

超短脉冲激光空间调制下小尺度自聚焦的实验研究*

冯则胡 傅喜泉[†] 章礼富 徐慧文 文双春

(湖南大学计算机与通信学院,长沙 410082)

(2007 年 7 月 16 日收到,2007 年 10 月 11 日收到修改稿)

实验研究了超短脉冲激光的空间小尺度自聚焦的动态变化过程.具体实验过程是使经过正交细丝的衍射来实现激光的空间调制,然后通过非线性 Kerr 介质二硫化碳.随着输入功率的增大,超短脉冲开始出现小尺度自聚焦增长现象.实验发现,每个小尺度自聚焦峰值并不是随着功率的增大而无限地增长下去,而是在不同位置出现了新的调制增长点,这些新出现的增长与原有的增长相互竞争,最终导致了分裂成丝.通过数值模拟相应的传输过程,发现数值模拟结果与实验结果符合很好.

关键词:小尺度自聚焦,高功率激光,超短脉冲

PACC:4265J,4260,4260F

1. 引 言

自聚焦是非线性光学领域的一个基本物理问题,在光学、等离子体物理学和流体力学领域都有涉及,也是激光传输领域的一个重要研究方向^[1].近年来随着高功率宽带激光器的出现和快速发展,输出的脉冲宽度变得更窄,具有比常规光束更宽的频宽,功率以及功率密度越来越大(10^{18} — 10^{23} W/cm²),光束的自聚焦将出现更多新的物理特性.通常对超短脉冲自聚焦的研究主要是脉冲的整体传输过程和脉冲的调制不稳定性这两个方面,并且这两方面的特性都将随着脉冲宽度的变窄而发生很大的变化,一些高阶效应(如自陡、高阶色散、Raman 频移、时空聚焦、非傍轴等)都会随之产生并需要加以考虑^[1,2].

通常强激光束的自聚焦分为整体自聚焦(又叫全光束自聚焦)和小尺度自聚焦两类.整体自聚焦会导致光束的相位畸变,这种畸变可看作是光束自感应像差^[2].在高功率激光系统中,因为小尺度自聚焦会使光束因小的相位或振幅调制而变得局部不稳定,而且更易于发生,所以光束的小尺度自聚焦比整体自聚焦的危害性要大得多.比如在连续介质(如棒状放大器(rod amplifier))中小尺度自聚焦将使光束

分裂成一根根强度非常高的细丝,导致激光介质的局部破坏,而在级联排布的分离介质(如片状放大器(disk amplifier))中则会导致局部调制的热成像(hot-image formation),这同样可导致下游光学元件的破坏.更重要的是小尺度自聚焦还是制约高功率激光器输出功率的重要因素^[3-5].因此,尽量克服或减少这种自聚焦效应带来的危害,无论是在理论上还是在实际应用中都是非常必要的.

除了理论上对小尺度自聚焦效应的研究,在实验上对这一效应验证性的研究和分析就显得更为迫切和重要.本文通过对实验结果的研究,考察了超短激光脉冲在非线性介质中的动态传输过程,同时还数值模拟了与实验相对应的这一过程,得到了比较满意的结果.

2. 实验研究

为了从实验上考察超短激光脉冲的动态传输过程,我们建立了如图 1 所示的实验装置.实验用的激光光源为 Coherent 公司生产的商用钛宝石激光器系统,其输出中心波长为 800 nm、重复频率为 1 kHz、脉冲宽度约为 80 fs、束腰宽度为 6 mm 的高斯脉冲.实验中选用二硫化碳作为非线性介质,其非线性系数

*国家自然科学基金(批准号:10674045,10576012,60538010,10776008)高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20040532005,20070532075)和湖南省自然科学基金(批准号:06JJ20017)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: fuxq@263.net

为 $3.5 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{W}^{[6,7]}$, 长度为 20 cm. 在空间调制上使用交叉的细丝, 其直径约为 0.1 mm. 图 1 中 L_1 和 L_2 为可调衰减片, M 为十字细丝.

使用 Coherent 公司生产的 LaserCam-HR 型光斑分析仪, 其 CCD 点阵为 1280×1024 像素, 分辨率为 $6.7 \mu\text{m} \times 6.7 \mu\text{m}$.

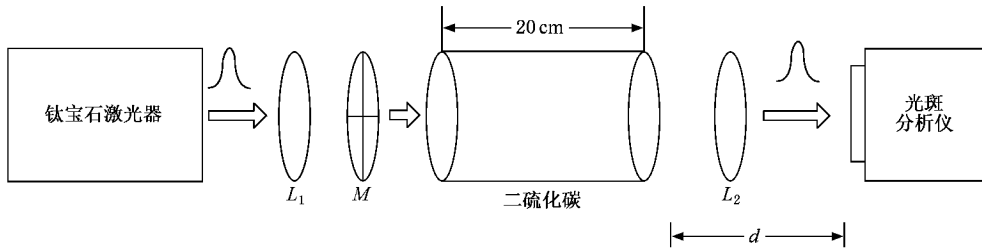


图 1 实验装置示意图

实验中, 我们先使飞秒激光脉冲通过 L_1 来控制其进入非线性介质的功率大小, 衰减片 L_1 可调节激光光束通过后的功率在 2—800 mW 之间, 每次调节功率大小为 2—35 mW 不等, 衰减片 L_2 用于保证入射到光斑分析仪的激光功率不会超过其可承受的阈值, 图 1 中的 d 为光斑分析仪与非线性介质出射面之间的距离(20 cm). 最后, 通过光斑分析仪得到相应的光斑分析图片. 图 2 中的四个光斑图是在光束入射方向不变, 也就是观测光斑位置不变的情况下

只改变输入功率 P_{in} 所测得的结果. 图 2 的 (a) (b), (c) 和 (d) 分别对应输入功率 P_{in} 为 5.95, 24.6, 33.7 和 448 mW. 这里之所以选取这四个图主要是因为在这四个功率值下小尺度自聚焦的变化最为明显, 观测得到的结果最为理想. 图 3 为 5.95—448 mW 功率范围内, 每个不同输入功率值与对应的对比度值的变化曲线, 这里定义对比度为从非线性介质出射后的光束峰值功率 P_{peak} 与输入功率 P_{in} 之比.

图 2 中从黑色到浅白色表示光强从弱到强. 从

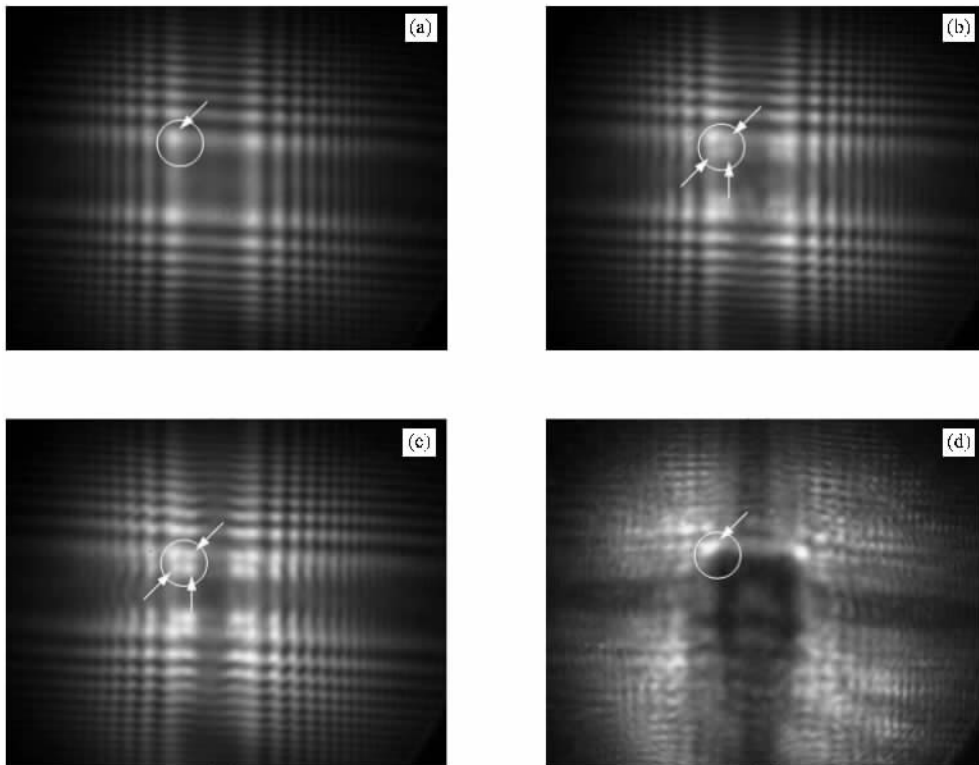


图 2 不同输入功率情况下十字细丝引起衍射调制的自聚焦增长过程. 图中的圆圈表示选取的空间调制引起自聚焦效应的变化区域. (a) 5.95 mW (b) 24.6 mW (c) 33.7 mW (d) 448 mW

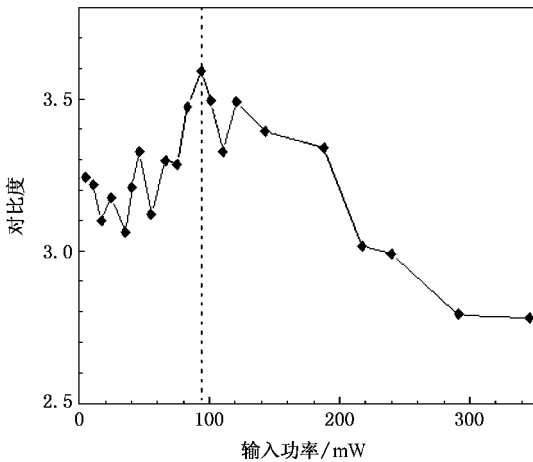


图3 激光光束的空间对比度随输入功率增长的变化 虚线表示自聚焦最大对比度值所在位置

图2可以明显看出,在空间衍射的调制下,超短激光脉冲经过非线性介质后产生了明显的小尺度自聚焦效应.因为实验中的空间调制为十字细丝,所以光束经过衍射后的图样就应该是以中心对称的呈正方形向外扩散.我们在图2中用白色圆圈选取一个比较明显的白点(图2(a)白色圆圈中的箭头所指处)作为研究对象.可以发现,在输入功率不大时(图2(a),功率为5.95 mW),白点形状为圆形,比较规则,而且其右下方没有出现新的增长点(白点),由此可知自聚焦效应还不是很明显,此时衍射调制起了主要作用.随着输入功率的增大(图2(b),功率为24.5 mW),自聚焦效应开始增强,可以看到原来的那个白点开始变亮,其右下方也开始出现新的增长点(灰白色点),我们在图2(b)白色圆圈中标出了新出现的三个灰白色增长点(箭头所指处),可是从强度上看这三个点还是比较弱(灰白色).当输入功率增大到33.7 mW时(图2(c)),白色圆圈中的变化则大不相同了,可以发现此时图中白色圆圈中的三个箭头所示位置的增长点已经明显出现.直观地看,强度上已与图2(a)中白色圆圈内的调制增长点相一致了(三个点的颜色变为亮白色),表明自聚焦效应已明显产生并逐渐占据了主导作用,同时还开始相互竞争.这也可以从整个图2(b)和(c)中白点的宏观数量上看出,白点越来越多,说明在别的位置出现了新的增长点,并且有更大的增长趋势.

我们还可以发现,新的增长点也并非无限制地增长,而是存在调制增长的最大值,这一点可以从图

3看出,随着激光输入功率的增大,对比度也不断增大,当输入功率增加到93 mW时,小尺度自聚焦效应达到了最强状态,此时对比度也达到了一个最大值(图3中的虚线位置),然后随着输入功率继续增大,先前达到自聚焦最大值时的增长点开始相互竞争,其直接后果就是导致了分裂成丝.于是自聚焦增长点的强度开始变小,对比度也开始下降,虽然也出现过部分的增长(输入功率为188 mW时),但基本没有先前的那样(虚线位置)增长强烈,之后的对比度就开始明显下降.这说明新出现的增长点的强度并没有无限地增大下去.所以,最后当输入功率增大到一定值时(图2(d),功率为448 mW),我们可以看到图2(d)中白色圆圈内的白色增长点开始有部分的消失,而相应地在别的位置(白色圆圈左上方)却出现了大量的白点.这恰好说明随着输入功率的继续增大,新的增长点并没有无限制地增大,而是与原有的其他增长点相互竞争,最后导致光束开始分裂成丝,对比度下降.

为了进一步说明超短激光脉冲小尺度自聚焦增长的这一演变过程,我们取上述四个功率值下的光斑剖面图作对比分析.图4中的四条曲线对应的输入功率 P_m 分别为5.95, 24.6, 33.7和448 mW,这里横坐标为光斑的径向位置,实验中光斑直径约为6 mm,图中两边的峰值形状上有一些不对称,是因为在实验中无法做到使光束中心与十字调制中心完全重合的缘故,但这并不影响实验结果的合理性.为明显起见,我们取与中心对称的第一个峰值作比较分析.从图4可以清楚地看出,随着输入功率的增大,

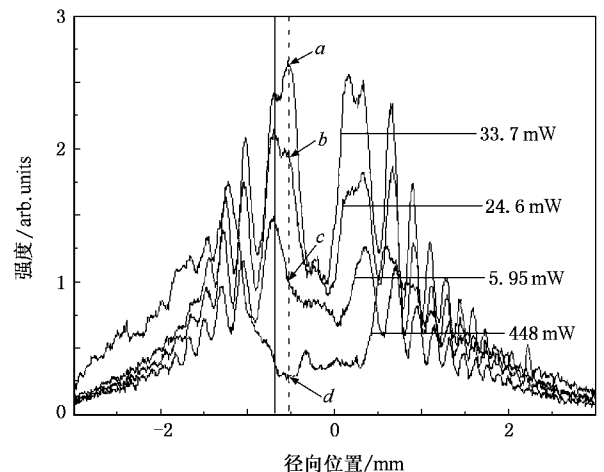


图4 激光光束中心位置空间调制下的剖面图 输入功率分别为5.95, 24.6, 33.7和448 mW

新的增长点的逐渐出现过程(图中的虚线与四条曲线的交点位置,对应的强度从下到上分别为 0.29, 1.01, 1.96 和 2.64)。首先当输入功率较小(5.95 mW)时, *c* 点位置基本没有出现增长,交点处的强度为 1.01。当输入功率增大到 24.6 mW 时,可以发现 *b* 点位置出现了一个增长,交点处的强度为 1.96,即出现了一个小的峰值,自聚焦开始发生。当输入功率继续增大到 33.7 mW 时, *a* 点所在位置出现了一个很大的增长,这个增长点的强度甚至超过了初始调制峰值的强度,此处的强度为 2.64,而对应初始调制峰值强度为 2.42。当输入功率增大到 448 mW 时, *d* 点位置增长点的强度却只有 0.29,已经远远低于前三个功率值下对应的交点处强度。这进一步表明,随着输入功率的增大,小尺度自聚焦效应开始出现并变强,而随着输入功率继续增大则开始相互竞争,最后导致分裂成丝,强度也随之下降。

从图 4 可以清楚地看到,图中虚线与四条曲线的交点位置比实线所对应的各个交点的位置(调制峰值位置)要更靠近中心,说明调制峰值与最大增长点两者不是在同一位置的,增长点要比调制峰值更靠近中心。这主要是由于实验中的调制是十字细丝衍射调制,而空间的衍射调制则受传输距离的影响,经衍射后光束传输距离的不同会使调制产生变化,所以才导致两者在位置上发生偏移。

我们还对实验得到的光强频域分布作了分析。从图 5 可以看出,调制增长是随着输入功率的增大而逐渐增大,但这个趋势也并不是一直无限地增大,

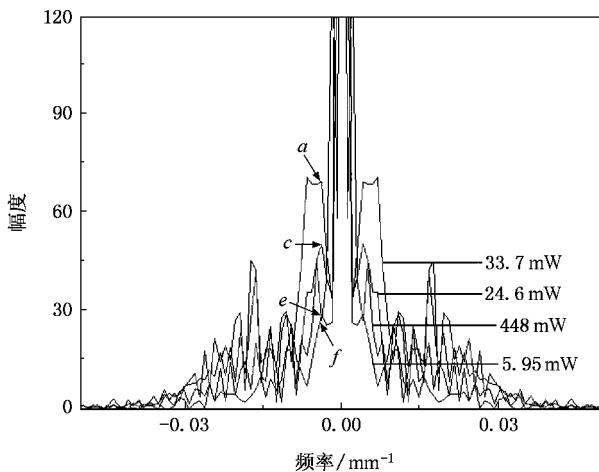


图 5 激光光束中心位置空间调制下的光强频谱 输入功率分别为 5.95 24.6 33.7 和 448 mW

而是存在一个调制增长的最大值。图 5 中已经对频域作了归一化处理,在频率为 -0.0039 时,图中 *e*, *c*, *a*, *f* 点表示调制增长在不同输入功率值(5.95, 24.6, 33.7 和 448 mW)下的变化情况。从图 5 还可以看出,按照输入功率从小到大,这四个点的调制幅度值分别为 29.1, 50.8, 69.7 和 27.4,可以发现其变化趋势也是先增大后减小,整个变化过程基本与上述分析一致。

理论上,在非线演化过程中存在光束小尺度自聚焦调制增长的临界频率和最快增长频率,在一定的输入功率下,非线性介质中小尺度调制增长的临界频率、最快增长频率及其对应的最大增益(B 积分)均随介质增益或传输距离的增大而增大^[8,9]。而实验则是在一定的介质长度条件下,也就是在一定的传输距离下所测得的结果,发现在非线性介质长度一定的情况下,光束小尺度自聚焦的增长主要是随着输入功率的增大而增大,但也并不是无限制地增大,而是存在一个最大的增长点,最后分裂成丝。

3. 数值模拟分析

为了研究超短脉冲激光在非线性 Kerr 介质中的动态传输过程,我们采用简化的(3+1)维非线性 Schrödinger 方程^[10,11]进行数值计算。由于实验中的衍射长度和非线性长度相对于色散长度是很短的,因此数值计算时忽略了色散的影响,同时还忽略了损耗的影响,最后得到的归一化(2+1)维非线性传输方程为

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = iL_{\text{diff}} \nabla_{\perp}^2 \psi + iL_{\text{nl}}(|\psi|^2 \psi). \quad (1)$$

这里

$$L_{\text{diff}} = \frac{L_D}{2\beta_0 w_r^2}$$

是衍射长度;

$$L_{\text{nl}} = \beta_0 n_2 L_D \psi_0^2 / n_0$$

是非线性长度,其中 β_0 是波数, $k(\omega)$ 是复传输常数, L_D 是归一化长度, n_0 是介质在中心频率 ω_0 处的折射率, n_2 是介质的非线性折射系数,

$$\beta_0 = n_0 \omega_0 / c,$$

$$k(\omega) = \sqrt{\epsilon(\omega)} \omega / c,$$

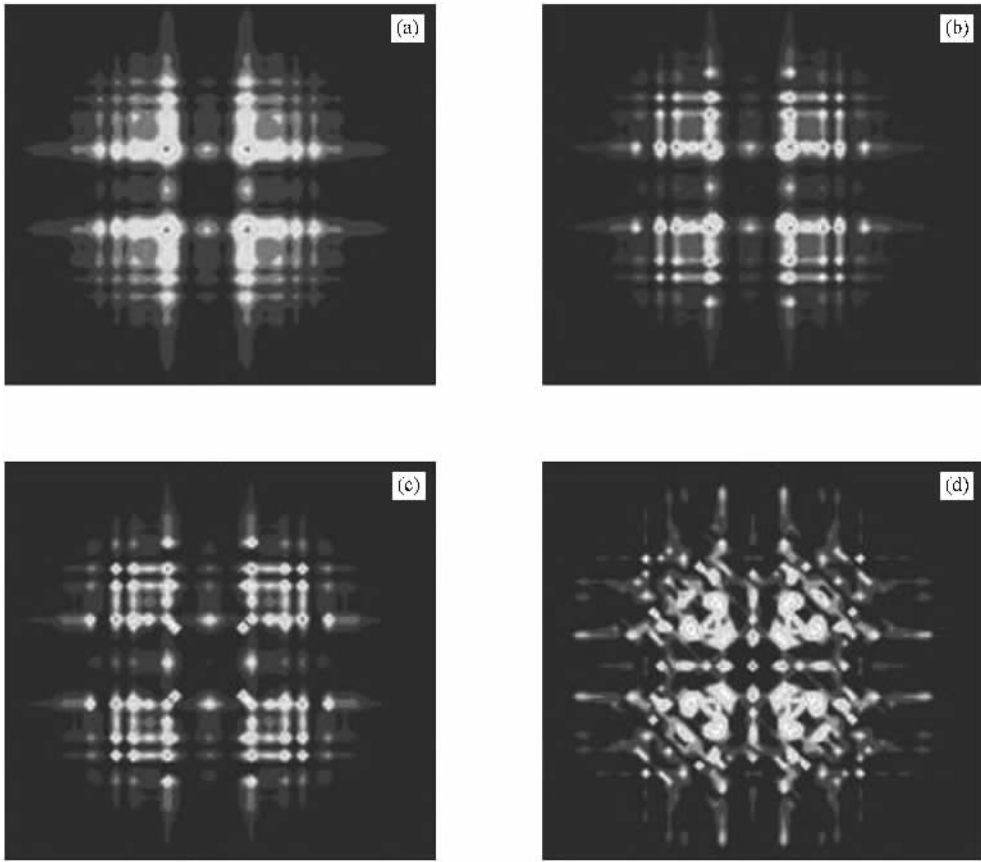


图 6 激光在二硫化碳介质中传输的数值模拟 (a)6 mW (b)26 mW (c)35 mW (d)500 mW

$$L_D = \xi/z ;$$

$$\nabla_{\perp}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

是横向拉普拉斯算符. 这里引入的空间调制细丝直径为 0.1 mm ,与实验中实际细丝直径一致.

图 6 为激光在二硫化碳介质中传输的数值模拟结果(强度分布俯视图),图中黑色到浅白色代表光强从弱到强. 图 6 (a) (b) (c)和(d)对应的输入功率 P_{in} 分别为 6 ,26 ,35 和 500 mW ,与图 2 的输入功率 P_{in} 取值基本一致. 图 6 之所以选取这四个功率值下的模拟结果 ,主要是因为在这四个功率值下小尺度自聚焦效应的变化最为明显 ,便于对比分析. 从图 6 可以比较直观地看出 ,随着输入功率的增大激光光束的小尺度自聚焦的演变情况. 图 6 基本上与图 2 所示的变化情况一致. 同时 ,从图 7 可以发现对比度曲线的变化趋势也基本上与图 3 的曲线变化趋势一致. 从图 7 还可以看出 ,随着输入功率的增大 ,对比度存在一个最大值(图 7 中的虚线位置 ,约 71 mW 处),随后对比度又开始变小. 这

也进一步补充验证了实验得到的结果 :随着输入功率的增大 ,调制增长并不是无限地增大下去 ,而是在一个特定的功率值下开始分裂成丝 ,对比度下降 .

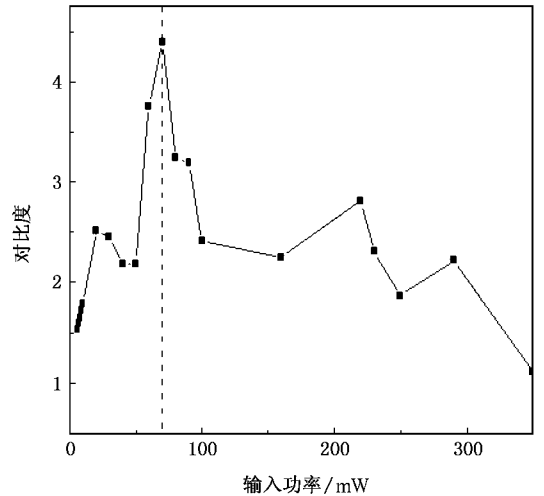


图 7 激光光束的空间对比度随输入功率增长的数值模拟变化 虚线表示自聚焦最大对比度值所在位置

4. 结 论

本文实验研究了超短激光脉冲在空间调制下的小尺度自聚焦增长的动态传输过程. 通过实验和相应的数值模拟分析, 发现实验结果与数值模拟结果符合很好. 在一定的空间调制下, 随着输入功率的逐渐增大, 超短激光脉冲的小尺度自聚焦的演变过程大致是先小尺度自聚焦增长, 但并非无限增长而是在其他位置出现新的增长, 随后增长变得缓慢, 最后

这些增长之间发生多路竞争及分裂成丝. 这也从另外一个角度说明强激光光束在非线性传输过程中的确是经历了先自聚焦成丝, 然后竞争分裂进而复原, 最后再成丝及复原的过程. 同时, 通过研究还发现, 由于采用的是空间衍射调制, 使得调制增长点与调制峰值位置并不相同, 一般情况下调制增长点都出现在调制峰值稍微靠前一点(或是靠近中心)的位置. 这些研究无论是对于高功率宽带激光传输理论与技术的发展, 还是对大型激光器的设计与制作都有一定的参考价值.

- [1] Wen S C 2001 *Ph. D. Dissertation*(Shanghai : Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences)(in Chinese)
[文双春 2001 博士学位论文(上海 :中国科学院上海光学精密机械研究所)]
- [2] Wen S C , Fan D Y 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1282 (in Chinese)
[文双春、范滇元 2000 物理学报 **49** 1282]
- [3] Rozanov N N , Smimov V A 1980 *Sov. J. Quantum Electron.* **10** 232
- [4] Hunt J H , Renard P A , Simmons W W 1977 *Appl. Opt.* **16** 779
- [5] 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]

- [6] Ganeev R A , Rysnyansky A I , Baba M , Suzuki M , Ishizawa N , Turu M , Sakakibara S , Kuroda H 2004 *Appl. Phys. B* **78** 433
- [7] Centurion M , Pu Y , Tsang M , Psaltis D 2005 *Phys. Rev. A* **71** 063811
- [8] Wen S C , Fan D Y 2002 *Sci. China* **45** 1192
- [9] Wen S C , Fan D Y 2001 *Acta Opt. Sin.* **21** 1458 (in Chinese) [文双春、范滇元 2001 光学学报 **21** 1458]
- [10] Brabec T , Krausz F 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 3282
- [11] Zozulya A A , Diddams S A , Van Engen A G , Clement T S 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 1430

Experimental research of small-scale self-focusing of ultrashort pulse with spatial modulation *

Feng Ze-Hu Fu Xi-Quan[†] Zhang Li-Fu Xu Hui-Wen Wen Shuang-Chun

(School of Computer and Communication , Hunan University , Changsha 410082 , China)

(Received 16 July 2007 ; revised manuscript received 11 October 2007)

Abstract

The dynamic process of the small-scale self-focusing of ultrashort laser pulse is experimentally investigated. By using tabletop femtosecond laser , the pulse which is spatially modulated by the crossed-fiber diffraction passes through the carbon bisulfide. With different input power , the small-scale self-focusing of the pulse was obtained. By analyzing the contrast of the beam , we find that the small-scale self-focusing does not increase all along with the increasing of input power , but some new growth points appear in different places. They compete with each other , and finally lead to multiple splitting. The experimental results confirmed the numerical simulation.

Keywords : small-scale self-focusing , high-power laser , ultrashort laser

PACC : 4265J , 4260 , 4260F

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 10674045 , 10576012 , 60538010 , 10776008) , the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education of China(Grant Nos. 20040532005 , 20070532075) and the Natural Science Foundation of Hunan Province , China(Grant No. 06JJ20017).

[†] Corresponding author. E-mail : fluxq@263.net