

# 束缚高压强气体中成丝的空心毛细管芯径 对光谱展宽的影响\*

曹士英<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)

(2006 年 1 月 6 日收到, 2006 年 3 月 6 日收到修改稿)

采用空心毛细管束缚强飞秒激光脉冲在高压强气体中产生的成丝时, 空心毛细管芯径对光谱展宽有着重要的影响. 研究了空心毛细管束缚成丝时, 空心毛细管芯径对光谱展宽的影响. 结果表明, 在低能量(0.4mJ)入射时, 光谱展宽主要由成丝引起, 而在高能量(1.3mJ)入射时, 空心毛细管起到光波导效应参与了光谱展宽. 当能量介于二者之间时, 采用芯径较小的空心毛细管, 可以获得更好的光谱展宽效果.

关键词: 毛细管, 成丝, 束缚, 光谱展宽

PACC: 4280W, 4265J, 4255H

## 1. 引言

高能量、单周期光脉冲是指脉冲能量在毫焦、亚毫焦量级, 脉冲宽度小于载波的两个光学周期, 在可见光域, 即小于  $5fs$ ( $800nm$  波长中心)的单周期脉宽为  $2.7fs$  的光脉冲. 高能量、单周期飞秒脉冲作为自然界中超快过程研究的重要手段引起了越来越广泛的关注, 在许多物理领域中发挥着越来越重要的作用.

目前单周期飞秒脉冲的获得主要依靠通过充有惰性气体的空心光纤或低压惰性气体成丝技术产生超宽带光谱, 并对脉冲的位相进行精确补偿来获取周期量级脉冲<sup>[1-5]</sup>. 但传统的空心光纤芯径较小, 约为  $50-200\mu m$ , 而光纤的衰减常数与  $\lambda^2/a^3$  成正比, 因此能量衰减较快. 同时为了避免成丝以及电离的发生, 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, 这给光纤的使用带来了所允许的传输能量的限制, 因此压缩后的脉冲能量仅仅在  $0.5-15\mu J$  之间. 2004 年, Hauri 等人<sup>[6]</sup>采用低压惰性气体中成单丝的方法, 初步将脉冲压缩到  $5.7fs$ ,  $0.38mJ$ <sup>[6]</sup>. 最近他们又取得了  $5.1fs$ ,  $0.18mJ$

的最新结果<sup>[7]</sup>. 但在成丝技术中, 伴随着压强的提高, 激光的自聚焦阈值反而降低, 因此在高能量和高压强气体中, 很容易产生多丝造成能量分布的不稳定<sup>[8-12]</sup>.

本文采用空心毛细管束缚强飞秒激光脉冲在高压强惰性气体中产生的成丝. 实验研究了  $300\mu m$  和  $400\mu m$  两种芯径空心毛细管在束缚强飞秒激光脉冲在高压强气体中产生的成丝时, 随入射脉冲能量的增加, 芯径对光谱展宽的影响.

## 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  $26GW$ . 不同芯径的空心毛细管固定于铝制 V 型槽, V 型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. 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  $500\mu m$  石英片密封, 石英片通光孔径  $20mm$ . 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

\* 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.

† 通讯联系人. E-mail: zhgzhang@pku.edu.cn

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.

### 3. 实验结果及分析

成丝的发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.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.图 1 给出了不同气压下,成丝的能量透过曲线.从图中我们可以看出,随着气压的增大,成丝的能量透过率逐渐降低,并且这一规律在高能量入射下更加明显.

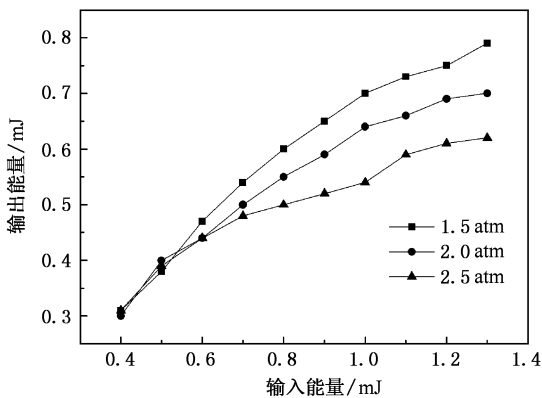


图 1 不同气压下成丝透过射曲线

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毛细管对细丝进行束缚.本实验中我们分别采用芯径为  $300\mu\text{m}$  和  $400\mu\text{m}$ ,长度均为 11cm 的空心毛细管进行成丝束缚.空心毛细管前端距离成丝起点 4cm.在如此高能量入射时,过分靠近焦点空心毛细管端面很容易被打坏,而过分远离焦点,往往不易耦合进入空心毛细管.

为了比较不同芯径空心毛细管对光谱展宽的影响,我们分别在 0.4, 0.7, 1.0 和 1.3mJ 的能量入射下,观察  $300\mu\text{m}$  和  $400\mu\text{m}$  两种芯径空心毛细管的光谱展宽效果,如图 2 所示.

从图中可知,在低入射能量下,芯径对光谱展宽的影响并不明显;在高入射能量下,光谱展宽差别也不是很大.分析表明在低能量范围内,细丝直径大

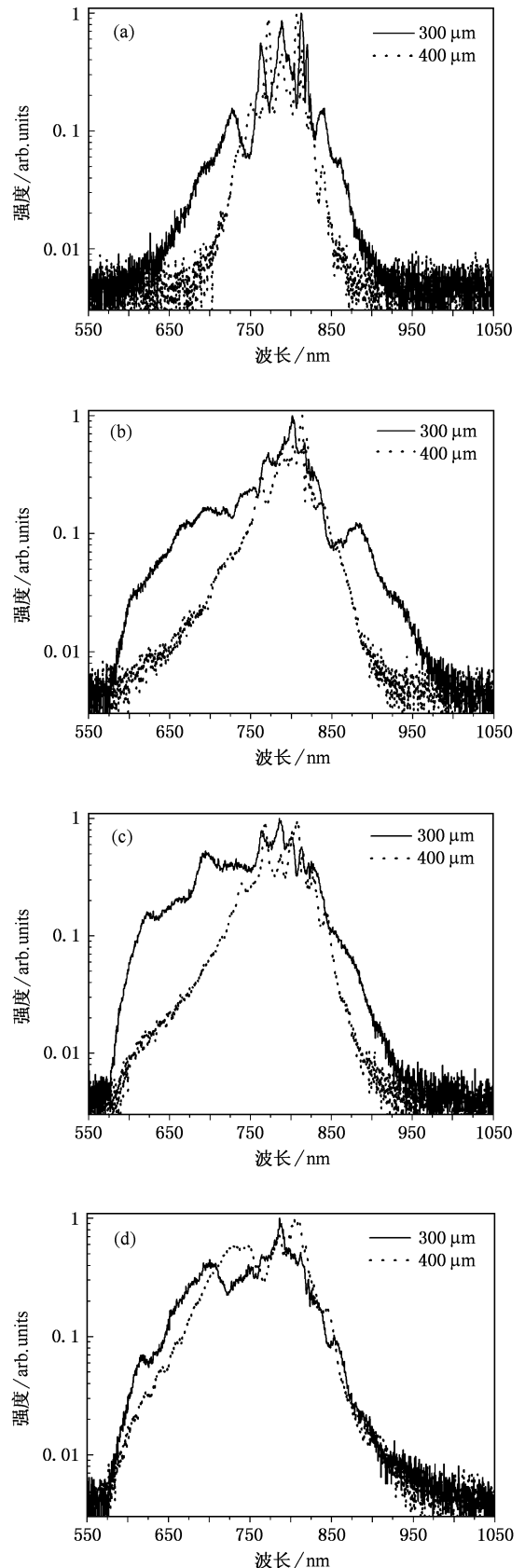


图 2 不同芯径空心毛细管随入射脉冲能量增加对光谱展宽的影响 (a)-(d)入射脉冲能量分别为 0.4, 0.7, 1.0, 1.3mJ

约为  $100\mu\text{m}$  而实验中采用的空心毛细管芯径为细丝直径的 3—4 倍。由于空心毛细管内部非线性作用长度相同,因此芯径对在其内部产生的非线性效应影响并不很大,导致对光谱的展宽影响亦不明显,此时光谱展宽主要由气体成丝光谱展宽决定。而在入射高能量下,当采用空心毛细管束缚成丝时,由于发散的细丝被毛细管壁加以反射传输,因此两种纤芯的空心毛细管的作用效果差别不大,作为光波导均参与了光谱展宽作用。实验观察也验证了这一点,在低入射能量下可以清楚地看到空心毛细管内细丝的通过,并且在输出石英窗后的接受屏上可以清楚地观察到良好的光斑模式,而单独提高入射脉冲能量至  $1.3\text{mJ}$ ,可以观察到成丝逐渐发散变成多丝,并且在接受屏上光斑呈现散斑状态。

当能量介于二者之间时,我们可以看到采用  $300\mu\text{m}$  芯径的空心毛细管所获得的光谱宽度更宽。这主要是因为当能量介于二者之间时,多丝的发散不足以达到  $400\mu\text{m}$  芯径毛细管的管壁,即采用  $400\mu\text{m}$  芯径毛细管束缚成丝时,光谱展宽仅仅由于成丝展宽所决定,因此从图中可以看出在这个能量范围内,采用  $400\mu\text{m}$  芯径毛细管光谱宽度和形状几乎保持不变。而采用  $300\mu\text{m}$  空心毛细管时,成丝的发散使得成丝的发散部分经过了管壁的反射,从而空心毛细管起到了光波导的作用,因此在这个能量

范围内光谱形状和宽度都有很大的改善。需要说明的是尽管采用  $300\mu\text{m}$  芯径的空心毛细管所获得的光谱宽度更宽,但输出光斑却很容易呈现散斑状态。这表明,尽管光谱进入空心毛细管后有所展宽,但空心毛细管对于多丝在我们实验的范围内没有太大的束缚作用。即脉冲若在进入毛细管前已经形成细丝分裂,那它并不会因为空心毛细管的作用而自动耦合为 EH<sub>11</sub> 模式。因此今后希望进一步优化选择空心毛细管的结构参数和气体参数以使得在高能量脉冲入射下,仍保持良好的光斑模式输出。

## 4. 结 论

本文实验研究了空心毛细管束缚高压强气体成丝时,空心毛细管芯径对光谱展宽的影响。结果表明,在低能量( $0.4\text{mJ}$ )入射时,光谱展宽主要由成丝引起,而在高能量( $1.3\text{mJ}$ )入射时,空心毛细管起到光波导效应参与了光谱展宽。当能量介于二者之间时,采用小芯径空心毛细管,可以获得更好的光谱展宽效果。同时证明伴随着入射脉冲能量的增加,成丝发散的角度逐渐增大。今后希望合理选择空心毛细管的结构参数和气体参数以使得在更高能量下,仍保持良好的光斑模式输出,为进一步压缩至单周期脉冲奠定基础。

- [ 1 ] Nisoli M, Silvestri S De, Svelto O *et al* 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 2793
- [ 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* ( Washington DC : Optical Society of America , 2004 ), post deadline paper PDC2
- [ 6 ] Hauri C P, Kornelis W, Helbing F W *et al* 2004 *Appl. Phys. B* **79** 673
- [ 7 ] Hauri C P, Guandalini A, Eckle P *et al* 2005 *Opt. Express* **13** 7541
- [ 8 ] Jin Z, Zhang J, Xu M H *et al* 2005 *Opt. Express* **13** 10424
- [ 9 ] 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 ]
- [ 10 ] Wen S C, Qian L J, Fan D Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1640 ( in Chinese ) [ 文双春、钱列加、范滇元 2003 物理学报 **52** 1640 ]
- [ 11 ] Duan Z L, Chen J P, Li R X *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 359
- [ 12 ] Wen S C, Fan D Y 2001 *Chin. Phys.* **10** 1032

# Dependence of spectrum broadening on inner diameter of capillary restricting the filamentation in high pressure gas<sup>\*</sup>

Cao Shi-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>

1) (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)

2) (Institute of Quantum Electronics, School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

3) (Institute of Modern Optics, Nankai University, Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, EMC, Tianjin 300071, China)

(Received 6 January 2006; revised manuscript received 6 March 2006)

## Abstract

Inner diameter of capillary has important effect on the spectrum broadening when used to restrict filamentation in high pressure gas. In this paper, the dependence of spectrum broadening on the inner diameter of the capillary was experimentally studied. The results showed that the spectrum broadening was mainly due to filamentation at low pulse energy (0.4mJ) and the guide effect of capillary at high pulse energy (1.3mJ). Between these pulse energy levels, the capillary with a smaller diameter can result in much better spectrum broadening.

**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> Corresponding author. E-mail: zhgzhang@pku.edu.cn