

# 圆孔衍射调制强激光非线性传输实验研究

章礼富<sup>1,2</sup> 张景贵<sup>3</sup> 钟亥哲<sup>1</sup> 陈 英<sup>2</sup> 范滇元<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 深圳大学光电工程学院光电子器件与系统(教育部/广东省)重点实验室, 广东 深圳 518060  
<sup>2</sup> 长沙学院电子与通信工程系, 湖南 长沙 410003  
<sup>3</sup> 湖南第一师范学院信息技术系, 湖南 长沙 410205  
<sup>4</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

**摘要** 实验研究了圆孔衍射调制下的强激光在克尔非线性介质中的传输特性。观测了小尺度自聚焦效应引起的多细丝形成、单根细丝演化以及细丝之间相互作用过程。结果表明: 在非线性传输过程中, 衍射调制光束在空间特定位置出现调制增长, 导致光束分裂形成多路细丝; 单根细丝强度并非无限增长, 而是达到一定值后通过锥形发射释放多余能量, 同时与背景光相互作用形成新细丝; 相距较近的细丝之间通过干涉相互作用, 使其在附近区域形成新的细丝。

**关键词** 非线性光学; 自聚焦; 非线性传输; 小尺度自聚焦; 衍射

**中图分类号** O437 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.1202008

## Experimental Study of Nonlinear Propagation of Intense Laser with Diffraction Modulation Induced by a Circular Aperture

Zhang Lifu<sup>1,2</sup> Zhang Jinggui<sup>3</sup> Zhong Haizhe<sup>1</sup> Chen Ying<sup>2</sup> Fan Dianyuan<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

<sup>2</sup> Department of Electronics and Communication Engineering, Changsha University, Changsha, Hunan 410003, China

<sup>3</sup> School of Information Technology, Hunan First Normal College, Changsha, Hunan 410205, China

<sup>4</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** The nonlinear propagation characteristics of intense laser with circular aperture diffraction in Kerr medium are studied by experiments. We experimentally observe the formation of small-scale filaments, the evolution of single filament and the interaction between filaments. Results show that modulation growths take place at particular spatial positions and lead beam breakup into multi-filamentation during nonlinear propagation. The single filament intensity is not growing indefinitely, but to release the excess energy by the cone emitting after reaches a certain value. At the same time, new filaments form owing to the interaction between the background energy and the released energy. The filaments in close proximity through the interference interaction, make new filaments form in their neighborhood.

**Key words** nonlinear optics; self-focusing; nonlinear propagation; small-scale self-focusing; diffraction

**OCIS codes** 190.4420; 190.3270; 320.7110

收稿日期: 2014-07-08; 收到修改稿日期: 2014-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(61308005)、深圳大学青年教师科研启动项目(201449, 201450)、湖南省自然科学基金(13JJ4108)

作者简介: 章礼富(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光传输与控制等方面的研究。

E-mail: zhanglifu68@hotmail.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

## 1 引言

光束成丝是非线性领域中的一个基本物理问题。如非线性光学,等离子体物理等非线性物理领域中常常会发生光束成丝现象<sup>[1]</sup>。自从这一现象首次被发现后<sup>[2-4]</sup>,高功率激光脉冲在非线性介质中传输形成细丝的现象便成为一个热点研究方向<sup>[5-6]</sup>。激光脉冲在非线性介质中传输,当激光脉冲功率高于自聚焦临界功率从而非线性作用大于衍射效应时,光束将自聚焦。通常将自聚焦效应分成整体自聚焦(又叫全光束整体自聚焦)和小尺度自聚焦两类<sup>[7-8]</sup>。它们将引起光束整体成丝和多路成丝或小尺度成丝。如果细丝强度超过介质的损伤阈值,则介质将会被破坏,因此在高功率激光系统中经常会出现光学元件的损伤现象。这种损伤现象不但影响了系统的负载能力,而且威胁到系统的安全运行<sup>[9-13]</sup>。因此,高功率激光器的研制者和使用者一直高度重视光束成丝现象。

1966年,Bespalov等<sup>[7]</sup>提出了关于小尺度自聚焦引起成丝现象的经典理论,被称之为BT理论,该理论简单且清晰地解释了多路细丝形成的原因。随后,BT理论得到各种各样的推广或修正<sup>[14-19]</sup>,如考虑非傍轴<sup>[16]</sup>、调制场与本底场存在能量交换<sup>[18]</sup>、光束局部调制<sup>[19]</sup>等多种情况下的小尺度自聚焦,使其更接近实际情形。在非线性光学发展的初期阶段,由于激光器性能的限制,只能在凝聚态物质中(如玻璃、液体等)才能观测到多路成丝现象<sup>[5]</sup>。随着激光技术和超快光学技术的发展,人们已经能够获得高能量的超短超强飞秒激光脉冲<sup>[20]</sup>,使得在气体中也很容易看到飞秒脉冲自聚焦导致单路细丝或多路细丝的形成。在空气中这种现象最引人注目,由于它能产生长度从几十米到1 km的细丝,有着许多潜在的应用,如诱导闪电、远程触发与遥感、超光谱展宽、太赫兹产生以及阿秒脉冲产生等<sup>[6]</sup>。正是由于这些潜在的应用,有效的操控成丝过程具有十分重要的价值。采用光束整形、相位控制等方法可以控制多路细丝的形成以及细丝之间的相互作用。多路细丝形成及其控制已成为热门的研究方向<sup>[21-24]</sup>。

衍射是波动现象的一个普遍特征。实际运行的激光系统中各种光学元件总是具有有限口径,激光脉冲在激光系统中传输就不可避免要发生衍射,致使激光空间强度分布就会受到空间衍射产生的小尺度调制的影响。调制后的激光空间光强不再均匀分布,非线性传输过程中很容易发生小尺度自聚焦现象,形成许多高强度的细丝,破坏光束质量。因此,有必要研

究衍射调制下的激光脉冲非线性传输过程中多路细丝的形成、演化以及细丝之间的相互作用过程。

本文基于以上考虑,研究圆孔衍射调制的激光脉冲在非线性介质中的传输过程。观察了小尺度自聚焦效应引起的多路成丝、细丝之间的相互作用以及单根细丝的演化过程。

## 2 实验装置

图1给出了实验装置示意图。激光光源为Coherent公司的LibraS钛宝石再生放大激光系统,其输出激光脉冲在时间上和空间上为近高斯分布。脉冲宽度约为120 fs,带宽约为12 nm,重复频率为1 kHz,中心波长为800 nm,单脉冲最大能量为1 mJ,光束直径为6 mm。整个实验过程中,色散长度远大于非线性长度,因此忽略色散的影响。GS为类似注射器结构的容器,通过移动内管来改变非线性介质的长度。二硫化碳填充到容器中,选用它的原因在于其具有很大的非线性折射率系数,约为 $3.5 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{W}$ <sup>[25]</sup>。在较小的输入强度下可以产生较大的非线性相移,同时可以减小其他光学元件的非线性效应对光束质量的影响。成像透镜(OL)与记录激光空间分布的CCD相机固定在滑轨上记录激光空间强度分布,当改变非线性介质长度时,同样的需要改变透镜和CCD相机的位置,确保GS出射面到透镜OL与CCD相机之间的距离是固定的。M1,M2为反射镜,AT是中性密度可调衰减片,A是可调直径的小孔, $d$ 指非线性介质的长度。CCD相机为相干公司的Laser Cam-HRTM Beamview,其点阵为1280 pixel $\times$ 1024 pixel,分辨率约为 $6.7 \mu\text{m} \times 6.7 \mu\text{m}$ ,相应的区域尺寸是 $8.5 \text{ mm} \times 6.8 \text{ mm}$ 。而输入激光的能量则由功率计测量,脉冲宽度用单次自相关仪测量。

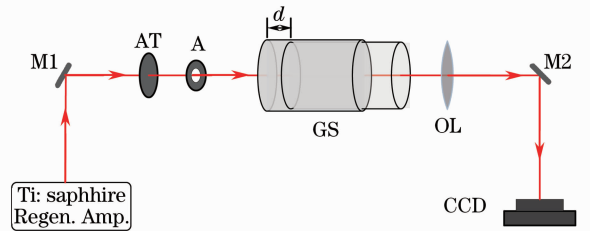


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of experimental setup

## 3 实验结果

根据BT理论的预言,叠加调制的激光光束经

过非线性介质传输,由于小尺度自聚焦效应,调制的幅度将会增长从而形成多路细丝。与此同时,细丝之间会发生相互作用形成新丝,从而破坏了光束空间分布的均匀性。利用圆孔衍射将衍射调制叠加到空间上,来研究多路细丝的形成过程及其相互作用。图2是两个不同直径[(a) 5.0 mm和(b) 6.0 mm]圆孔衍射调制下的激光脉冲经过10 mm长的非线性介质传输后,输入与输出的空间强度分布图。从图2中可以看出,输出激光的空间强度分布格式由初始输入激光的空间调制格式决定。而且输出空间多路细丝的分布是有规律的,基本分布在衍射环上<sup>[4,9]</sup>。当圆孔位置与非线性介质入射面的距离及圆孔半径所决定的菲涅耳数为奇数时,光束中心将会有个亮点,经过非线性介质传输后,在中心产生稳定的高强度的单根细丝如图2(a)所示。如果菲涅耳数为偶数,中心将没有单根细丝如图2(b)所示,但是在衍射环上形成了许多细丝。

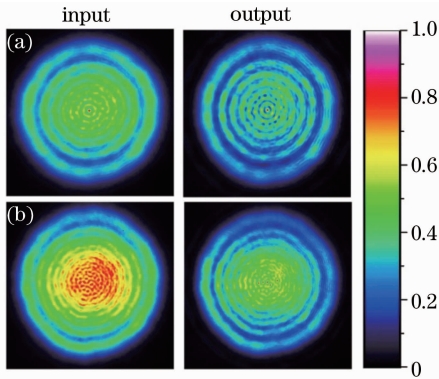


图2 激光经过不同直径小孔后的空间光强分布图。

(a) 5.0 mm; (b) 6.0 mm

Fig. 2 Spatial intensity distributions of laser beam through aperture of different diameters.

(a) 5.0 mm; (b) 6.0 mm

### 3.1 多路细丝形成过程

为了更清晰地揭示小尺度细丝的演化过程,图3给出了光束中心部分的小尺度调制随非线性介质长度增加的演化过程。实验中脉冲能量为0.67 mJ,脉冲宽度为120 fs,小孔直径为5 mm。圆孔衍射使得光束在空间上受到规则的调制,同时,空间上还存在着随机的噪声调制。经过非线性介质传输后,发生小尺度自聚焦,导致弱调制的幅度指数增长,从而形成大量的小尺度细丝。当非线性介质长度较短时(小于5 mm),非线性作用相对较弱,传输过程中光束空间分布特点基本保持不变,局域部分所包含的功率大于自聚焦临界功率而发生自聚焦,调制的强度有所加强,但不明显。进一步的增加传

输距离(6~11 mm),自聚焦作用变强,这些局域调制从背景中吸取更多的能量,强度明显增大,形成大量的小尺度细丝,且细丝的直径变小。此外,由于在空间上存在着一些随机的噪声调制,使得每个独立的圆环发生分裂,类似于一个圆形的珍珠项链。继续增加非线性介质的长度(12~17 mm),这种空间调制格式能够稳定的传输。第二个环上出现稳定的细丝分布,且每根细丝强度基本相当。而且中心圆环也已明显的分裂成了三根细丝。当非线性介质的长度继续增加(18~25 mm),细丝的空间分布格式将被破坏。原因在于细丝的强度并不是无限制的增长,而是达到一定值后就会释放多余的能量,与背景光之间相互作用;同时这些小尺度的细丝之间也存在相互作用,形成新的细丝。从图3中可以清晰地看到内环上的一根细丝在传输过程中释放多余的能量,在其临近位置处形成一根新丝,由于其周围的能量补给非常的充分,新丝强度逐渐增大且稳定的传输(21~25 mm)。

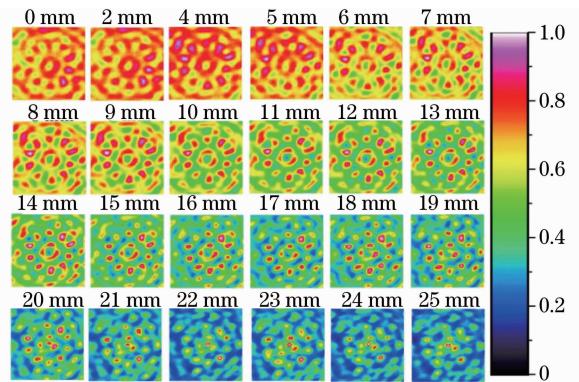


图3 小尺度细丝随传输距离变化的演化过程

Fig. 3 Evolution of small-scale filaments as a function of propagation distance

### 3.2 细丝之间的相互作用

图4给出了细丝之间相互作用的过程。在非线性介质长度较小时(小于8 mm)时,在自聚焦效应的作用下,各个区域内基本上是独立的产生聚焦现象,各自的强度逐渐增大,开始形成细丝。随着距离的增大(8~12 mm),细丝4的强度增长到最大后不再增长,释放多余的能量,在其附近形成了细丝5。随着非线性介质长度的增加(14 mm),细丝5从背景中吸取能量,强度逐渐增加,与细丝3和4的强度基本一致,形成了三根稳定的细丝(3、4和5)。而细丝1和2的强度变小。随着距离的进一步增大(18 mm),细丝5的强度继续增大,而细丝3和细丝4的强度由于细丝5强度的增强而逐渐减弱。当非

线性传输距离为 20 mm 时,只剩下细丝 3 和细丝 5,且细丝 3 的强度比细丝 5 的强度要大,同时在细丝 3 的上方形成新的细丝,不过强度很弱。此时细丝 3 的周围被三根强度较弱的细丝环抱着。在非线性介质长度为 22 mm 时,只剩下细丝 3 独立的传输,强度增大。从图 4 中可以看出,随着传输距离的增加,细丝之间相互作用的过程是非常复杂的。当两根细丝之间的距离较远时,如细丝 1 和细丝 2、3、4,它们之间很难发生作用,但是细丝会扮演能量提供者的角色。而当距离较近时,如细丝 3 和 4,它们之间才会发生相互作用。最终在其他非线性效应(如饱和和非线性等效应)的共同作用下形成了单根强度较高的细丝。这一演化过程有助于理解超高强度的飞秒激光脉冲在空气中产生单根细丝的过程。

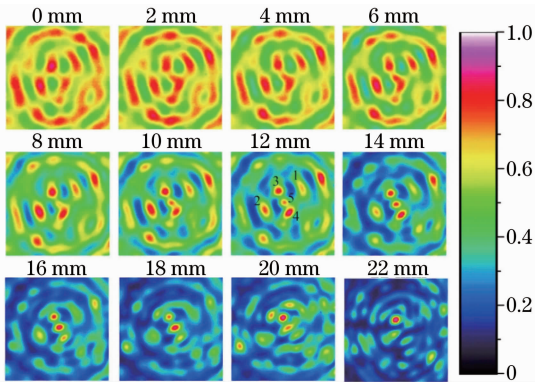


图 4 细丝之间的相互作用随传输距离的变化过程  
Fig. 4 Interaction between filaments as a function of propagation distance

为了更清晰地显示细丝 3 和细丝 4 之间相互作用的过程,图 5 给出其强度剖面分布随传输距离的变化过程。在图 5 中,分别用蓝色点线、绿色实线和

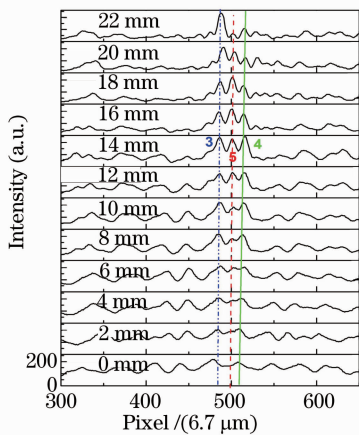


图 5 细丝 3 与细丝 4 之间相互作用强度剖面  
Fig. 5 Intensity profiles of the interaction between filament 3 and 4

红色虚线标出了细丝 3、细丝 4 和细丝 5 的位置。图 5 清晰揭示了细丝强度的变化随着传输距离的变化。细丝强度随传输距离的增加而增长,达到某一值后减小,辐射出的能量又形成了新的细丝。

### 3.3 单根细丝的演化过程

图 6 给出了单根细丝随着非线性长度变化的演化过程。以中心最亮的一根细丝为研究对象。从图 6 中可以看出,随着非线性介质长度的增加,中心细丝强度不断增加,在介质长度小于 8 mm 时,其外围环上细丝的强度也是增加的,原因在于此时的背景能量足够大,能够提供所有细丝增长所需要的能量。当非线性传输距离在 12~16 mm 时,中心最强的细丝的强度继续增大,但是外围环上的细丝得不到增长。原因在于中心细丝吸取本地能量来达到增长目的,从而导致外围环上细丝能量下降,这点从图 6 中可以明显地看出,从能量守恒的角度来看,这一过程也是正确的。此外,细丝的强度并不是无限制的增长,而是在达到一定程度后就会释放一部分能量,与其他区域中强度较低的细丝之间相互作用,形成新的细丝。在非线性传输距离达到 28 mm 时,中心的单根细丝已经分裂成了三根细丝。

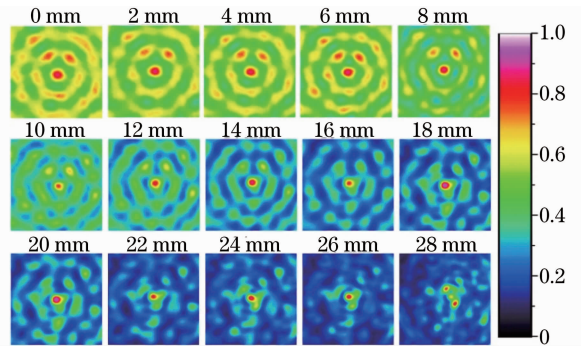


图 6 单根细丝随传输距离的演化过程  
Fig. 6 Evolution of single filament as a function of propagation distance

图 7 给出了单根细丝演化过程的剖面图,清晰显示了单根细丝强度增长、分裂及诱导新细丝产生的过程。从图 7 中可以看到,背景能量随着传输距离的增加而减小。剖面曲线除中心区域外的两端基底变小,细丝的峰值强度变大,与背景对比明显。随着传输距离的增加,主峰(红色虚线位置)的强度先增大后减小,最后分裂成三个峰。

## 4 结 论

实验研究了宽带激光脉冲在受到空间圆孔衍射调制下,在非线性介质中的演化过程。由于衍射使

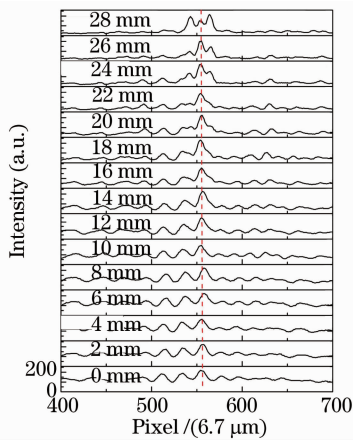


图7 单根细丝强度剖面演化过程

Fig. 7 Intensity profiles of the evolution of single filament

得激光的空间强度分布具有梯度变化,产生了空间调制,从而在非线性传输过程中发生小尺度自聚焦,导致多路细丝的形成。此外,详细研究了单根细丝的演化、细丝之间的相互作用以及多细丝的形成。结果表明:1) 单根细丝强度增加到一定值后,会释放多余的能量,诱发新细丝的形成,相距较近的细丝之间会通过干涉相互作用,使得在其附近区域生长出新细丝;2) 非线性传输过程中,细丝之间的相互作用是复杂多变的,先各自形成细丝,相互作用后形成单根稳定的细丝;3) 在一定的输入功率下,选择特定衍射格式(等价于特定的菲涅耳数)所形成的单根细丝能够在有限的距离内稳定传输,最终分裂成多根细丝。这些结果对理解强激光在空气中多路细丝的形成以及高功率激光系统中的材料损伤现象有一定的参考意义。

### 参 考 文 献

- Shen Y R. The Principles of Nonlinear Optics[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1984.
- Shimizu F. Frequency broadening in liquids by a short light pulse [J]. Phys Rev Lett, 1967, 19(19): 1097-1100.
- Alfano R R, Shapiro S L. Emission in the region 4000 to 7000 Å via four-photon coupling in glass[J]. Phys Rev Lett, 1970, 24(11): 584-587.
- Campillo A J, Shapiro S L, Suydam B R. Periodic breakup of optical beams due to self-focusing[J]. Appl Phys Lett, 1973, 23(11): 628-630.
- Boyd R W, Lukishova S G, Shen Y R. Self-Focusing: Past and Present[M]. Berlin: Springer Verlag, 2007.
- Wen Shuangchun. Research on Self-Focusing of Intense Laser Beams[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2001.  
文双春. 强激光非线性自聚焦效应研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2001.
- Bespalov V I, Talanov V I. Filamentary structure of light beams in nonlinear liquids[J]. JETP Lett, 1966, 3(12): 307-310.
- Campillo A J, Shapiro S L, Suydam B R. Relationship of self-focusing to spatial instability modes[J]. Appl Phys Lett, 1974,

24(4): 178-180.

- Chen Baosuan, Zhang Junyong, Zhang Yanli, *et al.*. Study of small-scale self-focusing in high-power laser system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(1): 010002.  
陈宝算, 张军勇, 张艳丽, 等. 高功率激光系统中的小尺度自聚焦研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 010002.
- Li Xiaoyan, Zhang Yanli, Ouyang Xiaoping, *et al.*. Effect of reflection on high power small-scale self-focusing[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2844-2848.  
李小燕, 张艳丽, 欧阳小平, 等. 寄生反射对高功率激光小尺度自聚焦的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2844-2848.
- Wang Youwen, Hu Yonghua, Wen Shuangchun, *et al.*. Relationship between nonlinear hot image and dimensions of obscurations in high-power lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(10): 1836-1841.  
王友文, 胡勇华, 文双春, 等. 高功率激光系统中非线性热像与模糊斑大小的关系[J]. 光学学报, 2007, 27(10): 1836-1841.
- Williams W, Renard P A, Manes K R, *et al.*. Modeling of Self-Focusing Experiments by Beam Propagation Codes [R]. California: LLNL Laser Program Quarterly Report (Technical Information Department University of California • Liv), 1996.
- Williams W, Trenholme J, Orth C. NIF Design Optimization [R]. California: LLNL Laser Program Quarterly Report (Lawrence Livermore National Laboratory), 1996.
- Kothari S C, Abbi S C. Instability growth and filamentation of very intense laser beams in self-focusing media[J]. Prog Theor Phys, 1990, 83(3): 414-442.
- Wen S C, Fan D Y. Small-scale self-focusing of intense laser beams in the presence of vector effect[J]. Chin Phys Lett, 2000, 17(10): 731-733.
- Wen Shuangchun, Fan Dianyuan. Small-scale self-focusing of nonparaxial laser beams[J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(3): 460-462.  
文双春, 范滇元. 非傍轴光束的小尺度自聚焦研究[J]. 物理学报, 2000, 49(3): 460-462.
- Wen Shuangchun, Fan Dianyuan. Theory of small-scale self-focusing of intense laser beams in media with gain and loss[J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(7): 1282-1286.  
文双春, 范滇元. 增益(损耗)介质中高功率激光速的小尺度自聚焦理论研究[J]. 物理学报, 2000, 49(7): 1282-1286.
- Wen Shuangchun, Fan Dianyuan. Filamentation of intense laser beam in high power laser and the B integral[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(11): 1331-1335.  
文双春, 范滇元. 高功率激光放大器中光束的成丝和B积分[J]. 光学学报, 2001, 21(11): 1331-1335.
- Wen Shuangchun, Qian Liejia, Fan Dianyuan. A study on multiple filamentation of locally modulated laser beams[J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(7): 1640-1644.  
文双春, 钱列加, 范滇元. 强光束局部小尺度调制致多路成丝现象研究[J]. 物理学报, 2003, 52(7): 1640-1644.
- Brabec T, Krausz F. Intense few-cycle laser fields; Frontiers of nonlinear optics[J]. Reviews of Modern Physics, 2000, 72(2): 545-591.
- Hou Yanchao, Fu Xiquan, Liu Hui. Temporal evolution of laser pulses with small-scale self-focusing in different spatial positions [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0302015.  
侯彦超, 傅喜泉, 刘辉. 脉冲激光小尺度自聚焦过程中不同空间位置的时间演变研究[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0302015.
- Couairon A, Mysyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media[J]. Phys Rep, 2007, 441(2-4): 47-189.
- Chin S L. Femtosecond Laser Filamentation [M]. Berlin: Springer, 2010.
- Chekalin S V, Kandidov V P. From self-focusing light beams to femtosecond laser pulse filamentation[J]. Phys-Uspkhi, 2013, 56(2): 123-140.
- Ganeev R A, Ryasnyansky A I, Baba M, *et al.*. Nonlinear refraction in CS<sub>2</sub>[J]. Appl Phys B, 2004, 78(3-4): 433-438.

栏目编辑:史敏