

# 激光啁啾对激光等离子体细丝传输的影响<sup>\*</sup>

王兆华<sup>1)2)</sup> 郝作强<sup>1)</sup> 张 杰<sup>1)</sup> 鲁 欣<sup>1)</sup> 金 展<sup>1)</sup> 仲佳勇<sup>1)2)</sup>  
刘运全<sup>1)</sup> 魏志义<sup>1)</sup> 张 杰<sup>1)†</sup> 赵 刚<sup>2)</sup>

1) (中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100080)

2) (中国科学院国家天文台, 北京 100012)

(2005 年 10 月 17 日收到; 2005 年 12 月 26 日收到修改稿)

对不同啁啾状态下的飞秒激光在大气中的成丝过程进行了研究. 实验研究发现成丝状况及其演化与初始激光脉冲的啁啾状态密切相关, 适当的负啁啾有利于激光的成丝传输. 当初始激光脉冲的啁啾量不断变大时, 激光脉冲在大气中的成丝起点位置会逐渐变远. 还研究了初始脉冲啁啾量对使用聚焦透镜产生的细丝的影响, 发现其与自由传输情况具有相似的变化规律.

关键词: 飞秒激光等离子体通道, 脉冲啁啾

PACC: 5235, 5240D

## 1. 引 言

超短超强激光在大气中传输时, 由于大气的非线性克尔效应使激光束产生自聚焦, 造成空气电离而形成等离子体, 这些等离子体又反过来对激光束产生散焦作用, 这两种作用的平衡会使激光在大气中产生很长的等离子体通道<sup>[1]</sup>, 这种等离子体通道就像金属导线一样, 具有导电性<sup>[2-9]</sup>; 另外, 等离子体通道也会辐射出很强的白光, 光谱范围覆盖了从紫外到远红外的宽广区域<sup>[7]</sup>. 由于它具有这些优越的特性, 超短超强激光在大气中形成的等离子体通道可以被应用于引导闪电、大气污染物探测、作为通讯天线等方面. 近年来, 针对如何控制等离子体通道的形成位置<sup>[8-10]</sup>、延长等离子体通道的寿命<sup>[11-13]</sup>、延长等离子体通道的长度等问题<sup>[8, 9]</sup>, 人们进行了广泛的研究, 相继提出了一些技术手段, 如控制激光束的发散角、控制激光束的形状<sup>[14-16]</sup>、提高激光脉冲的能量、改变脉冲的啁啾量<sup>[8]</sup>等.

和一般的色散介质一样, 大气本身也具有材料色散, 当光谱范围很宽的超短超强激光在大气中传输时, 不同光谱成分的光会在时间上产生前后移动, 出现啁啾现象, 从而降低激光的强度; 传输距离越

远, 啁啾越严重, 激光的峰值强度降低也越多, 当激光强度降低到大气电离的临界功率阈值以下时, 就不能产生等离子体通道, 使得等离子体通道传输不到更远的距离, 这对于引导闪电、远距离大气污染物探测是很不利的; 于是, 人们通过在激光脉冲进入大气之前预先加入一个负啁啾量, 用来弥补大气引入的正啁啾量, 这样就可以按照实际的需要来控制等离子体通道. 本文对激光脉冲的初始啁啾量对空气中激光成丝传输的影响进行了研究.

## 2. 实验原理

大气和大多数介质一样, 带有正的材料色散, 对于 30 fs 的窄脉冲、宽光谱飞秒激光脉冲而言, 它带来的二阶材料色散大约是  $2.0 \text{ fs}^2/\text{cm}$ <sup>[17]</sup>; 在这样的情况下, 激光脉冲在大气中传输一段距离以后, 大气色散就会给激光脉冲带来很大的啁啾量, 将其展宽到几十皮秒, 乃至几百皮秒, 从而使得激光脉冲的峰值功率降低; 如果我们能够预先引入一些啁啾量来进行补偿, 就可以使激光脉冲在更远的距离上形成通道.

在传统的 CPA 激光系统中, 先用一对光栅将飞秒量级的种子展宽到几百皮秒, 通过增益介质放大

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 60478047, 10374116, 10390161)和国家高技术激光核聚变主题资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: jzhang@aphy.iphy.ac.cn

后,再用一对共轭光栅将几百皮秒的放大激光压缩到飞秒量级,在压缩的过程中,我们可以控制压缩光栅对的距离来改变激光脉冲的色散量.通常来说,展宽器中使用的光栅对引入的是正色散,压缩器中使用的光栅对是负色散;当负色散和正色散完全相同时,激光脉冲就是零啁啾脉冲;当压缩器中的光栅对的距离偏小时,压缩过程中带来的负色散就会小于展宽过程中带来的正色散,输出的激光脉冲就是正啁啾脉冲;当压缩器中的光栅对的距离偏大时,压缩过程中带来的负色散就会大于展宽过程中带来的正色散,输出的激光脉冲就是负啁啾脉冲.

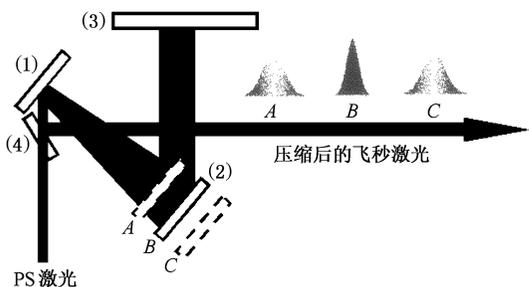


图 1 使用压缩器改变激光脉冲啁啾状态的原理示意图

我们实验室的激光系统所采用的压缩器结构如图 1 所示,1 和 2 为压缩光栅,3 为一对成 90° 夹角的反射镜,4 为 45° 全反射镜.移动光栅 2 就可以改变光栅对之间的距离,相应地改变压缩脉冲的状态,当压缩器将色散完全补偿时(B 位置),输出的激光脉冲为零啁啾脉冲;当光栅 2 移动到 A 位置时,输出

的激光脉冲带有正的材料色散,成为正啁啾脉冲;当光栅 2 移动到 C 位置时,输出的激光脉冲带有负的材料色散,成为负啁啾脉冲.这样,就可以通过控制光栅对之间的距离来控制激光脉冲的啁啾特性,同时使用单次自相关仪来监测激光脉冲的压缩情况.

### 3. 实验和结果分析

我们使用的激光装置是中科院光物理实验室的极光 II 激光系统.该系统输出激光脉冲单脉冲能量最大为 640 mJ,脉宽为 30 fs,中心波长为 800 nm,工作频率为 10 Hz,初始激光束腰半径  $\omega_0$  为 1.5 cm.我们实验中所用的激光能量为 60 mJ.首先,让激光在大气中自由传输,用 CCD 相机监测激光光斑的强度分布,以判断激光是否成丝;调节压缩器,并用单次自相关仪监测激光的脉冲宽度,使输出的激光脉冲处于零啁啾状态,用 CCD 相机监测激光在不同传输距离上的光强分布,实验结果如图 2 所示.

从图 2 中可以看处,在激光传输到 2 m 的距离上时,激光还没有成丝;传输到 28.8 m 距离上时,光斑中开始出现很强的亮点,激光开始成丝;随着传输距离的增加,成丝得到进一步加强,并逐渐形成多个细丝,如在 81 m 的传输距离上,形成了四个明亮的细丝.随后,我们改变了激光脉冲的啁啾状态,来观察成丝起点位置的变化,实验结果如图 3 所示.

改变激光的啁啾状态时,用单次自相关仪监测

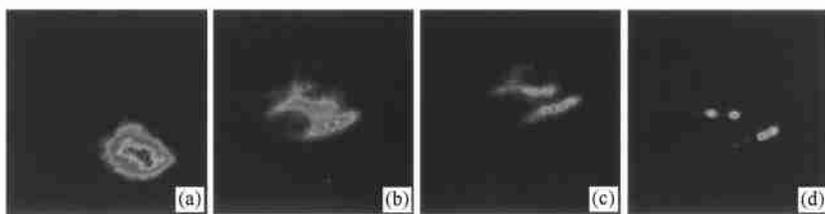


图 2 零啁啾状态的激光脉冲在不同传输距离上的光强分布(激光能量为 60 mJ; (a)–(d) 分别为 2, 28.8, 38.7, 81 m)

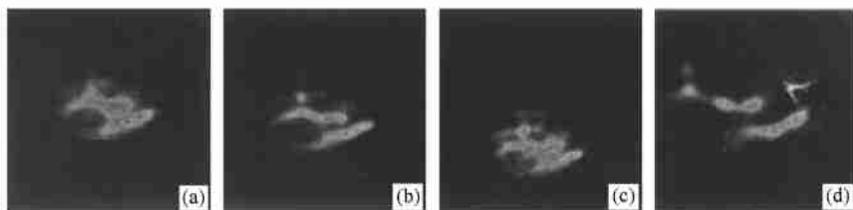


图 3 不同啁啾状态下的细丝起点位置 (a)和(b)为正啁啾状态,(c)为零啁啾状态,(d)为负啁啾状态((a)28.8 m, 277 fs; (b)35.5 m, 123 fs; (c)21.6 m, 79 fs; (d)92.3 m, 560 fs)

脉宽的变化,脉宽越长,激光脉冲携带的啁啾量就越多;图 3(a)和(b)为正啁啾状态,相对于(c)的零啁啾状态而言,激光成丝的位置偏后了一段距离;(d)为负啁啾状态,它携带更多的啁啾量,在这种状态下,激光成丝的位置比零啁啾状态靠后的更多,而且啁啾量越多,成丝位置就越靠后。

我们又改变了激光的单脉冲能量来观察细丝的变化,结果如图 4 所示。

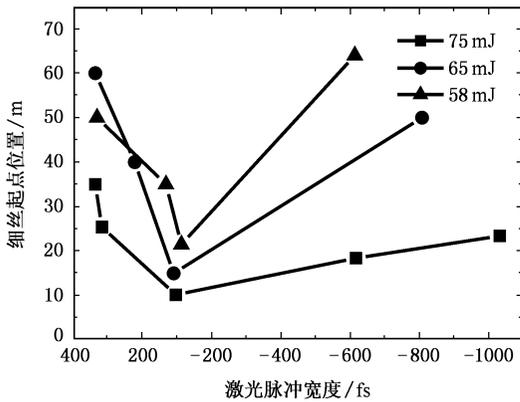


图 4 细丝起点位置随激光脉冲能量和脉冲宽度的变化情况

在图 4 中,横坐标表示激光的脉冲宽度,用来衡量脉冲的啁啾变化,从左到右依次表示正啁啾、零啁啾和负啁啾状态,激光脉冲在图中大约 70 fs 的位置上为零啁啾状态,70 fs 的左侧为正啁啾状态,70 fs 的右侧为负啁啾状态;不同的曲线代表不同的能量状态.从中可以看出,在同样的脉冲宽度下,激光脉冲的能量越高,成丝的位置越靠前;而且,在同样的脉冲能量下,随着激光脉冲由正啁啾到负啁啾的变化,成丝位置逐渐靠前,达到零啁啾状态后成丝位置又逐渐远离,在更远的位置上继续成丝。

为了观察不同啁啾状态下的细丝长度的变化,我们采用焦距为 11 m 的熔石英透镜来辅助聚焦,激光的单脉冲能量为 60 mJ,改变激光脉冲的啁啾状态,使用声学测量方法进行测量<sup>[18-21]</sup>,测量结果如图 5 所示。

在图 5 中,横坐标表示测量点距离聚焦透镜的位置,横坐标表示声音信号的幅度,代表激光成丝的强弱,不同的曲线表示不同的啁啾状态,70 fs 的曲线为零啁啾状态,257 fs 和 143 fs 的曲线为正啁啾状态,238 fs 和 984 fs 的曲线为负啁啾状态.从中再次可以看出,改变激光脉冲的啁啾状态时,激光成丝的起始位置明显发生了改变,带啁啾的激光脉冲的成丝位置比起零啁啾脉冲来要明显靠后,而且声学测

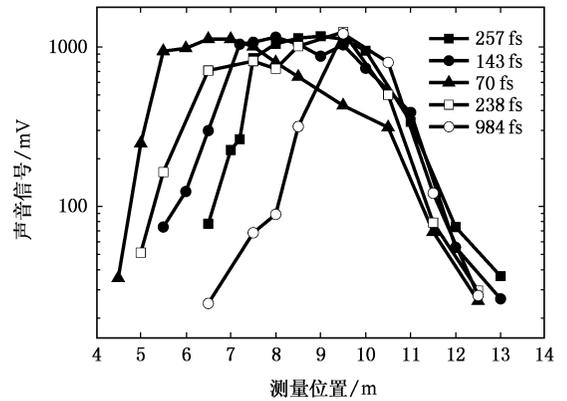


图 5 声学测量方法得到的不同啁啾状态下的细丝长度

量方法显示的等离子体通道的长度也明显变短。

总的来说,脉冲的啁啾特性对激光大气成丝传输的影响主要体现在两个方面<sup>[22, 23]</sup>:一是脉冲的啁啾特性对激光脉冲峰值功率的影响,带啁啾的激光脉冲的宽度要比零啁啾的激光宽,相应地,在同样的能量条件下,其峰值功率要比零啁啾时低一些,在大气中的自聚焦效应也要小,激光成丝的位置就相应的偏后,从图 3 和图 4 中都能够看到这种变化.另一方面是大气材料色散对激光脉冲啁啾特性的影响,由于大气具有正的材料色散,它会给激光脉冲附加上一个正的啁啾量,对于带有正啁啾和零啁啾的激光脉冲来说,随着激光传输距离的增加,激光脉冲携带的啁啾量也随之增加,激光的脉冲宽度变宽,造成激光脉冲的峰值功率降低,当传输到一定距离时,激光脉冲的峰值功率会低于激光成丝的临界功率密度,这时激光在大气中就不能再形成等离子体通道;然而,对于带有负啁啾的激光脉冲来说,随着激光传输距离的增加,大气色散引入的正啁啾会补偿激光脉冲携带的负啁啾,使其携带的啁啾量减少,激光的脉冲宽度变窄,使得激光脉冲的峰值功率增加,当其超过临界功率密度时,就可以形成等离子体通道,而且,激光脉冲携带的负啁啾量越多,补偿色散所需要的距离就越长,激光脉冲就可以在更远的距离上形成等离子体通道.由此可以看出,带有负啁啾的脉冲对于激光在大气中成丝的远距离传输具有重要意义。

从上面的实验结果以及相应的分析中可以看出,由于大气本身材料色散的存在,飞秒激光的啁啾状态对于强激光脉冲在大气中形成的细丝(即电离通道)有很大的影响,啁啾状态的改变影响了激光脉冲在大气中的成丝位置,控制激光脉冲的啁啾状态

可以使其在更远的距离上成丝。

## 4. 结 论

本文对不同啁啾状态下的飞秒激光在大气中的成丝状况进行了系统的研究, 改变脉冲的啁啾状况来观察细丝的变化。在零啁啾状态时, 随着传输距离的增加, 飞秒激光在大气中逐渐形成细丝并传输到很远的距离; 改变脉冲的啁啾状态, 激光在大气中的成丝状况就发生了改变, 带有啁啾的激光脉冲在大气中成丝时, 激光的成丝位置比零啁啾状态时明显

靠后, 并且激光脉冲携带的啁啾量越大, 成丝位置越靠后, 进一步的分析发现, 带有负啁啾状态的激光脉冲比带有正啁啾状态的激光脉冲更有利于在远距离上成丝; 此外, 还采用透镜辅助聚焦的方法来观察不同啁啾状态下细丝长度的变化, 传统的声学测量方法显示: 激光脉冲啁啾的变化只是改变了细丝的起点位置, 并没有使细丝本身传输的更长。

通过对啁啾脉冲在大气中成丝现象的研究, 使我们理解了脉冲的啁啾状况对细丝的形成和传输的影响, 这对于有效的控制细丝的形成与传输具有重要意义, 对于细丝的现实应用具有重要的实际意义。

- 
- [ 1 ] Braun A, Kom G, Liu X *et al* 1995 *Opt. Lett.* **20** 73
- [ 2 ] Tzortzakis S, Tzortzakis S, Franco M A *et al* 1999 *Phys. Rev. E* **60** R3505
- [ 3 ] Schillinger H, Sauerbrey R 1999 *Appl. Phys. B* **68** 753
- [ 4 ] Proulx A, Talebpour A, Petit S *et al* 2000 *Opt. Comm.* **174** 305
- [ 5 ] Yang H, Zhang J, Yu W *et al* 2001 *Phys. Rev. E* **65** 0164061-5
- [ 6 ] Yang H, Zhang J, Li Y T *et al* 2002 *Phys. Rev. E* **66** 0164061-4
- [ 7 ] Kasparian J, Sauerbrey R, Mondelain D *et al* 2000 *Opt. Lett.* **25** 1397
- [ 8 ] Méchain G, Amico C D, André Y B *et al* 2005 *Opt. Comm.* **247** 171
- [ 9 ] Wille H, Rodriguez M, Kasparian J *et al* 2002 *Eur. Phys. J. AP* **20** 183
- [ 10 ] Jin Z, Zhang J, Yuan X H *et al* 2005 *Optical Express* **30** 534
- [ 11 ] Zhao X M, Diels J C, Wang C Y *et al* 1995 *IEEE J. Quantum Electron.* **31** 599
- [ 12 ] Hao Z Q, Zhang J, Li Y T *et al* 2005 *Appl. Phys. B* **80** 627
- [ 13 ] Yang H, Zhang J, Zhang Q J *et al* 2005 *Opt. Lett.* **30** 534
- [ 14 ] Dubietis A, Tamosauskas G, Fibich G *et al* 2004 *Opt. Lett.* **29** 1126
- [ 15 ] Fibich G, Ilan B 2004 *Opt. Lett.* **26** 840
- [ 16 ] Fibich G, Eisenmann S, Ilan B *et al* 2004 *Opt. Lett.* **29** 1772
- [ 17 ] Mlejnek M, Wright E M, Moloney J V *et al* 1998 *Opt. Lett.* **23** 382
- [ 18 ] Yu J, Mondelain D, Kasparian J *et al* 2003 *Appl Opt.* **42** 7117
- [ 19 ] Hao Z Q, Yu J, Zhang J *et al* 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 636
- [ 20 ] Hao Z Q, Yu J, Zhang J *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1290 (in Chinese) [ 郝作强、俞进、张杰等 物理学报 2005 **54** 1290 ]
- [ 21 ] Hao Z Q, Yu J, Zhang J *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **54** 1290 (in Chinese) [ 郝作强、俞进、张杰等 物理学报 2005 **54** 1290 ]
- [ 22 ] 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 **53** 473 ]
- [ 23 ] Chen X W, Liu J, Zhu Y *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3665 (in Chinese) [ 陈晓伟、刘军、朱毅等 2005 物理学报 **54** 3665 ]

# Effects of temporal chirp on laser filamentation in air<sup>\*</sup>

Wang Zhao-Hua<sup>1)2)</sup> Hao Zuo-Qiang<sup>1)</sup> Zhang Zhe<sup>1)</sup> Lu Xin<sup>1)</sup> Jin Zhan<sup>1)</sup> Zhong Jia-Yong<sup>1)2)</sup>  
Liu Yun-Quan<sup>1)</sup> Wei Zhi-Yi<sup>1)</sup> Zhang Jie<sup>1)†</sup> Zhao Gang<sup>2)</sup>

1) (*Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

2) (*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China*)

(Received 17 October 2005; revised manuscript received 26 December 2005)

## Abstract

Effect of the laser chirp on the laser filamentation is investigated. It is found that the chirp plays a crucial role in the formation of filamentation and its evolution. An initial negative chirp is favorable for long-distance propagation of filaments in air. As the chirp increases, the distance between the compressor and the position of the onset of filaments becomes larger. We also investigate the influence of initial chirp on the focusing laser pulses by a lens. It is found that there are the same tendency of filaments formed by lens and those in free propagation.

**Keywords:** plasma channel, chirp

**PACC:** 5235, 5240D

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60478047, 10374116, 10390161) and the National High Technology Inertial Confinement Fusion Foundation of China.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zhang@aphy.iphy.ac.cn