

# 空心毛细管束缚高压气体成丝的光谱演变<sup>\*</sup>

曹士英<sup>1)</sup> 王 颖<sup>1)</sup> 张志刚<sup>1)†</sup> 柴 路<sup>1)</sup> 王清月<sup>1)</sup> 杨建军<sup>3)</sup> 朱晓农<sup>3)</sup>

1) 天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

2) 北京大学信息科学技术学院, 量子信息与测量教育部重点实验室, 北京 100871)

3) 南开大学现代光学研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

(2005 年 11 月 20 日收到, 2005 年 12 月 15 日收到修改稿)

对高能飞秒脉冲在充氩气玻璃管中自由成丝以及有空心毛细管束缚成丝两种情况下, 输入脉冲能量和空心毛细管所处成丝位置等实验参数对光谱展宽的影响进行了系统的实验研究. 结果表明采用空心毛细管束缚成丝, 可以使被展宽光谱在短波方向上的强度获得改善. 这为进一步脉冲压缩产生高能单周期飞秒脉冲打下基础.

关键词: 毛细管, 成丝, 束缚, 光谱展宽

PACC: 4280W, 4265J, 4255H

## 1. 引 言

高能、单周期飞秒脉冲作为自然界超快过程研究的重要手段受到了越来越广泛的关注. 利用高能、单周期飞秒脉冲不仅有助于实现控制化学反应进程、削弱粒子加速场并产生高能质子束, 还可以获得具有极高空间和时间分辨率的相干软 X 射线以及产生极紫外阿秒脉冲. 在其他领域中, 对具有更高时间分辨率, 更宽光谱脉冲的需求促进了脉冲宽度向越来越窄, 至单周期方向的发展.

目前这些领域研究的最主要障碍是高能单周期飞秒脉冲的获得<sup>[1]</sup>. 通常的技术方案为通过充有惰性气体的空心光纤产生超宽带光谱, 并对脉冲的位相进行精确补偿来获取周期量级脉冲. 尽管不同研究小组利用该方案, 相继实现了  $4.5\text{fs}$ <sup>[2]</sup>,  $3.8\text{fs}$ <sup>[3]</sup>,  $3.4\text{fs}$ <sup>[4]</sup> 和  $2.8\text{fs}$ <sup>[5]</sup> 的脉冲输出. 但由于光在空心光纤中传播损耗大<sup>[6]</sup>, 并且脉冲峰值功率必须小于气体的自聚焦阈值和多光子电离阈值<sup>[2-7]</sup>, 因此压缩后的脉冲能量仅仅在  $0.5\mu\text{J}$ — $15\mu\text{J}$  之间. 最近, 成丝现象以其能够容纳较高能量作为展宽光谱的新方法得到重视. 2004 年, Keller 等人采用低压惰性气体成单丝的方法获得了  $550\text{nm}$ — $975\text{nm}$  的光谱展宽, 并初步将脉冲压缩到  $5.7\text{fs}$ ,  $0.38\text{mJ}$ <sup>[8]</sup>. 最近, 他们又取得

了  $5.1\text{fs}$ ,  $0.18\text{mJ}$  的最新结果<sup>[9]</sup>. 但成丝经过一段距离后就会发散, 而且在高能下很容易产生多丝现象造成能量分布的不稳定<sup>[10-12]</sup>.

成丝现象是强激光脉冲在介质中传播时的自聚焦和电离造成的自散焦平衡的结果. 主要由两种物理效应产生: 一是与介质折射系数有关的自聚焦效应, 二是气体电离时产生的自散焦效应. 当自聚焦与自散焦效应相互平衡时, 脉冲的能量被束缚在一个很窄的通道内传播, 就形成了细丝效应. 对于高斯脉冲, 自聚焦的临界功率可以表示为  $P_{\text{cr}} = \lambda_0^2 / 2\pi\eta_2 p$ , 其中  $\eta_2 = n_2/p$ ,  $P_{\text{cr}}$  为临界功率,  $\lambda_0$  为中心波长,  $n_2$  为非线性折射率,  $p$  为惰性气体压强,  $\eta_2$  为气体非线性折射率与压强的比值. 对于氩气,  $\eta_2$  值为  $9.8 \times 10^{-29} \text{m}^2/\text{WPa}$ . 当脉冲的峰值功率  $P_0$  满足  $P_0/P_{\text{cr}} > 0.5$  时, 即产生自聚焦现象. 在成丝过程中, 脉冲的光谱也被强烈的非线性效应展宽.

本文提出将空心光纤技术与成丝技术相结合, 采用  $400\mu\text{m}$  大芯径空心毛细管对成丝进行束缚的方法, 使得在光谱展宽的同时, 输出能量更加集中. 实验分析了自由成丝状态和有空心毛细管束缚成丝状态下的光谱差别, 并系统研究了自由成丝状态下, 输入脉冲能量对成丝光谱展宽的影响, 以及有空心毛细管束缚时, 输入脉冲能量、空心毛细管所处成丝

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金重大项目(批准号: 60490280)和国家自然科学基金(批准号: 60578007)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: zhgzhang@pku.edu.cn

位置等实验参数对光谱展宽的影响.实验表明采用空心毛细管束缚成丝,可以使展宽光谱在短波方向上的强度获得改善.

## 2. 实验装置

实验采用光谱物理公司的 Spitfire 50fs-1K-HP 系统,输出光的中心波长为 794nm、脉冲宽度 50fs、重复频率为 1kHz.实验中最大单脉冲能量为 1.3mJ,峰值功率为 26GW.长度为 11cm,芯径 400 $\mu\text{m}$  的空心毛细管固定于铝制 V 形槽,V 形槽置于密闭玻璃管中.空心毛细管与密闭玻璃管共轴、中心等高,以方便光路调整.铝制 V 形槽底对称镶嵌少量铁块,在密闭条件下可以利用磁铁对空心毛细管在密闭玻璃管中的位置进行调整.整个密闭玻璃管充氩气作为非线性介质,玻璃管长度为 60cm.密闭玻璃管两端采用厚度为 500 $\mu\text{m}$  石英片密封,石英片通光孔径 20mm,足以使光斑完全通过不造成滤波.本实验中,石英片对入射脉冲的色散影响可以忽略不计.密封系统设有进气口和出气口用于调整管内气体压强.

利用曲率半径为 2000mm 的平凹反射镜进行聚焦,将入射激光耦合进入密闭气体,焦点距离石英片入射窗 15cm.既可以避免焦点过分靠近入射窗对石英片造成的损伤,又可以留有足够的长度观察空心毛细管对成丝的束缚.聚焦镜采用反射聚焦,可以有效减小聚焦镜带来的色散对光脉冲的影响.调整空心毛细管在密闭的玻璃管中的位置,使得入射激光垂直通过空心毛细管的内部,以束缚成丝状态下的单丝结构,并进一步拓展光谱.功率计和光谱仪分别置于入射窗前和出射窗后以检测密闭系统的输出效率和光谱变化.

## 3. 实验结果及分析

在无空心毛细管束缚的条件下,我们研究了在输入脉冲宽度恒定时,脉冲能量对光谱展宽的影响.实验中入射脉冲能量分别选取 0.4mJ、0.7mJ、1.0mJ 和 1.3mJ;气体气压分别选取  $1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $3.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ .图 1(a)~(d)分别表示在 0.4mJ、0.7mJ、1.0mJ、1.3mJ 下,气体压强对光谱展宽的影响.当输入脉冲能量恒定时,光谱宽度随着气体压强的增加而增加,同时短波方向拓展超过长波方向.在低能量(0.4mJ)入射时,气压对光谱展

宽的影响不是很明显,而随着入射脉冲能量的增加,气压对光谱展宽的影响逐渐显现出来,并且在短波方向上更加明显.而且在较高入射脉冲能量下(如 1.3mJ),短波方向拓展的光谱在高压强下呈现振荡.这说明在高能量、高压强的条件下,气体出现电离,离子化光谱展宽更加明显<sup>[9]</sup>.

成丝的产生主要由脉冲在气体中的非线性效应所决定,而在脉冲宽度恒定的条件下,脉冲能量和气体压强将起到决定性作用.气体的非线性效应与脉冲能量和气体压强成正比.这样在高能量、高压强的条件下,强光在气体中的成丝很难保持单丝效应.随着压强的增加,成丝将逐渐出现分裂,产生多丝<sup>[11,12]</sup>.多丝的发生使得单丝状态下的能量重新获得分布,形成能量竞争,造成不稳定状态.

为了克服高能量、高压强条件下,气体成丝过程中多丝及单丝不稳定现象的发生,我们在气体成丝发生后的一段距离内利用空心毛细管对细丝进行束缚.本实验采用长度为 11cm,芯径为 400 $\mu\text{m}$  的空心毛细管进行成丝束缚.空心毛细管的长度远小于通常的空心光纤 30cm—60cm 的长度.由于空心毛细管的芯径远大于细丝直径,因此细丝可以畅通无阻地通过空心毛细管,而多丝及单丝不稳定所形成的发散将被空心毛细管管壁反射或损耗掉.在 1.3mJ 入射下,有无空心毛细管束缚成丝时的光谱展宽如图 2 所示.从图中可以看出,在较高能量入射时,加入空心毛细管束缚成丝后,光谱在短波和长波方向的延伸变化并不明显,但相对自由成丝状态来说,加入空心毛细管束缚后,短波分量展宽的强度有所提高.因此可预期通过合理的参数配置,可以在短波方向获得平滑光谱.

为此,我们在成丝稳定的条件下,通过调节空心毛细管的位置,从而观察光谱展宽的变化.图 3 分别为空心毛细管前端距离细丝起点不同距离时的光谱变化.从图中可以看出,随着空心毛细管远离成丝起点,光谱在短波方向的强度下降明显大于长波方向.这说明距离成丝起点近的位置对成丝进行束缚可以更好地提升短波分量的强度.

为了进一步考察在空心毛细管束缚成丝的状态下,输入脉冲能量对光谱展宽的影响,我们固定空心毛细管的位置,此时输入脉冲能量对光谱展宽的影响如图 4 所示.从图中可以看出,在空心毛细管位置固定的情况下,随着入射脉冲能量的增加,光谱在向短波拓展的同时强度明显增加.在 1.3mJ 入射时,

出现了双峰结构,而长波方向的变化却不很明显.

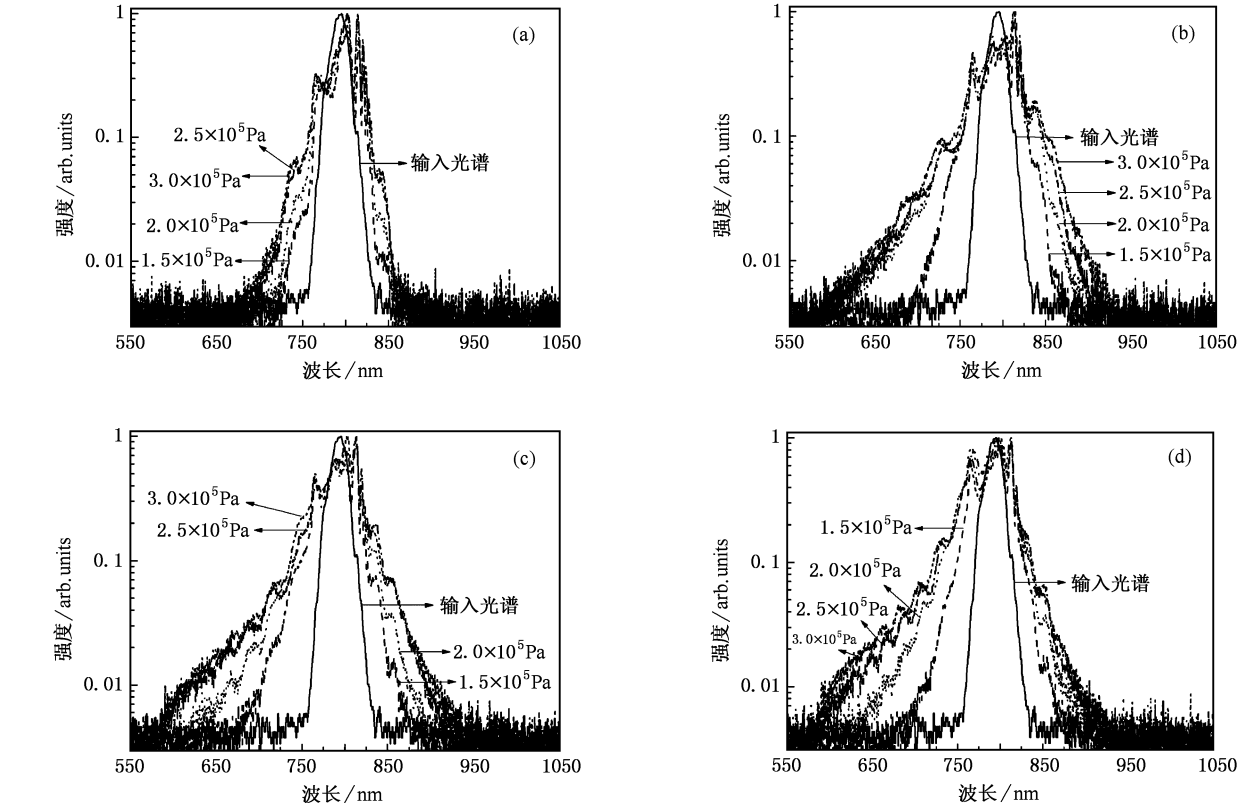


图1 不同入射脉冲能量下,激光在氩气中成丝引起的光谱展宽随气体压强的变化.(a)–(d)分别为0.4mJ,0.7mJ,1.0mJ和1.3mJ下,光谱展宽随气体压强的变化

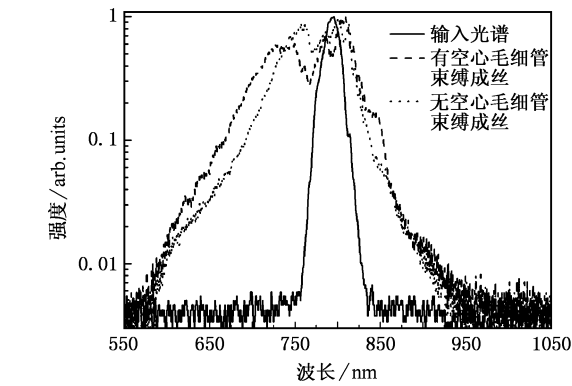


图2 成丝状态下,有无空心毛细管束缚成丝时的光谱差别

传统的空心光纤技术在入射能量上尽量避免了自聚焦及多光子电离效应的发生,致使脉冲峰值功率不能超过自聚焦阈值以及多光子电离阈值,因此入射脉冲能量往往只有0.5mJ左右,同时传统的空心光纤技术所选用的光纤芯径一般都在50 $\mu\text{m}$ —200 $\mu\text{m}$ 之间,而光纤的衰减常数与 $\lambda^2/a^3$ 成正比.这

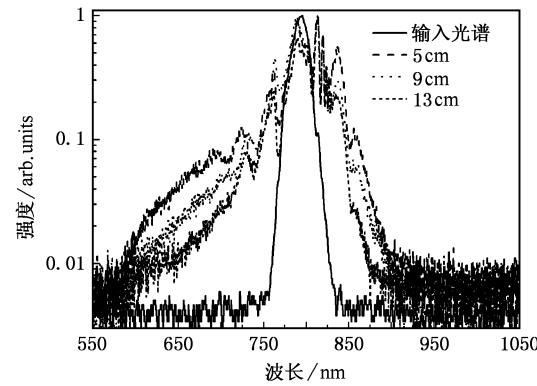


图3 空心毛细管在成丝的不同位置束缚时的光谱变化

两个因素限制了空心光纤技术在高能量脉冲光谱展宽上的应用.当入射峰值功率高于自聚焦阈值以及多光子电离阈值,使得自聚焦和自散焦效应相平衡时即形成细丝现象,尽管成丝现象大大提高了脉冲能量的容忍度,但过高的脉冲能量往往造成单丝的不稳定以及多丝现象的发生.而将空心光纤技术与

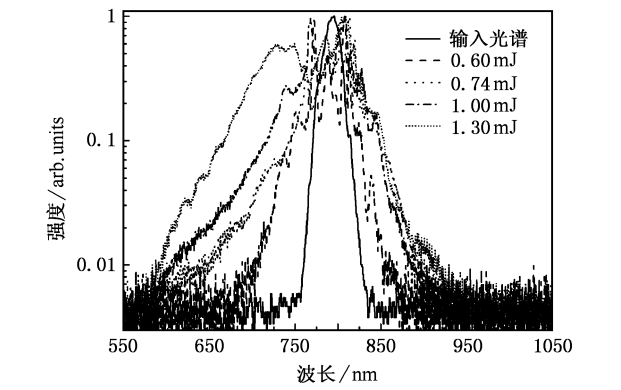


图 4 空心毛细管最前端距离成丝起点 3cm 时,光谱展宽随入射功率的变化

成丝技术相结合,在高能量脉冲入射下,采用大纤芯(400 $\mu\text{m}$ )空心光纤对成丝进行束缚,可以有效地提高入射脉冲能量并保持单丝状态的稳定性,这对进一步获取高能量单周期脉冲提供了技术支持。

4. 结 论

本文提出将空心光纤技术与成丝技术相结合,采用 400 $\mu\text{m}$  大芯径空心毛细管对成丝进行束缚的方法,使得在光谱展宽的同时,输出能量更加集中.实验分析了自由成丝状态和有空心毛细管束缚成丝状态下的光谱差别,并系统研究了自由成丝状态下,输入脉冲能量、气体气压对成丝光谱展宽的影响,以及有空心毛细管束缚时,输入脉冲能量、空心毛细管所处成丝位置对光谱展宽的影响.实验表明采用空心毛细管束缚成丝,可以使展宽光谱在短波方向上的强度获得改善.这为进一步脉冲压缩产生高能量单周期飞秒脉冲打下基础.此外,空心光纤技术与成丝技术相结合的相关研究以及空心毛细管芯径、长度等参数的进一步优化对光谱展宽影响的相关研究尚在进行中。

[ 1 ] Keller U 2003 *Nature* **424** 831

[ 2 ] Nisoli M , Silvestri S De , Svelto O *et al* 1997 *Opt. Lett.* **22** 522

[ 3 ] Schenkel B , Biegert J , Keller U *et al* 2003 *Opt. Lett.* **28** 1987

[ 4 ] Yamane K , Zhang Z , Oka K *et al* 2003 *Opt. Lett.* **28** 2258

[ 5 ] Yamane K , Kito T , Morita R *et al* 2004 in Conf. *Lasers and Electro-Optics* ( Optical Society of America , Washington , DC , 2004 ) , post deadline paper PDC2

[ 6 ] Song Z M , Pang D Q , Zhang Z G *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2769 ( in Chinese )[ 宋振明、庞冬青、张志刚等 2005 物理学报 **54** 2769 ]

[ 7 ] Nisoli M , Stagira S , Silvestri S De *et al* 1997 *Appl. Phys. B* **65** 189

[ 8 ] Hauri C P , Kornelis W , Helbing F W *et al* 2004 *Appl. Phys. B* **79** 673

[ 9 ] Hauri C P , Guandalini A , Eckle P *et al* 2005 *Opt. Express* **13** 7541

[ 10 ] Duan Z L , Chen J P , Fang Z B *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 473 ( in Chinese )[ 段作梁、陈建平、方宗豹等 2004 物理学报 **54** 473 ]

[ 11 ] Li Y T , Zhang J , Chen L M *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 204 ( in Chinese )[ 李玉同、张 杰、陈黎明等 2001 物理学报 **50** 204 ]

[ 12 ] Zhang J T , Liu S F , Hu B L 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1668 ( in Chinese )[ 张家泰、刘松芬、胡北来 2003 物理学报 **52** 1668 ]

[ 13 ] Babin A A , Kartashov D V , Kiselev A M *et al* 2002 *Appl. Phys. B* **75** 509

# Spectrum evolution of filamentation restricted by capillary in high pressure gas<sup>\*</sup>

Cao Shi-Ying<sup>1)</sup> Wang Ying<sup>1)</sup> Zhang Zhi-Gang<sup>1)†</sup> Chai Lu<sup>1)</sup> Wang Qing-Yue<sup>1)</sup> Yang Jian-Jun<sup>3)</sup> Zhu Xiao-Nong<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> *Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Ministry of Education, China;*

*Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)*

<sup>2)</sup> *Institute of Quantum Electronics, School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)*

<sup>3)</sup> *Institute of Modern Optics, Nankai University, Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, EMC, Tianjin 300071, China)*

( Received 20 November 2005 ; revised manuscript received 15 December 2005 )

## Abstract

Filamentation with and without capillary restriction by focusing intense femtosecond pulses into the Argon-filled tube was experimentally studied in this paper. The results showed that the width of the broadened spectrum was affected by the input pulse energy and position of the capillary with respect to the filament. It was also indicated that the intensity of the short wavelength region of the spectrum was enhanced by the capillary restriction, which would be favorable to obtaining intense, monocycle pulses after compression.

**Keywords :** capillary, filamentation, restriction, spectrum broadening

**PACC :** 4280W, 4265J, 4255H

<sup>\*</sup> Project supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60490280 ) and the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60578007 ).

<sup>†</sup> E-mail : zhgzhang@pku.edu.cn