表明, 通过选择合适的光纤, 可以实现对放大飞秒激光脉冲的有效空间整形, 从而达到改善光束质量的效果.  
**关键词:**飞秒激光; 大芯径光纤; 光束空间整形; 自聚焦  
**中图分类号:** TN248.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1004-4213(2009)10-2738-4

0 引言

在光纤传输激光过程中, 由于光纤内芯尺寸比较小, 在较小的注入功率下, 就可以获得较高的功率密度, 加之光纤的损耗较低, 因而可以使光场在光纤内获得很长的有效非线性作用距离. 而在体材料中, 为了获得较高的光功率密度, 需要对光束进行聚焦, 但在减小聚焦光斑尺寸的同时, 却导致有效作用距离缩短. 因此, 与块材料相比, 激光在光纤中更容易产生非线性效应. 事实上, 超短脉冲激光在光纤中所导致的非线性效应已在许多方面得到了广泛应用. 利用飞秒激光在单模光纤中的非线性作用展宽其光谱范围, 然后再进行脉宽压缩的实验 1987 年已见报道<sup>[1]</sup>. 但由于固体实芯光纤材料破坏阈值的限制<sup>[2]</sup>, 通常的单模光纤难以承受较高的脉冲能量. 相对而言, 由于惰性气体能承受更高的激光能量, 并且具有比较大的三阶非线性系数和高的多光子电离阈值, 因此采用充有惰性气体的空芯光纤作为飞秒放大激光的传输介质, 可以有效地通过非线性相互作用产生超连续光谱, 经压缩后能够得到更窄的激光脉宽<sup>[3-5]</sup>. 近 10 年, 这一技术已在飞秒脉冲压缩、超宽激光光谱的产生及激光成丝等方面得到了广泛的使用<sup>[6-7]</sup>, 并有理论模型对飞秒强激光脉冲与氩气团簇的相互作用进行解释<sup>[8]</sup>.

超短脉冲激光在光纤传输中所产生的非线性效应还会引起光束的空间分布发生变化. 合理利用这一效应, 则可以改善光束的质量, 从而有效地提高超短脉冲激光的质量. 1987 年, P. L. Baldeck 等人通过将 25 ps 的 Nd : YAG 激光脉冲耦合到长 7.5 m

的 100  $\mu\text{m}$  大芯径阶跃型光纤中, 观察到了出射光的环形光强分布<sup>[9]</sup>, 他们认为这是由于皮秒激光脉冲的自聚焦引起光纤轴心处折射率增加, 形成折射率的抛物型分布所致, 因为光波在这种局部导波结构中的模式横向分布是环形的. 随后李劼等人使用类似的方法也得到了环形光强分布和准连续谱的结果<sup>[10-11]</sup>, 但他们认为环形光场的形成和光纤的制造工艺所造成的轴心折射率凹陷有关, 并且自聚焦效应加深了这种凹陷. 也有研究者建立模型认为环形自聚焦光场的形成是由实验所用光纤固有的抛物型折射率分布引起的<sup>[12]</sup>, 并用该模型计算了环的半径<sup>[13]</sup>.

与利用光纤做光谱展宽和脉冲压缩的研究相比, 采用光纤整形激光空间分布的研究目前还不够成熟. 考虑到常规单模光纤所能承受的有限能量, 本文采用大芯径光纤, 研究了它对单脉冲能量十几微焦的飞秒放大激光脉冲的空间整形特性. 这种具有大模面积及较大数值孔径的光纤, 比常规单模光纤传导更高的能量. 由于通常放大飞秒激光脉冲随着能量的提高, 光束质量相应变坏, 因此这一工作对于改进飞秒放大激光的光束质量, 具有一定意义.

1 实验装置

图 1 是实验装置图. 实验中的激光系统是一台飞秒啁啾脉冲放大装置, 可输出单脉冲能量约 220  $\mu\text{J}$ 、激光脉冲宽度约 30 fs、重复频率 1 kHz、中心波长为 780 nm 的飞秒放大激光脉冲. 从放大器出射的激光经过分束镜后实验中反射激光的单脉冲能量约为 20  $\mu\text{J}$ , 经银镜 M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub> 和小孔光阑后, 用  $\lambda/2$  波片和宽带偏振分光棱镜(PBS)组合而成的光强连续调节器调节光强, 然后再用一曲率半径 1 500 mm 的凹面镜 M<sub>3</sub> 将光强调节后的激光反射聚焦, 并经银镜 M<sub>4</sub> 反射后注入到大芯径光纤中. 为

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(60578027)资助  
Tel : 029- 82669146 Email: wangxianglin. 06@stu. xjtu. edu. cn  
收稿日期: 2008- 10- 30      修回日期: 2009- 01- 13

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

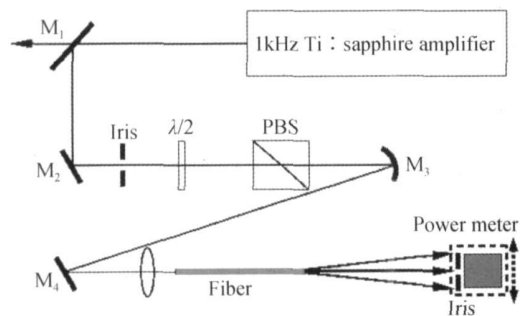


图 1 实验装置  
Fig.1 Experimental setup

提高耦合效率, 进一步在光纤前端增加焦距为 95 mm 的凸透镜, 不仅加强了聚焦效果, 而且又可以将凸透镜固定在五维平移台上, 从而通过调节平移台很好地将激光耦合进光纤. 光纤固定在磁力压板光纤卡具里. 当光纤为几个 cm 时, 只用到一个光纤卡具; 光纤较长时, 用两个光纤卡具分别夹住光纤两端. 实验用到的光纤为大芯径阶跃型光纤(武汉长飞光纤光缆公司产品), 其芯径为 100 μm, 数值孔径为 0.22. 在距光纤末端 8 cm 处放置约 1 mm 直径的小孔光阑, 功率计置于光阑后, 并将光阑和功率计固定在一维平移台上, 保证二者同时可在垂直于光纤的方向上水平移动.

2 实验结果

首先采用 27 mm 长的大芯径光纤, 在输入光功率 9 mW 的情况下观察实验结果. 调节凸透镜的位置, 通过功率计测量光纤末端的输出强度, 可以实现激光对光纤的最佳耦合. 由于激光经光纤后出射光有一定的角度发散, 因此从垂直于出射光方向放置的观察屏上, 可看到明显的环形光强分布. 图 2 是用数码相机拍摄到的结果, 输入光强由小到大改变, 环

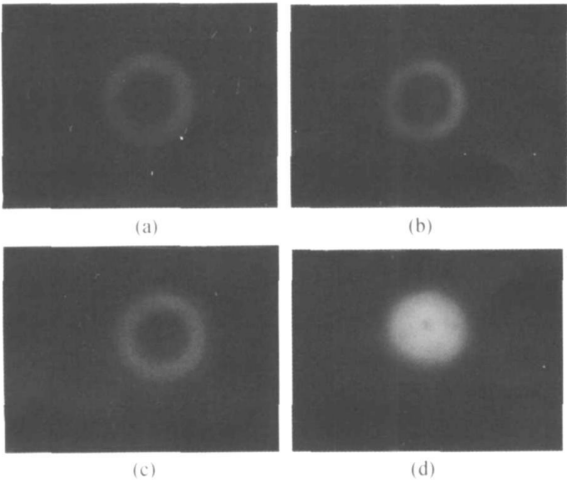


图 2 光纤出射光的环形光强分布照片  
Fig.2 Images of ring optical intensity distributions at the fiber output

区的光强也在增大, 但环的直径基本保持不变. 当出射功率达到 4.5 mW 时, 可以看到彩色环的出现(图 2 中第四幅).

使用图 1 的小孔光阑和功率计组合测量距光纤末端 8 cm 处光强沿环直径的分布情况, 得到了图 3 的结果. 图中示出了总的出射功率为 0.5 mW 和 2.5 mW 两种情况下光强沿径向的变化情况, 可以看出随着光纤内光功率的增加, 环区光功率也增加, 但是环的直径基本保持不变, 并由图 3 可得出射光的最大发散角约为 8.5°. 当光纤内光功率较高时, 环区的左右两个峰高度有所不同, 其主要原因是光纤耦合的位置稍微偏离光纤轴心所致.

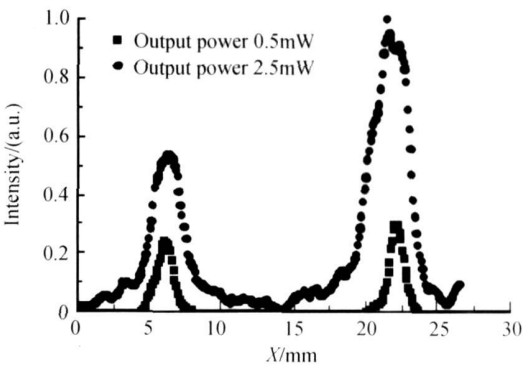


图 3 激光从 27 mm 长的光纤出射后, 光强沿直径的分布情况  
Fig.3 Optical intensity distribution along diameter of the output laser from the 27 mm fiber

当输入光功率增加到 9.7 mW 时, 可以从光纤端得到 4.5 mW 的稳定输出, 此时光斑已出现彩色环分布(图 2 中第四幅), 所对应的新光频成分主要是由自相位调制作用产生的. 但如果继续增加入射光功率, 随着耦合到光纤的光功率增加, 则光脉冲的峰值功率迅速增长, 并损伤光纤结构. 实验中观察到, 当光纤出射功率增加到十几毫瓦后, 再回到较小出射功率时, 出射光在截面上分布形状不规则, 呈现出散乱的光斑. 这种现象的出现, 有可能是高峰值功率激光在介质中形成多丝后造成的结果.

激光脉冲在光纤中传输时, 由于石英材料的三阶非线性电极化效应, 总折射率和光强的关系可表示为  $n = n_0 + n_2 I(t)$ ,  $n_2$  为石英的非线性折射率系数. 石英本身并不是良好的非线性材料, 石英光纤的非线性折射率系数  $n_2$  约为<sup>[14]</sup>  $3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ , 远远小于体光学中通常使用的非线性介质, 但在光纤内传播激光的非线性距离长, 仍能产生较强的非线性现象. 如果激光脉冲的横向分布为高斯型, 则轴心处的折射率增加要比边缘处折射率增加得多, 从而形成中心折射率高边缘折射率低的折射率分布, 光束就像通过一个正透镜, 产生自聚焦效应. 当飞秒激光脉冲在大芯径阶跃型光纤中传输时, 情形正是

如此.

实验中,对于中心波长  $\lambda$  为 780 nm 的钛宝石激光脉冲,石英光纤自聚焦阈值功  $P_{cr} = \lambda^2 / 2\pi n_2 = 3.03 \times 10^6$  W 率.当光纤中有 1 mW 功率时,用高斯分布计算的峰值功率为 31 MW,是自聚焦阈值功率的 10 倍,则会在光纤轴心附近形成类似于抛物型折射率分布.在这种折射率作用下,光场的横向分布是环形的.且一旦形成环形分布,则在环区的光功率高,环区折射率会增加.但是,由于光纤色散等作用,环区的激光峰值功率已降低,对折射率影响也较小,使环形光强分布保持到光纤出射端.

进一步采用 3 160 mm 长的光纤作为研究对象,在出射功率 1.1 mW 时,用上述相同的方法测量光纤出射后的激光光场分布.此时小孔光阑距光纤出射端 5 cm,得到的光场强度沿直径分布如图 4,环区已经消失,截面上光功率分布趋于平坦.这是因为在光纤前段形成了环状分布,随着激光脉冲在光纤中的传播,色散作用使激光脉冲在时域里展宽,峰值功率下降,所以自聚焦作用下降.而衍射作用较明显,衍射是向环外和环内两个方向的光功率密度低的区域进行的,最终形成了这种平台型光强分布.同时,其出射光的最大发散角约为  $10.2^\circ$ ,比 27 mm 光纤时增大了,这也是由于光脉冲在较长光纤中衍射引起的.

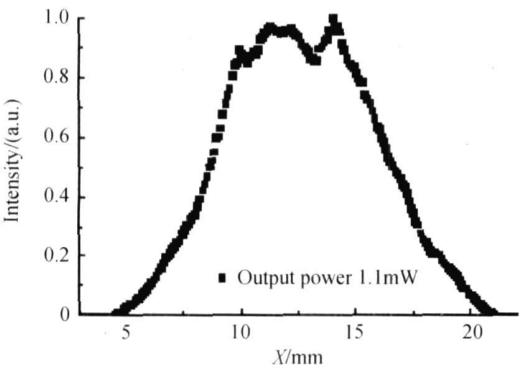


图 4 经 3 160 mm 长光纤后出射光沿径向的光强分布情况  
Fig.4 Optical intensity distribution along diameter of the output laser from the 3 160 mm fiber

从飞秒脉冲激光放大系统出射的激光空间光强分布一般呈高斯型,即强度在中心最强,沿径向随着半径的增加而迅速减小.本实验通过把飞秒放大光注入不同长度的大芯径阶跃型光纤,得到了光强呈环形空间分布和平台型空间分布的结果.经过空间整形后的这两种空间光强分布可通过凹面镜或凸透镜准直后,作为再生放大的良好种子光.在高峰值功率台面飞秒激光系统研究中,对种子脉冲进行空间整形和有效的展宽是啁啾脉冲放大(CPA)的关键技术之一.而将放大光经过大芯径光纤整形后再作为

种子光,将具有如下的优点:1)在后面的放大过程中,光场中心的光强增长速度大大降低,可以避免工作晶体和光学元件被破坏;2)同时引入了正色散,可适当选择光纤长度等参量来确定色散量,对种子光脉冲进行时域上的展宽.由于其结构简单,比?ffner 展宽器更易调节.

但在整个实验过程中,由于空气扰动等引起的光束指向性问题,光纤耦合效率存在一定的变化,还有待于进一步优化;此外注入激光功率太高会导致光纤破坏,端面污染、机械损伤等因素也会影响光束质量变差和透过率降低.这都需要进一步开展更加深入的研究.

3 结论

本文通过将 1 kHz 重复频率的飞秒放大激光脉冲的部分光耦合到 27 mm 长的大芯径光纤,观察到呈环形分布的出射激光;当采用 3 160 mm 的长光纤后,出射光接近平台型分布.结果分析表明自聚焦效应对飞秒脉冲的空间整形起着主要作用.这种空间整形后的激光由于理想的光强分布,可以作为优良的种子光,优化啁啾脉冲放大飞秒激光的输出特性.

参考文献

[1] FORK L R, BRITO CRUZ H C, BECKER C P. *et al.* Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation[J]. *Optics Letters*, 12(7): 483-485.

[2] MA Lin, SHI Shun-xiang, CHENG Guang-hua, *et al.* Micro-explosions threshold induced by a single focused femtosecond laser pulse in fused silica[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(6): 969-971.  
马琳,石顺祥,程光华,等.单个飞秒激光作用下熔融石英的微爆阈值研究[J].光子学报,2007,36(6):969-971.

[3] NISOLI M, SILVESTRI DE S, SVELTO O. Generation of high energy 10 fs pulses by a new pulse compression technique[J]. *Appl Phys Lett*, 1996, 68(20): 2793-2795.

[4] NISOLI M, DE SILVESTRI S, SVELTO O. *et al.* Compression of high-energy laser pulses below 5 fs[J]. *Opt Lett*, 1997, 22(8): 522-524.

[5] SCHENKEL B, BIEGERT J, KELLER U, *et al.* Generation of 3.8-fs pulses from adaptive compression of a cascaded hollow fiber supercontinuum[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(20): 1987-1989.

[6] ZHU Jiang-feng, WANG peng, HAN hai-nian, *et al.* Experimental study on generation of high energy few cycle pulses with hollow fiber filled with neon[J]. *Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy*, 2008, 51(5): 507-511.

[7] CAO Shi-ying, ZHANG Zhi-gang, CHAI Lu, *et al.* Probing the spectrum evolution of femto second pulse filament in argon gas with a hollow fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(5): 2765-2768.

曹士英,张志刚,柴路,等.利用空心光纤探测飞秒脉冲在氩气中成丝过程中的光谱演变[J].物理学报,2007,**56**(5):2765-2768.

[8] CAI Xu-hong, LI Shao-hui. Characteristics of coulomb explosion of argon clusters in intense femtosecond laser pulses [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 811-814.  
蔡旭红,李邵辉.飞秒强激光脉冲中氩团簇库仑爆炸特性研究[J].光子学报,2006,**35**(6):811-814.

[9] BALDECK L P, RACCAH F, ALFANO R R. Observation of self-focusing in optical fibers with picosecond pulses [J]. *Opt Lett*, 1987, **12**(8): 588-589.

[10] LI Qu, HUA Yi-min, WANG Wen-zhen, *et al*. Self-focusing in optical fiber and accompanying quasi-continuum generation [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1989, **6**(4): 371-373.  
李劼,华一敏,王文珍,等.光纤中的自聚焦和伴随产生的准连续谱[J].量子电子学,1989,**6**(4):371-373.

[11] LI Qu, HUA Yi-min, WANG Wen-zhen, *et al*. Self-focusing of picosecond pulses in large-core optical fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, **10**(6): 514-520.  
李劼,华一敏,王文珍,等.大芯径石英光纤中皮秒脉冲激光的自聚焦[J].光学学报,1990,**10**(6):514-520.

[12] CHEN Zhi-hao, CHEN Xi-yao. Analysis of the formation of ring structure of the self-focusing in large-core silicapo tical fibers [J]. *Laser Journal*, 1993, **14**(1): 38-40.  
陈智浩,陈曦曜.大芯径石英光纤中环形自聚焦光场成因的分析[J].激光杂志,1993,**14**(1):38-40.

[13] HONG De-ming, CHEN Zhi-hao. Accurate determination of the ring diameter of the self-focusing light field in an mutimode optical fiber [J]. *Journal Of Fujian Normal Univerdity ( Natural Science)*, 1994, **10**(4): 54-56.  
洪德明,陈智浩.多模光纤自聚焦光场环直径的精确确定[J].福建师范大学学报自然科学版,1994,**10**(4):54-56.

[14] LAN Xin-ju. *Laser technology* [M]. 2nd, Beijing: Seince Press, 2005: 358.  
蓝信钜.激光技术[M].2版,北京:科学出版社,2005:358.

# Spatial Shaping of Femtosecond Laser Pulse in Large-core Optical Fiber

WANG Xiang-lin<sup>1</sup>, HOU Xun<sup>1</sup>, WEI Zhi-yi<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup> a. School of Electronic and Information Engineering; b. Key Laboratory of Photonics Technology for Information, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)  
(<sup>2</sup> Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The experimental research on spatial shaping by injecting the amplified femtosecond laser pulse at the repetition rate of 1 kHz into a step fiber with core diameter of 100 μm is reported. Beam profiles with ring and tap-top distributions are observed in the fibers with length in 27 mm and 3 160 mm, respectively, which are explained by the self-focusing effect. A method is introduced to shape the beam profile of femtosecond amplified laser pulse by choice suitable fiber, therefore it can be used to improve the beam quality.

**Key words:** Femtosecond laser; Large-core optical fiber; Spatial shaping; Self-focusing



**WANG Xiang-lin** was born in 1979. He is a M.S. degree candidate at School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University. His current research interests focus on femtosecond laser pulse Carrier-envelope offset phase control and compressing femtosecond laser pulse.