

强光束局部小尺度调制致多路成丝现象研究^{*}

文双春^{1) 2)} 钱列加²⁾ 范滇元^{2) 3)}

¹⁾ 湖南大学计算机与通信学院通信工程系, 长沙 410082)

²⁾ 复旦大学信息科学与工程学院光科学与工程系, 上海 200433)

³⁾ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

(2002 年 9 月 16 日收到, 2002 年 11 月 26 日收到修改稿)

基于非线性 Schrödinger 方程模拟了 Kerr 介质中强光束局部小尺度调制致光束多路成丝现象, 发现在一定的 B 积分范围内, 光束局部小尺度调制基本上只从该局部本底场中吸收能量获得增长, 从而将该局部光束分裂成细丝. 当光束不同部分的小尺度调制相隔较远时, 各细丝的演化基本上不相关.

关键词: 自聚焦, 多路成丝, 非线性 Schrödinger 方程

PACC: 4265J

1. 引言

在诸如等离子体物理学、非线性光学等非线性物理领域中常常会出现激光束成丝现象^[1-3]. 在非线形光学中, 成丝现象一般可分为整体成丝和小尺度成丝或多路成丝, 分别由光束的整体自聚焦和小尺度自聚焦效应引起. 自非线性光学诞生以来, 成丝现象一直受到高功率激光器的研制者和使用者的高度重视. 在用于惯性约束聚变的高功率固体激光器中, 光束成丝是导致光束质量变坏和限制激光器最大输出功率的主要因素. 正如美国 Lawrence Livermore 国家实验室(LLNL)报告所述, 成丝, 特别是多路成丝, 一直是激光器总体设计、工程研制和安全运行的重要问题^[4, 5]. 所以就高功率激光器的研制而言, 光束成丝是一种有害的效应. 我们研究它是为了有效地消除或防范它. 然而, 光束成丝也有有利的一面, 如在目前的热点研究课题飞秒激光大气非线性传输中, 激光束的成丝现象已显现出其在激光雷达、大气遥感等方面的应用前景^[6, 7].

多路成丝现象的基本规律已于上世纪 60 年代由 Bespalov 和 Talanov 揭示出来^[8]. 随后, Bespalov-Talanov 理论得到各种各样的推广或修正^[9-13], 以便使其更适用于所考虑的各种实际问题. 尽管如此, 这些

理论还有不完善的地方, 尤其是以前的文献所考虑的都是整个光束受到相同调制的情况. 实际情况往往是光束的局部受到调制, 或者即使是整个光束都受到调制, 但每个部分的调制情况不一定相同. 这样产生疑问: 光束局部调制的演化是导致光束局部成丝还是会影晌其他部分? 光束不同部分的调制的演化有什么联系? 本文利用 Bespalov-Talanov 近似理论的预言, 并通过数值求解光束在非线形 Kerr 介质中所遵循的非线形 Schrödinger 方程, 回答了这些问题, 从而揭示了光束局部调制的演化规律. 这些规律对高功率固体激光器的研制和运行有帮助. 因为根据这一规律, 在实际工作中, 工作人员可以根据光学元件的损伤部位准确判断出上游光束的哪一部分受到最危险的小尺度调制.

2. 光束成丝的基本规律

Bespalov 和 Talanov 关于小尺度自聚焦的经典理论^[8]对成丝现象给出了比较简单而清晰的理解. 该理论基于如下准稳态波动方程:

$$2ik \frac{\partial A}{\partial z} + \nabla_{\perp}^2 A + k^2 \frac{n_2}{n_0} |A|^2 A = 0, \quad (1)$$

式中 A 为光场的慢变包络, k 为光波波数, n_0 和 n_2 分别为介质的线性折射率和非线性折射系数, $\nabla_{\perp}^2 =$

^{*} 国家高技术惯性约束聚变基金和国家博士后科学基金(批准号 2002032137)资助的课题.

[†] E-mail: wenshun@sina.com

$\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ 为横向 Laplace 算符.

将方程 (1) 的受调制的稳态波解

$$A(x, y, z) = \bar{A}_0(x, y, z) + a(x, y, z), \quad (2)$$

式中 $\bar{A}_0(x, y, z) = A_0 \exp[ikn_2 A_0^2(2n_0)]$ 为方程 (1) 的稳态波解, 其中 A_0 为光包络的初始振幅, a 为叠加在稳态波解上的弱调制 ($|a| \ll |\bar{A}_0|$), 假设其调制频率 (严格地讲是横向波矢) 为 $q = (q_x, q_y)$, 代入方程 (1) 并对 a 线性化, 可以得到调制场的增长率

$$g = \frac{q}{2k} \sqrt{q_c^2 - q^2}, \quad (3)$$

式中 $q_c = \sqrt{2n_2/n_0} A_0 k$ 为调制场增长的临界频率. (3) 式决定了调制场的每一个谱分量 (对应于 q) 在传输过程中的变化. 初始调制一般是无规的, 可以把它分解为许多不同空间波数的周期性调制波之和, 其中有一个波数的调制波增长最快, 经过一段距离之后它就占了优势, 形成基本上有规则分布的细丝, 这就是光束分裂或多路成丝现象. 由 (3) 式可得到小尺度调制的最快增长频率 q_{\max} 和最大增长率 g_{\max} 的表达式

$$q_{\max} = \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} A_0 k; \quad g_{\max} = k \frac{n_2}{2n_0} A_0^2. \quad (4)$$

相应的最快调制波长为

$$l_{\text{mod}} = 2\pi/q_{\max} = 2\pi(\sqrt{n_2/n_0} k A_0).$$

所以对于横向尺寸为 $L \times L$ 的光束, 在经过一定的传输距离 z_{mod} 后将分裂成 $N = L/l_{\text{mod}}$ 根细丝. 简单地, 这个成丝距离定义为调制幅度增加 $e \approx 2.7$ 倍所需要的传输距离, 对最快增长频率的调制场, 它为 $z_{\text{mod}} \approx g_{\max}^{-1}$. 若将初始调制水平考虑进来, Suydam^[14] 发现, 对于相对于本底强度为 $\delta = |a_0|/|A_0|$ 的调制场, 小尺度成丝的特征长度为 $z_{\text{mod}} \approx g_{\max}^{-1} \ln(3/\delta)$. Campillo 等人^[15] 实验发现这个表达式在定性方面是正确的.

美国 Lawrence Livermore 国家实验室的科学家最先将上述理论用于高功率激光系统并定义 B 积分, $B(z) = \int_0^z g_{\max} dz'$, 作为强激光系统设计的重要判据之一, 用以衡量小尺度非线性效应的程度. 为确保高功率激光器的安全运行, 通常将光束经过上游和下游两个元件之间的 B 积分累积值限制在某个确定值以内, 如在美国国家点火装置 (NIF) 的设计中, 将 B 积分累积值限制在 2 以内^[4, 5], 实验表明, 超过该值时, 光束将会因为小尺度自聚焦效应而分裂成细丝, 从而导致下游元件的损坏. 在下面的分析

中, 将主要模拟光束在 $B = 2$ 附近的多路成丝情况.

3. 光束局部小尺度调制致多路成丝的基本规律

上述解析扰动理论的一个基本假设是本底光束 (稳态波解) 和叠加在其上的小尺度调制场均有无穷大的尺寸, 且只适用于调制场幅值远远小于本底场幅值时的情形. 对于强调制情形, 必须使用数值方法模拟光束的成丝过程. 在这方面, 美国 Lawrence Livermore 国家实验室凭借其强大的计算机硬件和软件实力, 开发出目前世界上最先进的一套大型激光系统模拟软件 PROP92. 我们根据高功率激光驱动器中光束传输的物理模型也自主开发了能模拟光束非线性传输和部分典型的线性传输过程的程序^[16]. 下面利用我们的程序研究光束局部小尺度调制所致成丝现象.

利用著名的分步 Fourier 方法数值求解方程 (1), 初始输入光束为 (2) 式, 其中 \bar{A}_0 取强度为 $5\text{GW}/\text{cm}^2$ 的平面波, 调制场 a 可以取正弦型或高斯型, 其中正弦型调制场的频率和高斯型调制场的宽度分别取 Bespalov-Talanov 理论所预言的对应于本底光强的最快增长频率 q_{\max} 和最快增长波长 l_{mod} .

图 1 示出叠加于平面波之上的局部正弦调制场导致光束局部小尺度成丝的情况. 图 1(a)(b)(c) 分别为 B 积分为 (初始输入光束) 1.8 和 2.2 时的光强分布. 由图 1 可看出, 在 B 积分处于限制值 2 附近时 (图 1(b) 和 (c)), 小尺度调制场从调制场所所在的本底场局部吸收能量, 获得增长, 并逐步形成细丝, 而除调制场附近的本底场有些许起伏外, 其他部分的本底场基本上没有变化. B 积分值越大, 细丝的强度越大而直径越细, 预示着局部小尺度调制场的增长最终将把该局部本底场分裂成强度非常高的细丝. 这说明光束局部调制基本上只影响该局部的光束质量, 小尺度调制基本上只从该局部吸收能量获得增长, 从而将该局部分裂成细丝. 在成丝的较早阶段更是如此. 图 2 和图 3 更进一步说明了这一点.

图 2 和图 3 分别为平面波受到两个相距较远和较近的高斯调制时的演化情况. 当两个调制相距较远时, 它们各自从其所在局部本底场中提取能量并逐渐形成细丝, 互不相关且对光束的其他部分基本上不产生影响, 如图 2 所示. 而当两个调制相距较近时, 如图 3 所示, 它们除了各自从其所在局部本底场中提取能量外, 还互相竞争从它们的公共部分提取

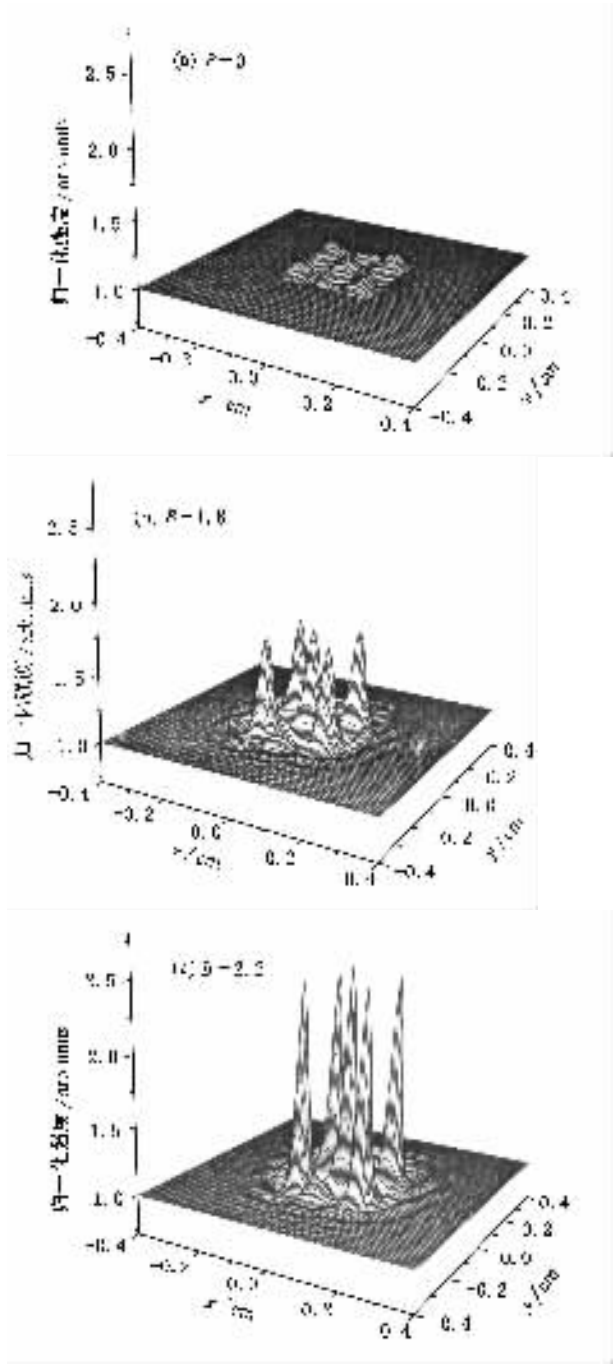


图 1 B 积分分别等于 0, 1.8 和 2.2 时受局部正弦调制的平面波的强度分布

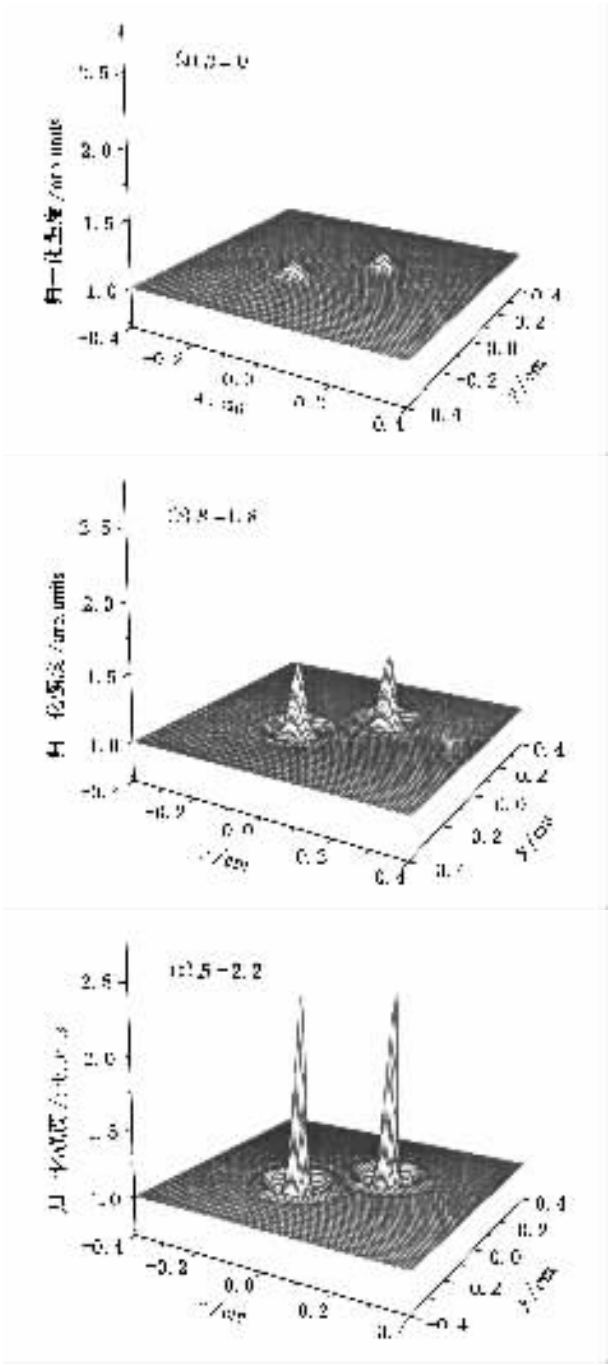


图 2 B 积分分别等于 0, 1.8 和 2.2 时受两个相距较远的高斯调制场调制的平面波的强度分布

能量获得增长并形成细丝. 显然, 由于这种情形下两个调制各自能提取能量的总量比前一种情形小, 所以它们增长的幅度比前一种情形小.

由此可以得出局部调制的演化所遵循的规律. 光束的局部小尺度调制基本上满足局部能量守恒定律. 光束局部小尺度调制基本上只从该局部本底场中吸收能量获得增长, 从而将该局部光束分裂成细丝. 当光束不同部分的小尺度调制相隔较远时, 它们

的演化基本上是不相关的. 注意到 Bespalov-Talanov 理论是线性理论, 它只能预言成丝的早期行为. 所以我们的结果至少在 Bespalov-Talanov 理论范围内合理.

上述结论与早期的自聚焦实验结果相符. 这些实验结果指出, 光束成丝后, 每根细丝与特定的振幅或相位调制相对应, 亦即细丝与调制之间一一对应^[17, 18]. 此外, 我们利用 Bespalov-Talanov 理论进行简

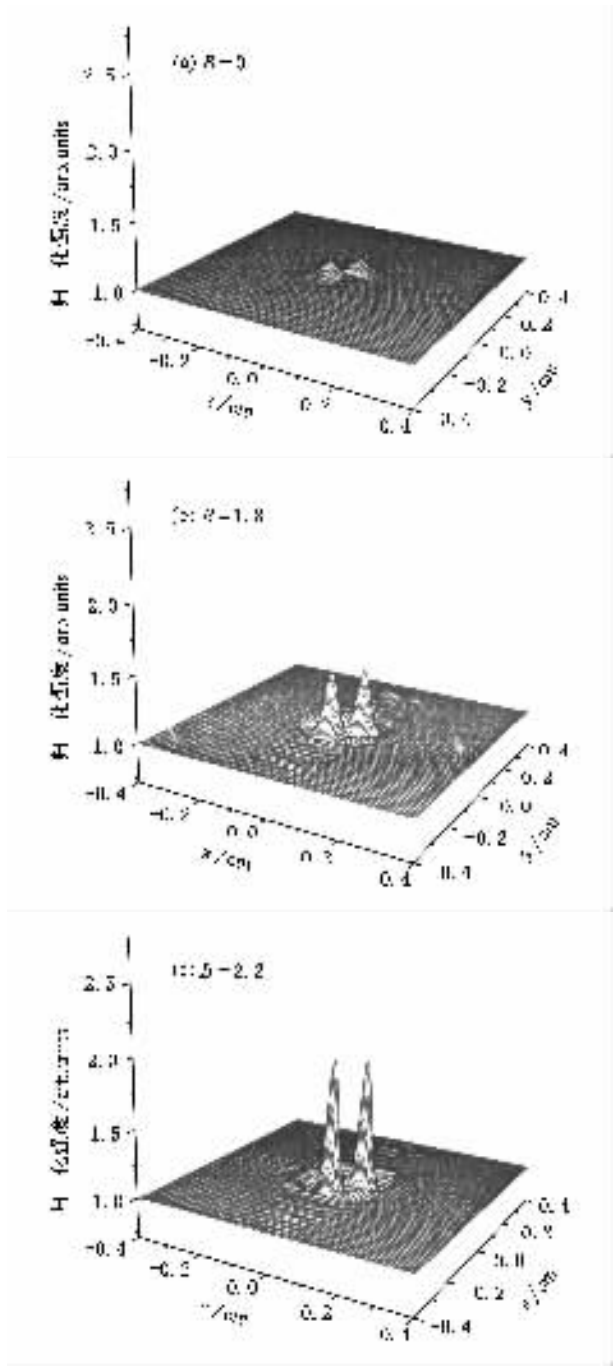


图3 B 积分分别等于 0, 1.8 和 2.2 时受两个相距较近的高斯调制场调制的平面波的强度分布

单分析,也会发现上述结论合理.以受二维正弦调制的平面波的演化为例.由 Bessel-Talanov 理论知,最快增长形成的细丝包含的功率是恒定的,这个功率是初始入射时最快增长频谱对应的二维周期调制在光束截面上形成周期性网格,每个网格中包含的功率.所以在线性理论范围内或在一定的 B 积分范围内,细丝的强度增大但其能量基本上是守恒的.局部小尺度调制成丝与否取决于初始时其分割的单个网格中所包含的功率是否高于自聚焦临界功率,与光束其他部分的情况关系不大.当然,随着光束的进一步演化,由于强非线性作用,光束不同部位的相互作用将比较明显.

上述结果对实际工作有意义,因为根据这一规律,在实际工作中,工作人员可以根据光学元件的损伤部位准确判断出上游光束的哪一部分受到最危险的小尺度调制.

4. 结 论

本文利用数值方法研究了强光束受到局部小尺度调制时的多路成丝现象,发现在高功率激光器的 B 积分限制值附近光束的局部调制基本上满足局部能量守恒定律,即局部调制的增长只从该局部的本底光场中提取能量获得增长,而且基本上不影响其他部分的传输特性.根据这一规律,在实际工作中,工作人员可以根据光学元件的损伤部位准确判断出上游光束的哪一部分受到最危险的小尺度调制.

[1] Shen Y R 1984 *The Principles of Nonlinear Optics*(New York :John Wiley & Sons) chap 17

[2] Wen S C and Fan D Y 2001 *Chin. Phys.* **10** 1032

[3] Wang S F *et al* 2001 *Chin. Phys.* **10** 735

[4] Williams W *et al* 1996 *LLNL Laser Program Quarterly Report UCRL-LR-105821-96-1* 1

[5] Williams W *et al* 1996 *LLNL Laser Program Quarterly Report UCRL-LR-105821-96-4* 181

[6] Braun A *et al* 1995 *Opt. Lett.* **20** 73

[7] Day C 2001 *Phys. Today* **58** 17

[8] Bessel V I and Talanov V I 1966 *JETP Lett.* **3** 307

[9] Kothari N C and Abbi S C 1990 *Prog. Theor. Phys.* **83** 414

[10] Wen S C and Fan D Y 2000 *Chin . Phys . Lett .* **17** 731

[11] Wen S C and Fan D Y 2000 *Acta Phys . Sin .* **49** 460(in Chinese)
[文双春、范滇元 2000 物理学报 **49** 460]

[12] Wen S C and Fan D Y 2000 *Acta Phys . Sin .* **49** 1282(in Chinese)
[文双春、范滇元 2000 物理学报 **49** 1282]

[13] Wen S C and Fan D Y 2001 *Acta Opt . Sin .* **21** 1331(in Chinese)
[文双春、范滇元 2001 光学学报 **21** 1331]

[14] Suydam B R 1974 *IEEE J . Quantum Electron .* **10** 837

[15] Campillo A J ,Shapiro S L and Suydam B R 1973 *Appl . Phys . Lett .* **23** 628

[16] Wen S C 2001 *PhD Thesis* Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics ,Chinese Academy of Sciences (in Chinese) 文双春 2001 博士学位论文 ,中国科学院上海光学精密机械研究所]

[17] Abbi S C and Mahr H 1971 *Phys . Rev . Lett .* **26** 604

[18] Campillo A J ,Shapiro S L and Suydam B R 1974 *Appl . Phys . Lett .* **24** 178

A study on multiple filamentation of locally modulated laser beams^{*}

Wen Shuang-Chun^{1 2)} Qian Lie-Jia²⁾ Fan Dian-Yuan^{2 3)}

¹⁾(*Department of Communication Engineering ,College of Computer and Communication ,Hunan University ,Changsha 410082 ,China*)
²⁾(*Department of Optical Science and Engineering ,School of Information Science and Engineering ,Fudan University ,Shanghai 200433 ,China*)
³⁾(*State Key Laboratory on High Power Laser and Physics ,Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences ,Shanghai 201800 ,China*)

(Received 16 September 2002 ; revised manuscript received 26 November 2002)

Abstract

Based on the nonlinear Schrödinger equation ,we have simulated the multiple filamentation of locally modulated laser beams , and found that for *B* integral smaller than some values the local modulations grow to form filaments mainly by drawing energy from that part of background beam ;the evolution of two parts of local modulation are basically independent if they are sufficiently far away from each other.

Keywords : self-focusing , filamentation , nonlinear Schrödinger equation
PACC : 4265J

^{*} Project supported by the National High Technology Inertial Confinement Fusion Foundation of China ,and the Science Foundation for Post Doctorate of China (Grant No.2002032137).