

文章编号 1004-924X(2013)03-0598-10

# 超快激光成丝现象的多丝控制

高 慧, 赵佳宇, 刘伟伟\*

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

**摘要:**研究了强场超快激光脉冲在光学介质中传输引起的成丝现象。考虑无序的多丝降低了激光光束的光斑质量,影响了光丝的能量分布,限制了超快激光脉冲成丝在实际中的应用,本文介绍了目前对高功率超快激光脉冲在介质中传输时产生的多丝进行控制的方法,并对各种方法进行了分析和比较。研究表明,目前对于多丝的控制主要采用振幅调制或相位调制等方法,已实现了减弱或消除强度微扰与传输介质折射率扰动,可避免多丝间相互联系及能量的竞争,使多丝按照预想的空间图样排布,达到多丝控制的目的。文章指出,目前多丝控制存在的主要问题是还不能准确完成对多丝长度及间距位置的精确控制。

**关键词:**超快激光脉冲;激光成丝;多丝控制

**中图分类号:**O437;TN241 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132103.0598

## Control of multiple filamentation induced by ultrafast laser pulses

GAO Hui, ZHAO Jia-yu, LIU Wei-wei\*

(Key Laboratory of Optical Information Science & Technology of the Ministry of Education,  
Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

\* Corresponding author, E-mail: liuweirwei@nankai.edu.cn

**Abstract:** The filamentation phenomena come from the propagation of intense ultrafast laser pulses in transparent optical media is explored. It shows that the irregular distribution of filaments will reduce the quality of laser beams, effect on its energy distribution and constitute a serious drawback in practical applications. Therefore, this paper studies how to control the multiple filaments come from higher power laser propagation in optical media and analyzes and compares these control methods. It points out that the amplitude modulation and phase modulation are the main methods to control the multiple filamentation currently, which can decrease or eliminate the intensity perturbation and refractive index perturbation of transmission media, and avoids the interrelation between the multiple filamentations and their energy competition so that the multiple filamentations can be arranged in a preconceived form. It summarized that the existing problems for multiple filamentation control are how to control the length and spacing of the filamentation precisely.

**Key words:** ultrafast laser pulse; laser filamentation; multiple filamentation control

## 1 引 言

当强超快激光在透明介质(如空气、水、玻璃)中传输时,由于各种线性和非线性光学效应的综合作用,光束会形成稳定的自引导传输,其传输距离可以达到衍射极限的许多倍,同时自身不产生明显的发散,这种特殊的物理现象在光学中被称为“成丝”。关于超快激光成丝的基本物理机制,广为接受的理论是光克尔效应引起的激光光束自聚焦与弱电离产生的等离子体散焦效应间的动态平衡<sup>[1-7]</sup>。最近,法国学者<sup>[8-9]</sup>提出了高阶( $\geq 5$ )非线性系数<sup>[10]</sup>对光克尔效应的平衡作用是成丝现象基本物理机制的新假设,但这一理论目前仍存在较大争议。而在诸多非线性光学过程作用下,如自相位调制、群速度色散、自陡峭<sup>[11-12]</sup>与三次谐波的产生<sup>[13]</sup>等,超快激光脉冲成丝的最终结果是激光脉冲自我转化为一种独特的新光源,新光源具有从紫外到红外甚至 THz 波段的超宽带光谱<sup>[14-21]</sup>、高强度<sup>[22]</sup>与少数周期的脉冲宽度<sup>[23-25]</sup>的特性。超快激光成丝现象不仅在基础研究方面引起了科研人员的极大兴趣,而且在大气远程遥感<sup>[26-28]</sup>、玻璃中激光直写波导<sup>[29-31]</sup>、少数周期脉冲产生<sup>[32-34]</sup>及人工控制天气<sup>[35-37]</sup>等应用领域也被寄予厚望。

在空气中,光丝的直径约为百微米量级,而在玻璃和水等凝聚态介质中光丝的直径约为几个微米。特别是在成丝过程中,并非所有的激光能量都聚集于光丝中,绝大部分的能量是以背景的形式存在于光丝周围<sup>[38]</sup>,这些背景能量常被称作能量池(energy reservoir)。一系列研究结果表明,一旦没有能量池,成丝过程将立即中止<sup>[39-40]</sup>。能量池和光丝之间的能量交换是维系成丝过程的最根本原因,能量池的存在直接决定了光丝的延续性。

另外,当入射的超快激光脉冲峰值功率远大于自聚焦阈值功率( $P_{cr}$ )时,实验通常会观察到无序不均匀分布的多丝。多丝现象的产生主要缘于出射超快激光脉冲本身强度分布的不均匀或传输介质折射率的扰动<sup>[41-43]</sup>。多丝之间并不是相互独立的,它们之间会相互作用且都会从背景能量池吸取能量以维持传输,其动态过程可由多丝竞争理论来解释<sup>[5, 44]</sup>。所谓的多丝竞争实际上是传输过程中场的重新分布,尤其是背景能量池中电场的

的重新分布。多丝竞争过程主要分为初始多丝的形成、多丝背景能量场间的干涉和新子丝的产生3个阶段。首先,扰动导致初始多丝的产生。当初始产生的多丝距离比较远时,多丝间的背景能量池相互作用较弱,各丝可看成独立传输;而当多丝间距离相对近时,多丝间的背景能量池会发生干涉,场的能量会重新分布,局部的相长干涉会形成新的强度分布不均匀点,产生新的“热点”,而对于每一个新“热点”如果其功率达到自聚焦阈值功率就会经历自聚焦,最终发展成为新的光丝(子丝)。另外,当多丝间距离很近时,多丝间背景能量池干涉形成的“热点”会从同一个背景能量池中吸收能量,这种从同一背景能量池中竞争能量的结果会导致光丝的融合或者一些“热点”没有足够能量使自己发展成为成熟的光丝。多丝竞争的这几个动态过程相互作用,最终导致了多丝的数量和位置不可预测。多丝常呈随机分布,实验中呈现出“光学湍流”的现象<sup>[45]</sup>。

在实际应用中,不同的应用领域对于多丝的空间分布有着不同的要求。如白光阵列<sup>[46]</sup>、微波通道<sup>[47-49]</sup>与精密微加工<sup>[50]</sup>等需要空间规律分布的多丝;而脉冲压缩<sup>[23-25, 32-34]</sup>则要抑制多丝的产生。因此,对于多丝的控制,一为抑制多丝的产生,即只产生单丝;二为产生分布有序稳定的多丝。

近年来,多丝控制已成为超快激光成丝现象研究领域的热点问题。本文综述了超快激光成丝现象中多丝的控制方法,并对它进行了分类分析,以期发展研究更简便实用的多丝控制方法。

## 2 抑制多丝的方法

由于多丝产生的重要原因之一是初始激光光强分布的不均匀性。因此,抑制多丝产生的基本思路之一是降低光强分布的不均匀性,以获得尽量平滑的光强分布;二是减小光强分布中热点之间的距离,使它们尽量靠近从而共享背景能量池并发生多丝融合。基于这两个思路,研究者们提出了引入像散、缩束,使用可变光阑,采用空间光调制器或相位模板及轴锥镜等实验方法。

### 2.1 引入像散

2004年G. Fibich等人通过倾斜聚焦透镜引入光束像散来达到高功率超快激光脉冲多丝的抑制<sup>[51]</sup>。实验中激光脉冲中心波长为800 nm,功率为0.5 TW,峰值功率为65.5 GW( $\sim 25 P_{cr}$ ),

聚焦透镜焦距为 2 m, 观察屏在距透镜 5 m 处。初始光斑强度分布不均匀且光斑呈椭圆状, 长轴方向半径约为 1.82 cm, 短轴方向半径约为 0.82 cm。实验得到透镜未倾斜时, CCD 记录图像显示为多丝分布; 当透镜倾斜至  $20^\circ$  时观察到单丝。倾斜透镜角度的实质是引入像散来降低脉冲在到达焦点前的功率, 从而抑制多丝在焦点前产生。当焦点附近产生光丝时, 光斑面积已经显著减小, 因此只能维持单丝的产生。虽然倾斜透镜可以抑制多丝的产生; 但不同的初始光斑需要倾斜的角度不能预测, 因此, 虽然通过倾斜透镜引入像散的方法能抑制多丝, 但在实际应用中还有待进一步的研究。

## 2.2 望远系统缩束方法

2004 年, 加拿大拉瓦尔大学 Q. Luo 等人首次提出通过一凸透镜与一凹透镜组成的望远系统缩束方法来抑制多丝的产生<sup>[52]</sup>。其实验结果如图 1 所示, 对于未经望远系统缩束的大光斑, 清楚地观察到多丝的产生(图 1(a))且位于中心的丝最亮; 相反, 经望远系统缩束后, 在中心位置只观察到一很亮的单丝(图 1(b))。同时 O. G. Kosareva 等人通过进一步的数值模拟与实验详细分析了望远镜系统抑制多丝产生的原因<sup>[53]</sup>。而 X. D. Sun 等人<sup>[54]</sup>同时发现望远系统不仅能达到多丝抑制的目的, 而且随着传播距离的增大, 成丝尾部区域的激光强度出现了强烈的增长并伴随着强度尖峰的出现, 由此验证了文献<sup>[55]</sup>中理论预测成丝将产生亚周期脉冲的新现象。望远系统抑制多丝产生的机理是通过缩小光束从而减小初始光斑中微扰的间距, 导致多丝间共享能量池并发生多丝融合, 最终形成了实验中观察到的很亮的单丝。

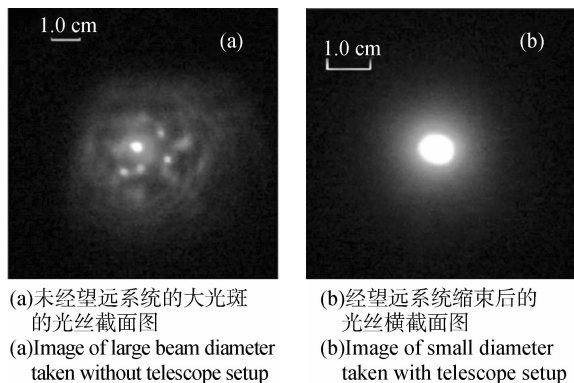


图 1 两光丝图<sup>[52]</sup>

Fig. 1 Two pictures of filaments<sup>[52]</sup>

## 2.3 直径可变孔径光阑

2007 年, 中科院物理研究所的郝作强等人在传输轴上放置了一个直径可变的孔径光阑, 通过消除光丝外围能量扰动的影响来抑制多丝的数目和模式, 提高了成丝的传输距离和空间稳定性<sup>[56]</sup>。从图 2 可以看出, 光丝横截面光斑模式的变化和光阑的孔径大小有着密不可分的联系。当光阑的孔径从无穷大(无穷大表示未加光阑)变化到 0.4 mm 时, 多丝的数量明显得到抑制。该方法的实质是减小光阑的孔径时, 初始光斑的某些强度极大值会被消除, 从而减少了扰动, 抑制了多丝的产生。然而, 虽然通过控制孔径光阑大小可以控制多丝的产生, 但这种方法能量损失较大, 能量的利用率较低。同时, 改变光阑大小的同时也控制了背景能量池, 当光阑变小时背景能量池也会随之减小且能量会有损失, 这会造成成丝长度的缩短。已有研究证明消除背景能量池的做法会导致光丝的终止<sup>[39]</sup>, 因为背景能量池存在的动态能量交换是飞秒激光成丝传输的能量支持<sup>[40]</sup>。

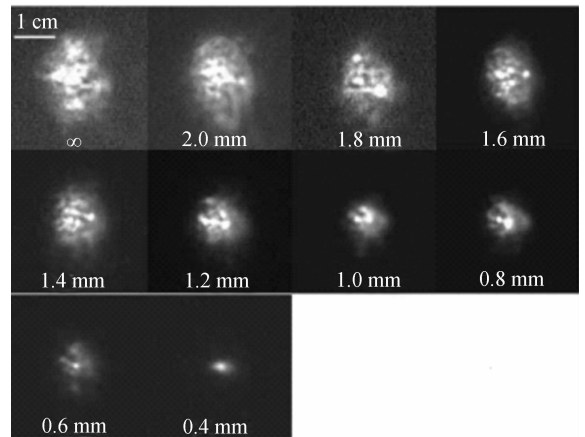


图 2 不同孔径光阑下的光丝图<sup>[56]</sup>

Fig. 2 Typical traverse filament patterns with different diameters of pinhole<sup>[56]</sup>

## 2.4 用空间光调制器或相位板改变光束波前

2006 年, 美国加州大学伯克利分校 T. Pfeifer 等人提出采用二维液晶空间光调制器产生一圆形的相位模板(图 3(a)中给定的圆形区域内相位非零, 其余部分相位为 0)来抑制多丝的产生<sup>[57]</sup>。2009 年, 中科院上海光学精密机械研究所 Y. X. Fu 等人在聚焦透镜前加入一单阶相位板达到了抑制多丝产生的目的, 且成丝长度变长并

探测到强的超连续谱<sup>[58]</sup>。实验所用的相位板(图3(b))为16 mm×16 mm×1.8 mm,中心直径为5 mm的圆内对800 nm光有 $\pi$ 相位延迟,初始光斑直径为9.7 mm( $1/e^2$ )。如图4(a)所示,入射脉冲能量为6.07 mJ,光阑为13 mm时,未加相位板时观察到无序分布的多丝;当加入相位板后,如图4(b)所示,只观察到中心一单丝。不管是空间光调制器还是相位板抑制多丝的产生,其原理都是给入射激光引入强烈的相位调制,然后衍射作用下的激光强度极大(即所谓“热点”)会呈现周期性分布,从而达到多丝控制的目的。通过调制相位的方法来抑制多丝的产生要优于前面提到的可变孔径光阑方法,因为相位调制避免了能量的损失。

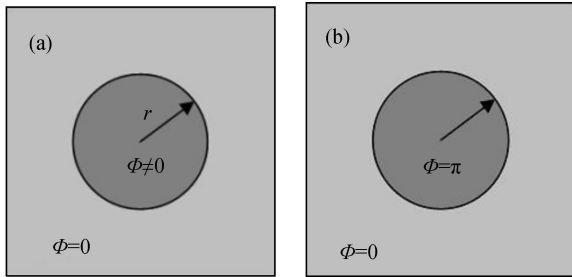


图3 相位板

Fig. 3 Two phase plates

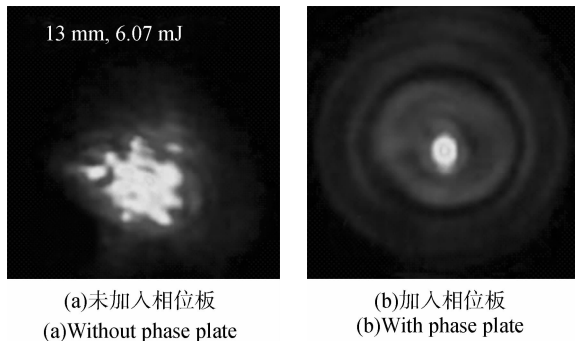


图4 孔径光阑为13 mm,入射脉冲能量为6.07 mJ,聚焦透镜前2 cm处的光丝截面图

Fig. 4 Beam-spot profiles captured at 2 cm before geometrical focus when input energy is 6.07 mJ and diameter of pinhole is 13 mm

## 2.5 轴锥镜

轴锥镜又称为轴棱锥(axicon),是目前用来产生贝塞尔光束的重要光学元件<sup>[59-61]</sup>。一高斯光束经轴锥镜聚焦后在其较深范围内产生准贝塞尔光束,而贝塞尔光束是一种无衍射光束。2008

年,S. Akturk等人证明用轴锥镜聚焦超快激光脉冲可产生一长的等离子体通道<sup>[62]</sup>。Polynkin等人研究证明了在轴棱锥聚焦作用下,超快激光脉冲产生的光丝长度可以被延长<sup>[63]</sup>。Z. M. Song等人针对氩气中超快激光成丝的横向模式——贝塞尔模式,高斯模式和拉格朗日模式进行了理论研究<sup>[64]</sup>;并通过求解非线性传输方程发现,在峰值功率、脉冲宽度和光束直径均相同的条件下,入射光束横向模式为贝塞尔模式时得到的光丝长度和等离子体通道长度比另外两种横向模式产生的长度要大很多。这主要是因为贝塞尔光束具有无衍射传输的特性,因此轴锥镜是一种简单有效地抑制多丝产生的方法。

## 3 分布有序稳定的多丝产生方法

相对于抑制多丝的产生,有序分布的多丝产生的基本思路是:(1)对于引起多丝产生的强度扰动或折射率扰动进行调制,尽量避免随机扰动,使其产生的多丝按照预想结果分布;(2)使多丝间的背景能量池尽量分开,达到互不影响,从而实现多丝空间的稳定分布。基于此,研究者们提出了引入强场梯度、改变波前相位、引入像散、入射光束的椭圆度或利用轴锥镜等的实验方法。

### 3.1 引入强场梯度

2004年,G. Méchain等人通过中心阻光的三叶形与五叶形的金属掩模板(图5(a-c))在光束中施加一强场梯度来实现多丝的控制,图5为典型的某一位置处的光丝能量密度图<sup>[65]</sup>。实验与理论计算结果显示,光丝的数目与金属孔的个数相同。该方法虽然可以达到多丝控制的目的;但是会伴随较大的能量损失,因为只有通过金属孔的能量被利用,未通过的能量会损失掉,能量的利用率较低。接着,J. S. Liu等人<sup>[66]</sup>和H. Schroeder等人<sup>[67]</sup>提出利用金属网格实现液体中的多丝控制。图6显示了J. S. Liu等人<sup>[66]</sup>采用金属网格在乙醇溶液中的多丝控制,得到了规律分布的多丝。利用掩模板或金属网格实现多丝控制,其实质是通过引入强场梯度,使光丝间背景能量池尽量隔开而互不影响,使每一个能量池独自作用各自的光丝,从而使光丝有序分布。金属网格实现多丝的有序分布,较掩模板的方法,金属丝网

能量的利用率提高;但是多丝的位置对应于线性衍射各级的极大值处,这样就会由于其衍射作用造成在不同位置处的多丝间隔不同,因此对于这种有序的多丝分布在实际中的应用还需进一步的研究。

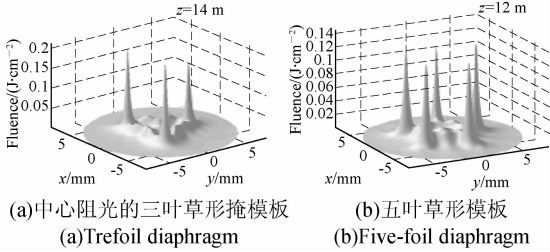


图 5 采用脉冲能量 10 mJ, 中心波长 800 nm 的飞秒激光脉冲在空气中的成丝图<sup>[65]</sup>

Fig. 5 Multiple filament patterns obtained by a 10 mJ pulse with center wavelength of 800 nm in air<sup>[65]</sup>

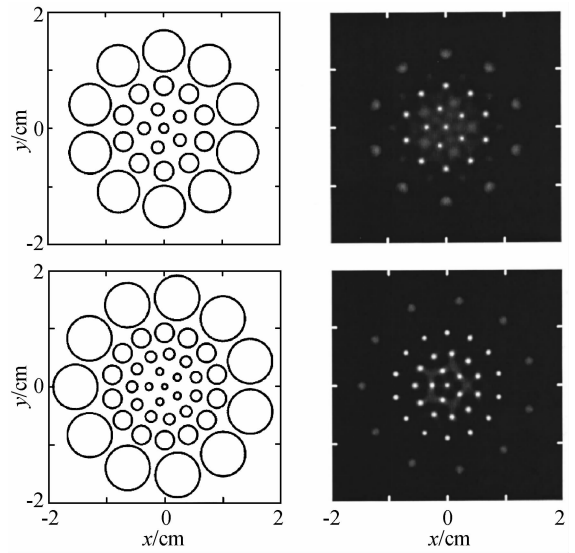


图 7 透镜阵列及其对应的周期相位结构<sup>[68]</sup>

Fig. 7. Lense arrays and their phase structures<sup>[68]</sup>

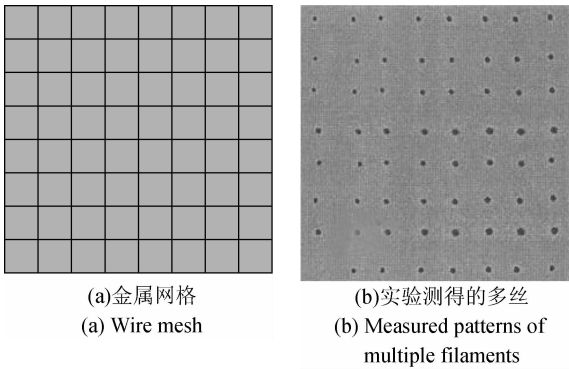


图 6 金属网格控制多丝<sup>[66]</sup>

Fig. 6 Control of multiple filaments with a wire mesh<sup>[66]</sup>

### 3.2 改变波前相位与引入像散

2006 年,莫斯科国立大学的 N. A. Panov 等人<sup>[68]</sup>提出利用空间周期分布的相位结构(透镜阵列或异型反射镜)来实现大气湍流下的多丝控制,图 7 显示了透镜阵列对应的相位结构与多丝分布。2008 年,C. P. Hauri 等人<sup>[69]</sup>通过一变形反射镜改变波前来进行二维空间的多丝控制,利用变形反射镜的附加相位来对激光光束的初始相位扰动或传输过程中介质不均性带来的扰动进行调制,从而达到气体介质中多丝控制的目的。同时,P. Rohwetter 等人<sup>[70]</sup>利用空间光调制器(选通动态变形镜 SDDM)产生的相位掩模板进行多丝控制,线性衍射对于多丝分布起到决定作用,因此通过经典光学定律可得到初始阶段光场能量分布进

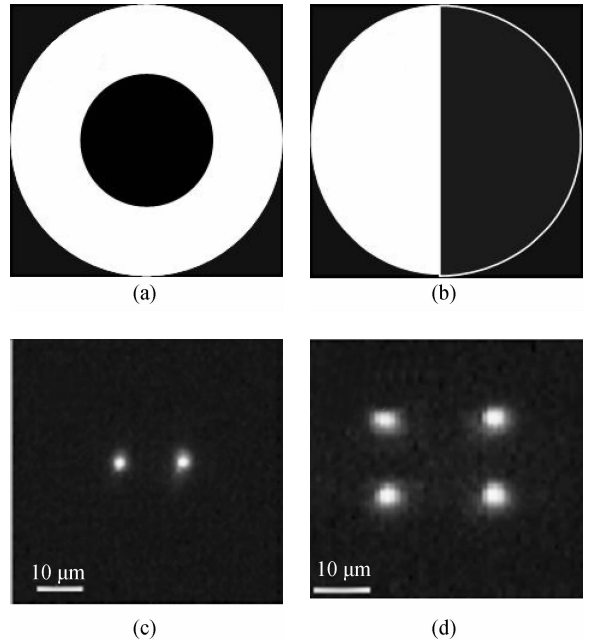


图 8 (a)和(b)为实验所用相位板(圆内黑色区域对 800 nm 光的相位延迟为  $\pi$ );(c)为只有相位板 SC 时观察到的光丝;(d)为相位板 SC 与 CHW 同时作用时观察到的光丝图<sup>[71]</sup>

Fig. 8 (a) and (b) are experimental single-step phase plates; (a) semi-circular (SC) phase plate and (b) central half-wavelength (CHW) phase plate. (c) is an experimental image of filaments by using the SC phase plate. (d) is a picture of four filaments by using SC and CHW phase plates<sup>[71]</sup>

而预知多丝分布。2011年,上海光学精密机械研究所的L. Liu等人<sup>[71]</sup>利用相位板与一聚焦透镜得到了规律分布的多丝,所用相位板如图8(a)与(b)所示。当只有半圆形相位延迟的相位板时,可观察到2根光丝;当两相位板同时作用时,可观察到4根光丝。因此,透镜阵列、变形反射镜与直接引入相位板都能有效地控制多丝,其实质都是通过调制光束相位使其初始相位扰动及传输介质带来的折射率扰动的影响减弱或不再对光丝的产生起作用,相位调制导致光场分布的改变从而达到多丝控制的目的。另外,还有一种控制多丝的方法,如前面提到的通过倾斜聚焦透镜引入像散来抑制多丝的产生,同样引入像散也可以实现多丝的控制。2011年,Y. X. Fu等人通过一对相互垂直的柱透镜引入像散实现了飞秒激光成丝的多丝控制<sup>[72]</sup>。实验观察到在柱透镜的作用下,产生的光丝出现分支,且分开的角度与两柱透镜焦距间距有关。

### 3.3 改变入射光束的椭圆度

2004年,A. Dubietis等人首次实验证明了入射光束的椭圆度可以对多丝进行控制<sup>[73]</sup>。文章研究了具有一定椭圆度的超快激光脉冲在水中传输产生的多丝分布情况,实验证明即便初始光束带有小的椭圆度,仍会产生确定性的多丝分布。不同于扰动产生的无序分布的多丝,在初始光束中引入椭圆度后产生的光丝,或只有中心的一根,或一对分别位于椭圆的长轴与短轴方向,或四根位于长轴与短轴的平分线方向。2005年,美国康奈尔大学的T. D. Grow与A. L. Gaeta<sup>[74]</sup>研究了椭圆度与超快激光脉冲多丝分布的关系,发现随着椭圆度的增大,产生多丝所需的入射功率会减小。2009年与2010年,D. Majus等人研究了椭圆形超快激光脉冲在熔融石英中可产生周期分布的一维、二维与三维的多丝阵列,其分布与椭圆率及入射初始脉冲的峰值功率有关<sup>[75-76]</sup>。椭圆光束产生的多丝分布与初始光斑的大小、椭圆率和入射初始脉冲峰值功率有关,但目前还不能根据初始条件精确确定多丝的分布及位置,因此对于椭圆光束的多丝控制仍需进一步的研究。

### 3.4 轴锥镜

前面提到利用轴锥镜来抑制多丝的产生,最近X. D. Sun等人<sup>[77]</sup>发现当超快激光经过轴锥镜聚焦于甲醇溶液中时可有丝产生,且多丝分

布在轴锥镜产生的贝塞尔中心光斑和各级次圆环峰值强度对应的位置上,实现了多丝有规律的分布。实验所用的轴锥镜顶角为 $179^\circ$ ,直径为25 mm。实验结果如图9所示,当没有轴锥镜聚焦时,多丝无序分布呈“光学湍流”的物理现象<sup>[45]</sup>。而轴锥镜聚焦时,从数码相机记录的图9(b)观察到一条明亮的光线从玻璃样品池的入射端面一直持续传播到出射端面,CCD记录的图进一步说明多丝独立且有规律的分布。文献<sup>[78]</sup>进一步分析了导致飞秒激光经轴锥镜聚焦于甲醇溶液后有序分布多丝产生的原因及规律。通过在初始光斑截面引入强度分布的不均性,导致了高斯脉冲圆柱对称性的破坏。模拟结果表明,在线性传输情况下,由于双高斯光束的不对称性,局部强度的最大值可能出现在贝塞尔周围的圆环上,进而形成强度“热点”,而这些“热点”恰恰是在非线性传输时多丝产生的诱因。因此,入射激光经过轴锥镜聚焦后产生的多丝可以很规律地分布在线性传输时轴锥镜产生的贝塞尔中心光斑和各级次圆环的对应位置上,实现了多丝空间有序分布。目前,轴锥镜既可以抑制多丝的产生也可以产生有序分布的多丝,是一种有效控制多丝的光学元件。

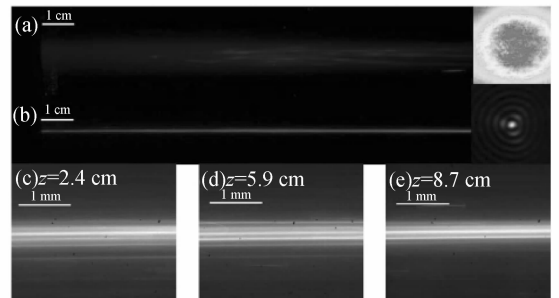


图9 数码相机记录的多丝分布图像<sup>[77]</sup>

Fig. 9 Images of multiple filaments taken by digital camera<sup>[77]</sup>

## 4 结束语

综上所述,本文简单介绍了目前对于高功率超快激光脉冲介质中传输时多丝的控制方法。可看出,目前对于多丝的控制主要是采用振幅调制(引入强场梯度)或相位调制方法来减弱或消除强度微扰与传输介质折射率扰动,其实质都是避免多丝间的相互联系及能量竞争,使多丝按照预想

的空间图样排布,达到多丝控制的研究目的。但目前对于多丝的控制还不能准确达到多丝长度及间距位置的精确控制,因此还需要深入的实验与

理论研究来更好地实现在微波通道<sup>[47-49]</sup>、白光阵列<sup>[46]</sup>、脉冲压缩<sup>[23-25,32-34]</sup>与精密微加工<sup>[50]</sup>等方面的应用。

### 参考文献:

- [1] CHIN S L, BRODEUR A, PETIT S, *et al.*. Filamentation and supercontinuum generation during the propagation of powerful ultrashort laser pulses in optical media (white light laser) [J]. *J. Nonlinear Optic. Phys. Mat.*, 1999, 8(1): 121-146.
- [2] MLEJNEK M, WRIGHT E M, MOLONEY J V. Dynamic spatial replenishment of femtosecond pulses propagating in air [J]. *Opt. Lett.*, 1998, 23(5): 382-384.
- [3] LIU W, PETIT S, BECKER A, *et al.*. Intensity clamping of a femtosecond laser pulse in condensed matter [J]. *Opt. Commun.*, 2002, 202(1-3): 189-197.
- [4] CHIN S L. *Femtosecond Laser Filamentation* [M]. Berlin:Springer, 2010.
- [5] CHIN S L, HOSSEINI S A, LIU W, *et al.*. The propagation of powerful femtosecond laser pulses in optical media: physics, applications, and new challenges [J]. *Can. J. Phys.*, 2005, 83(9): 863-905.
- [6] COUAIRON A, MYSYROWICZ A. Femtosecond filamentation in transparent media [J]. *Phys. Rep.*, 2007, 441(2-4): 47-189.
- [7] BERGÉL, SKUPIN S, NUTER R, *et al.*. Ultrashort filaments of light in weakly ionized, optically transparent media [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2007, 70(10): 1633-1713.
- [8] BÉJOT P, KASPARIAN J, HENIN S, *et al.*. Higher-order kerr terms allow ionization-free filamentation in gases [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 104(10): 103903.
- [9] BÉJOT P, HERTZ E, KASPARIAN J, *et al.*. Transition from plasma-driven to kerr-driven laser filamentation [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 106(24): 243902 (2011).
- [10] WANG Z X, ZHANG C J, LIU J S, *et al.*. Femtosecond filamentation in argon and higher-order nonlinearities [J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(12): 2336-2338.
- [11] GAETA A L. Catastrophic collapse of ultrashort pulses[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 84(16): 3582-3585.
- [12] AKÖZBEK N, SCALORA M, BOWDEN C M, *et al.*. White-light continuum generation and filamentation during the propagation of ultra-short laser pulses in air [J]. *Opt. Commun.*, 2001, 191(3-6): 353-362.
- [13] AKÖZBEK N, IWASAKI A, BECKER A, *et al.*. Third-harmonic generation and self-channeling in air using high-power femtosecond laser pulses [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 89(14): 143901.
- [14] NIBBERING E T J, CURLEY P F, GRILLON G, *et al.*. Conical emission from self-guided femtosecond pulses in air [J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21(1): 62-64.
- [15] KASPARIAN J, SAUERBREY R, MONDELAIN D, *et al.*. Infrared extension of the super continuum generated by femtosecond terawatt laser pulses propagating in the atmosphere [J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25(18): 1397-1399.
- [16] BRODEUR A, CHIN S L. Ultrafast white-light continuum generation and self-focusing in transparent condensed media [J]. *J. Opt. Soc. Am. B.* 1999, 16(4): 637-650.
- [17] LIU J S, SCHROEDER H, CHIN S L, *et al.*. Space-frequency coupling, conical waves, and small-scale filamentation in water [J]. *Phys. Rev. A.* 2005, 72(5): 053817.
- [18] LIU J S, SCHROEDER H, CHIN S L, *et al.*. Nonlinear propagation of fs laser pulses in liquids and evolution of supercontinuum generation [J]. *Opt. Express*, 2005, 13(25): 10248-10259.
- [19] WANG Z X, LIU J S, LI R X, *et al.*. Wavefront control to generate ultraviolet supercontinuum by filamentation of few-cycle laser pulses in argon [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(2): 163-165.
- [20] WANG Z X, LIU J S, LI R X, *et al.*. Supercontinuum generation and pulse compression from gas filamentation of femtosecond laser pulses with different durations [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(16): 13841-13850.

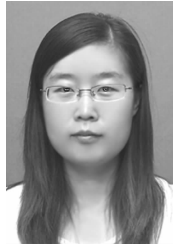
- [21] KANDIDOV V P, KOSAREVA O G, GOLUBTSOV I S, *et al.*. Self-transformation of a powerful femtosecond laser pulse into a white-light laser pulse in bulk optical media (or super-continuum generation) [J]. *Appl. Phys. B*, 2003, 77(2-3): 149-165.
- [22] KASPARIAN J, SAUERBREY R, CHIN S L. The critical laser intensity of self-guided light filaments in air [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, 71(6): 877-879.
- [23] HAURI C P, KORNELIS W, HELBING F W, *et al.*. Generation of intense, carrier-envelope phase-locked few-cycle laser pulses through filamentation [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, 79(6): 673-677.
- [24] CHEN X, LENG Y, LIU J, *et al.*. Pulse self-compression in normally dispersive bulk media [J]. *Opt. Commun.*, 2006, 259(1):331-335.
- [25] LIU J S, LI R X, XU Z Z. Few-cycle spatiotemporal soliton wave excited by filamentation of a femtosecond laser pulse in materials with anomalous dispersion [J]. *Phys. Rev. A*, 2006, 74(4): 043801.
- [26] KASPARIAN J, RODRIGUEZ M, MÉJEAN G, *et al.*. White-light filaments for atmospheric analysis [J]. *Science*, 2003, 301(5629): 61-64.
- [27] KASPARIAN J, WOLF J-P. Physics and applications of atmospheric nonlinear optics and filamentation [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(1): 466-493.
- [28] XU H L, CHIN S L. Femtosecond laser filamentation for atmospheric sensing [J]. *Sensors*, 2011, 11(1): 32-53.
- [29] DAVIS K M, MIURA K, SUGIMOTO N, *et al.*. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21(21): 1729-1731.
- [30] SALIMINIA A, NGUYEN N T, NADEAU M-C, *et al.*. Writing optical waveguides in fused silica using 1 kHz femtosecond infrared pulses [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 93(7): 3724-3728.
- [31] TZORTZAKIS S, SUDRIE L, FRANCO M, *et al.*. Self-guided propagation of ultrashort IR laser pulses in fused silica [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 87(21): 213902.
- [32] AKTURK S, COUAIRO A, FRANCO M, *et al.*. Spectrogram representation of pulse self-compression by filamentation [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(22): 17626-17636.
- [33] COUAIRO A, BIEGERT J, HAURI C P, *et al.*. Self-compression of ultra-short laser pulses down to one optical cycle by filamentation [J]. *J. Mod. Opt.*, 2008, 53(1-2): 75-85.
- [34] KOSAREVA O G, MURTAZIN I N, PANOVA A, *et al.*. Pulse shortening due to filamentation in transparent medium [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, 4(2): 126-132.
- [35] ROHWETTER P, KASPARIAN J, STELMASZCZYK K, *et al.*. Laser-induced water condensation in air [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(7): 451-456.
- [36] JU J, LIU J, WANG C, *et al.*. Laser-filamentation-induced condensation and snow formation in a cloud chamber [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(7): 1214-1216.
- [37] JU J J, LIU J S, WANG C, *et al.*. Effects of initial humidity and temperature on laser-filamentation-induced condensation and snow formation [J]. *Appl. Phys. B*, 2012: 1-6.
- [38] CHIN S L, AKÖZBEK N, PROULX A, *et al.*. Transverse ring formation of a focused femtosecond laser pulse propagating in air [J]. *Opt. Commun.*, 2001, 188(1-4): 181-186.
- [39] LIU W, GRAVEL J F, THÉBERGE F, *et al.*. Background reservoir; its crucial role for long-distance propagation of femtosecond laser pulses in air [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, 80(7): 857-860.
- [40] KANDIDOV V P, KOSAREVA O G, KOLTUNINA A A. Nonlinear-optical transformation of a high-power femtosecond laser pulse in air [J]. *Quantum Electron.*, 2003, 33(1): 69-75.
- [41] BESPALOV V I, TALANOV V I. Filamentary structure of light beams in nonlinear liquids [J]. *JETP Lett.*, 1966, 3(12): 307-312.
- [42] CHIN S L, TALEBPOUR A, YANG J, *et al.*. Filamentation of femtosecond laser pulses in turbulent air [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, 74(1):67-76.
- [43] CHIN S L, PETIT S, LIU W, *et al.*. Interference of transverse rings in multifilamentation of powerful femtosecond laser pulses in air [J]. *Opt. Commun.*, 2002, 210(3): 329-341.
- [44] HOSSEINI S A, LUO Q, FERLAND B, *et al.*. Competition of multiple filaments during the propagation of intense femtosecond laser pulses [J]. *Phys. Rev. A*, 2004, 70(3): 033802.
- [45] MLEJNEK M, KOLESIK M, MOLONEY J V, *et al.*. Optically turbulent femtosecond light guide in

- air [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83(15): 2938-2941.
- [46] COOK K, KAR A K, LAMB R A. White-light supercontinuum interference of self-focused filaments in water [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(19): 3861-3863.
- [47] CHÂTEAUNEUF M, PAYEUR S, DUBOIS J, *et al.*. Microwave guiding in air by a cylindrical filament array waveguide [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92(9): 091104.
- [48] SHNEIDER M N, ZHELTIKOV A M, MILES R B. Long-lived laser-induced microwave plasma guides in the atmosphere; self-consistent plasmadynamic analysis and numerical simulations [J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, 108(3): 033113.
- [49] VALUEV V V, DORMIDONOV A E, KANDIDOV V P, *et al.*. Plasma channels formed by a set of filaments as a guiding system for microwave radiation [J]. *J. Commun. Technol. El.*, 2010, 55(2): 208-214.
- [50] KOSAREVA O G, NGUYEN T, PANOV N A, *et al.*. Array of femtosecond plasma channels in fused silica [J]. *Opt. Commun.*, 2006, 267(2): 511-523.
- [51] FIBICH G, EISENMANN S, ILAN B, *et al.*. Control of multiple filamentation in air [J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29(15): 1772-1774.
- [52] LUO Q, HOSSEINI S A, LIU W, *et al.*. Effect of beam diameter on the propagation of intense femtosecond laser pulses [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, 80(1): 35-38.
- [53] KOSAREVA O G, PANOV N A, AKÖZBEK N, *et al.*. Controlling a bunch of multiple filaments by means of a beam diameter [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, 82(1): 111-122.
- [54] SUN X D, XU S Q, ZHAO J Y, *et al.*. Impressive laser intensity increase at the trailing stage of femtosecond laser filamentation in air [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(4): 4790-4795.
- [55] GAARDE M B, COUAIROU A. Intensity spikes in laser filamentation: diagnostics and application [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 103(4): 043901.
- [56] HAO Z Q, ZHANG J, XI T T, *et al.*. Optimization of multiple filamentation of femtosecond laser pulses in air using a pinhole [J]. *Opt. Express*, 2007, 15(24): 16102-16109.
- [57] PFEIFER T, GALLMANN L, ABEL M J, *et al.*. Circular phase mask for control and stabilization of single optical filaments [J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31(15): 2326-2328.
- [58] FU Y, XIONG H, XU H, *et al.*. Generation of extended filaments of femtosecond pulses in air by use of a single-step phase plate [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(23): 3752-3754.
- [59] MCLEOD H. The axicon; a new type of optical element [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, 44(8): 592-592.
- [60] DURIN J, MICELI JR J J, EBERLY J H. Diffraction-free beams [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [61] SCOTT G, MCARDLE N. Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon [J]. *Opt. Eng.*, 1992, 31(12): 2640-2643.
- [62] AKTURK S, ZHOU B, FRANCO M, *et al.*. Generation of long plasma channels in air by focusing ultrashort laser pulses with an axicon [J]. *Opt. Commun.*, 2009, 282(1): 129-134.
- [63] POLYNKIN P, KOLESIK M, ROBERTS A, *et al.*. Generation of extended plasma channels in air using femtosecond Bessel beams [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(20): 15733-15740.
- [64] SONG Z M, ZHANG Z G, NAKAJIMA T. Transverse-mode dependence of femtosecond filamentation [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(15): 12217-12229.
- [65] MÉCHANIN G, COUAIROU A, FRANCO M, *et al.*. Organizing Multiple Femtosecond Filaments in Air [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93(3): 035003.
- [66] LIU J S, SCHROEDER H, CHIN S L, *et al.*. Ultrafast control of multiple filamentation by ultrafast laser pulses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87(16): 161105.
- [67] SCHROEDER H, LIU J, CHIN S L. From random to controlled small-scale filamentation in water [J]. *Opt. Express*, 2004, 12(20): 4768-4774.
- [68] PANOV N A, KOSAREVA O G, MURTAZIN I N. Ordered filaments of a femtosecond pulse in the volume of a transparent medium [J]. *J. Opt. Technol.*, 2006, 73(11): 778-785.
- [69] HAURI C P, GAUTIER J, TRISORIO A, *et al.*. Two-dimensional organization of a large number of stationary optical filaments by adaptive wave front control [J]. *Appl. Phys. B*, 2008,

90(3): 391-394.

- [70] ROHWETTER P, QUEISSER M, STELMASZCZYK K, *et al.*. Laser multiple filamentation control in air using a smooth phase mask [J]. *Phys. Rev. A*, 2008, 77(1): 013812.
- [71] LIU L, WANG C, CHENG Y, *et al.*. Fine control of multiple femtosecond filamentation using a combination of phase plates [J]. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2011, 44(21): 215404.
- [72] FU Y, GAO H, CHU W, *et al.*. Control of filament branching in air by astigmatically focused femtosecond laser pulses [J]. *Appl. Phys. B*, 2011, 103(2): 435-439.
- [73] DUBIETIS A, TAMOGAUSKAS G, FIBICH G, *et al.*. Multiple filamentation induced by input-beam ellipticity [J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29(10): 1126-1128.
- [74] GROW T D, GAETA A L. Dependence of multiple filamentation on beam ellipticity [J]. *Opt. Express*, 2005, 13(12): 4594-4599.
- [75] MAJUS D, JUKNA V, VALIULIS G, *et al.*. Generation of periodic filament arrays by self-focusing of highly elliptical ultrashort pulsed laser beams [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, 79(3): 033843.
- [76] MAJUS D, JUKNA V, TAMOŠAUSKAS G, *et al.*. Three-dimensional mapping of multiple filament arrays [J]. *Phys. Rev. A*, 2010, 81(4): 043811.
- [77] SUN X D, GAO H, ZENG B, *et al.*. Multiple filamentation generated by focusing femtosecond laser with axicon [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(5): 857-859.
- [78] GAO H, SUN X D, ZENG B, *et al.*. Cylindrical symmetry breaking leads to multiple filamentation generation when focusing femtosecond lasers with axicons in methanol [J]. *J. Opt.*, 2012, 14(6): 065203.

#### 作者简介:

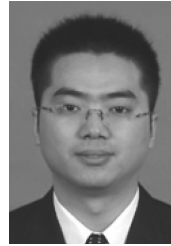


高 慧(1985—),女,山东潍坊人,博士研究生,2008年于泰山学院获得学士学位,主要从事超快激光脉冲在光学介质中非线性传输的研究。E-mail: gao-hui\_nk@yahoo.com.cn



赵佳宇(1988—),男,辽宁抚顺人,博士研究生,2011年于南开大学获得学士学位,主要从事飞秒激光产生太赫兹波物理机制的研究。E-mail: zhaojiayu1988@gmail.com

#### 导师简介:



刘伟伟(1976—),男,江苏人,教授,博士生导师,1998年于南开大学获得学士学位,加拿大拉瓦尔大学(Laval University)物理系博士学位(2001~2005),加拿大拉瓦尔大学光学中心(Center of Optics, Photonics and Lasers)博士后(2006),主要从事超快激光脉冲在光学介质中的非线性传输(filamentation)的研究,包括物理机制的实验研究和理论模拟;超短激光脉冲在大气遥感和环境探测以及集成光学中的应用技术以及基于新型微结构人工材料的光学气体传感技术研究等。E-mail: liuweimei@nankai.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)