

平顶光束经表面有缺陷的厚非线性介质后的光强分布*

陈雪琼¹⁾ 陈子阳¹⁾ 蒲继雄^{1)†} 朱健强²⁾ 张国文²⁾

1) (华侨大学信息科学与工程学院, 厦门 361021)

2) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

(2012年7月11日收到; 2012年8月25日收到修改稿)

基于非线性薛定谔方程和分步傅里叶算法, 研究了高功率平顶高斯光束经过厚非线性介质后在自由空间传输的光强演变过程, 详细分析了介质表面缺陷对光强演化规律的影响. 研究表明, 平顶阶数越大, 光束的自聚焦效果越差, 最大光强点越靠近介质后表面. 入射光束的初始场强越强, 介质的厚度和非线性系数越大, 光束的自聚焦越强, 且极值点越靠近介质后表面. 介质表面的缺陷使得光束在靠近介质后表面有较大的光强. 并且相位调制型缺陷比振幅调制型缺陷对光强的影响更大.

关键词: 平顶光束, 自聚焦, 缺陷, 光强分布

PACS: 42.65.-k, 42.65.Jx, 42.30.Kq, 02.30.Nw

DOI: 10.7498/aps.62.044213

1 引言

高功率激光光束通过非线性介质的传输特性, 一直是研究的热点之一. 光学元件的好坏决定了光束的质量, 而光束质量如果变差又会导致光学元件受损. 光学元件在加工、研磨和实际使用失误及清洁等问题都会导致元件的缺陷^[1,2]. 就对光场的作用来看, 可以分为振幅调制和相位调制型缺陷, 通常元件表面的灰尘、内部杂质颗粒等是振幅型缺陷, 改变入射光束的透过率大小. 而元件的刮痕、亚表面损伤、凸起等是相位型缺陷, 改变入射光束的相位. 高功率光束经过非线性元件和表面缺陷诱导损伤是一个重要的研究课题. 关于光学元件的缺陷分布对光束质量的影响, 通常采用功率谱密度 (power spectral density, PSD) 的方法来描述缺陷, 并且得到了光学元件缺陷分布功率谱密度与光束近场强度分布 PSD 之间的定量关系^[3,4]. 例如, 光束通过表面有缺陷的非线性光学元件后的光强分布变得更加复杂, 光束质量畸变更严重, 会产生光束

小尺度自聚焦^[5-9]和热像效应^[10-13], 介质的损坏阈值较高的情况下, 受到小尺度调制的光束在传输过程中会出现周期性成丝过程^[14]. Bespalov 和 Talanov^[15]关于小尺度自聚焦的经典理论对成丝现象给出了比较简单而清晰的解释, 该理论给出了小尺度扰动的最快增长频率、最大增长系数和 B 积分等重要结果, 其中 B 积分成为了非线性效应的程度的判据. 一般高功率激光器采用的是平顶型光束, 因此研究有缺陷的元件对平顶光束传输的影响及光束的自聚焦具有重要的意义. 本文基于非线性薛定谔方程, 研究高功率平顶光束在厚非线性介质和自由空间中的传输演变过程, 重点讨论有缺陷的情况, 以及参数变化对光束最强焦点和光场分布的影响. 所得研究结果对激光诱导损伤和光学元件的安全稳定运行具有一定的参考价值.

2 理论基础

在数值计算中, 二维平顶高斯光束的场分布表

* 国家自然科学基金 (批准号: 60977068, 61178015) 和高功率激光物理重点实验室开放基金 (批准号: SG-001102) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: jixiong@hqu.edu.cn

示为 [16]

$$E(x,0) = A_0 \exp\left(-\frac{(N+1)x^2}{w_0^2}\right) \times \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[\frac{(N+1)x^2}{w_0^2}\right]^n, \quad (1)$$

其中, A_0 为初始振幅, w_0 为光束束腰半径, N 为平顶阶数, 当 $N = 0$, 则退化为普通的高斯光束.

单色高功率光束传输时可以忽略群速度色散, 只考虑衍射、非线性自聚焦和光的放大与损耗三种物理过程. 在这里只考虑前两种过程, 则非线性薛定谔 (NLS) 方程简化为 [9]

$$2ik_0 \frac{\partial E}{\partial z} + \nabla_{\perp}^2 E + 2k_0^2 \frac{n_2}{n_0} |E|^2 E = 0, \quad (2)$$

这里, $k_0 = n_0 \omega / c$ 是传输常数, n_0 是介质的线性折射率, n_2 是非线性折射率系数, 式中第二、第三项分别表示衍射作用、非线性作用.

平顶光束经过有缺陷的厚非线性介质的传输过程是: 总光场先经过非线性介质传输 L 距离, 其间包括衍射的作用和介质的非线性效应, 接着是光场出射后在自由空间的传输过程.

光学元件的缺陷会对激光光束产生调制, 使得出射光束发生畸变, 光强分布更加复杂, 破坏光束的均匀度, 引起自聚焦效应, 光束分裂成细丝对非线性元件造成损伤, 甚至破坏元器件. 在实际中, 光学元件不是理想的, 由于元件的制备和加工、后期实验操作和清洁等都会造成元件的各种缺陷, 例如刮痕、亚表面缺陷等, 主要表现为引起相位延迟的相位调制型缺陷. 元件内部杂质、表面灰尘等, 主要表现为改变振幅透过率的振幅调制型缺陷.

一般情况下, 元件在加工和使用中不可避免地会引入对光束振幅或相位的局域调制. 其透过率函数为 [17]

$$T(x,y,z) = [1 - h(x,y,z)] e^{i\phi(x,y,z)}, \quad (3)$$

其中 $h(x,y,z)$ 为缺陷元件振幅挡光率的空间分布 (即振幅调制函数), $e^{i\phi(x,y,z)}$ 为缺陷元件位相畸变的空间分布 (即相位调制函数). 本文针对这两种缺陷对高功率激光光束的影响展开研究. 结合实际情况, 取缺陷的振幅透过率为高斯型, 则其透过率为

$$t_1(x,y) = 1 - A \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{a^2}\right], \quad (4)$$

式中 (x_0, y_0) 为振幅调制中心位置坐标, A 为振幅调制幅度, 它决定了缺陷的振幅挡光率大小, a 为缺陷半径. 而对于位相调制型缺陷可表示为 [18]

$$t(x,y) = \exp[i\Phi(x,y)], \quad (5)$$

$$\Phi(x,y) = \phi \exp\left\{-\left[\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2}\right]\right\}, \quad (6)$$

这里, $\phi = \frac{2(n-1)\pi h}{\lambda}$ 表示相位调制深度, h 表示缺陷深度, n 表示介质材料折射率, (x_0, y_0) 表示相位调制中心位置坐标, a 表示横向坐标 x 方向调制半径, b 表示纵向坐标 y 方向调制半径.

下面以图 1 物理模型并用 (4)—(6) 式作为缺陷的数学模型做数值模拟分析, 研究平顶光束经过表面有缺陷的厚非线性介质分别在介质和自由空间中的光强分布.

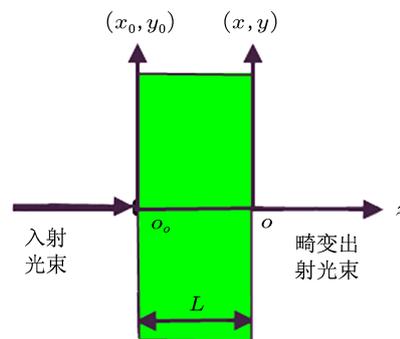


图 1 平顶光束经过非线性介质示意图

3 数值分析与讨论

NLS 方程 (2) 是一个非线性偏微分方程, 在不是薄近似和不忽略衍射的情况下, 没有解析解. 为数值求解 NLS, 采用分步傅里叶方法 (split-step Fourier method), 把衍射和非线性效应分别用不同的算子表示, 作用于介质的不同段, 用傅里叶频率表示算子, 用有限傅里叶变换 (FFT) 计算. 入射光束是波长为 $1.054 \mu\text{m}$ 的 10 阶平顶高斯光束, 束腰半径 w_0 取 0.003 m , 入射光强度大小 10^{16} W/m^2 . 非线性介质的线性折射率 n_0 取 1.528 , 缺陷半径取 $80 \mu\text{m}$. 本文中的相对光强是指相对入射光强而言, 即光强的增大倍数.

图 2(a) 为平顶光束经过非线性系数 $n_2 = 2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 的介质在非线性介质中的光场演变过程. 当介质厚度 L 较小时不会在介质中产生聚焦, 仍保持平顶传输, 这里厚度 $L = 6 \text{ cm}$ 附近时, 边缘的光场强度开始变大而且出现很多分裂的强细丝, 会对介质产生光损伤甚至破坏介质. 平顶光束在传输中光场分布变成中心小、两边大, 在介质的作用下, 光束的相位延迟不一样. 图 2(b) 是介质厚度取 4 cm 的情况下, 平顶光束出介质后在自由空间的光场传输变化. 由于介质的非线性效应, 光束

在介质后面一定距离内光强增强, 大约在 1 m 处光场强度达到最大值, 出现自聚焦. 图 3 是图 2(b) 中

的横向光场曲线, 光束经过非线性介质后光场强度变得不均匀, 在近距离处中心光强变小.

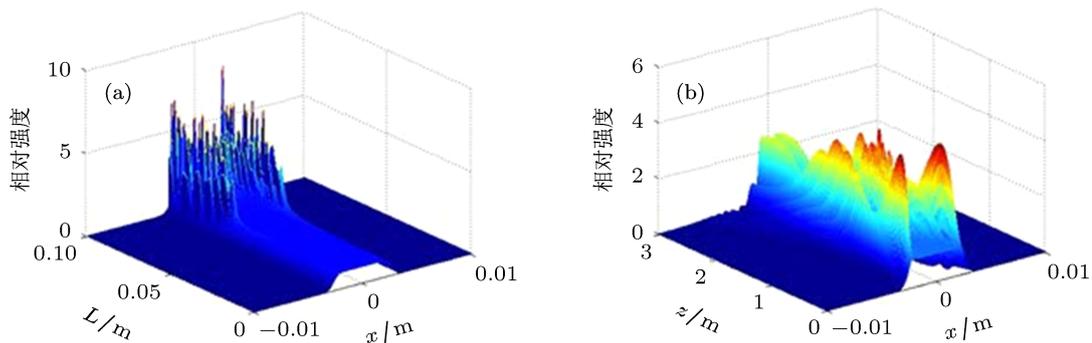


图 2 平顶光束传输过程光强演化, $L = 4 \text{ cm}$, $n_2 = 2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ (a) 光束在介质内传输中的光场分布; (b) 光束从介质输出后的光强演变

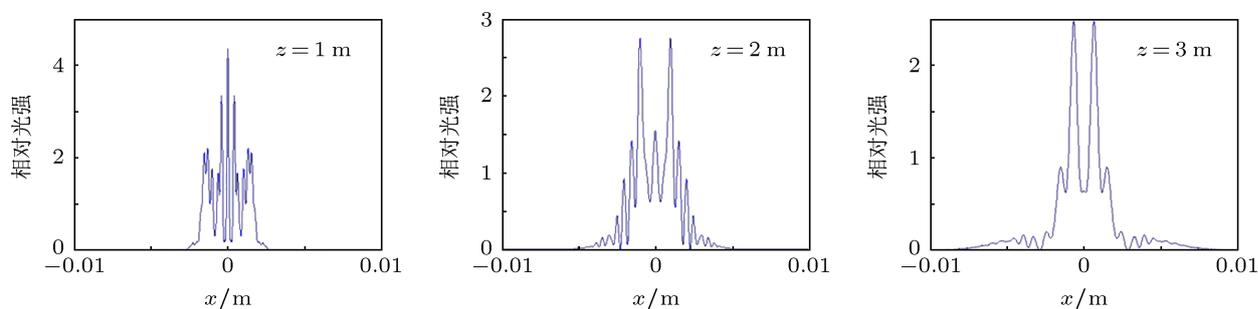


图 3 光束从自聚焦介质出射后在自由空间传输的二维曲线图

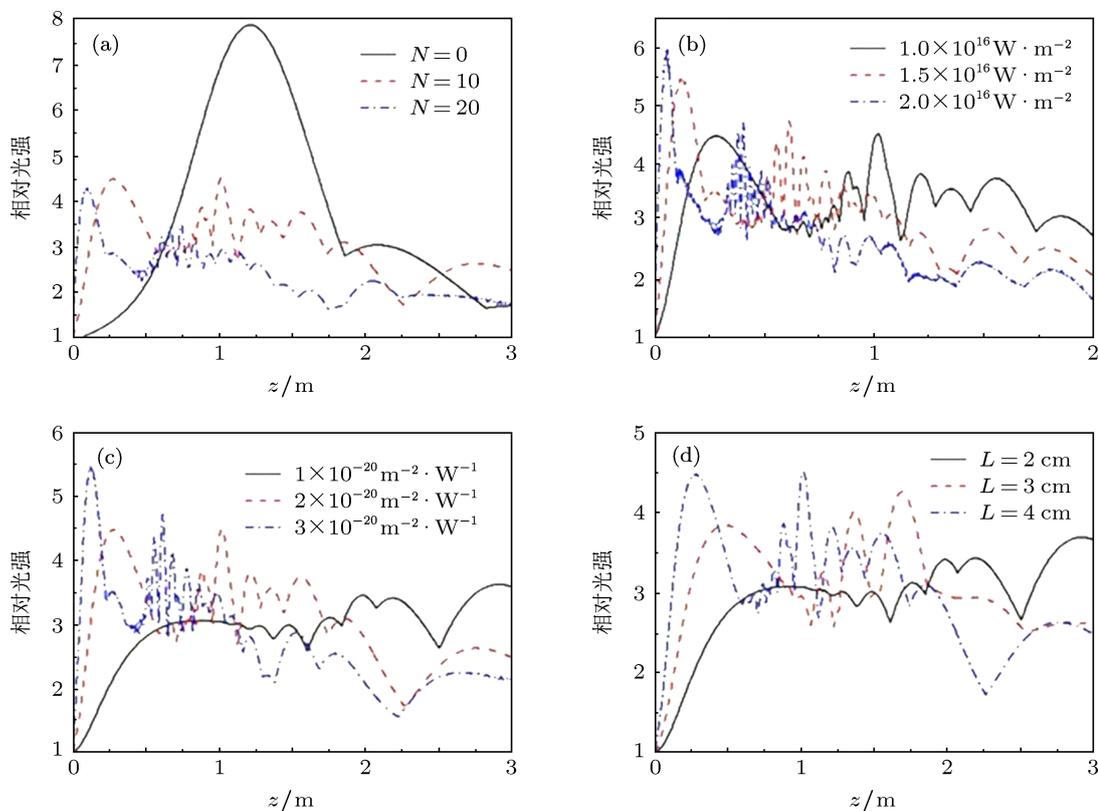


图 4 光束从自聚焦介质出射后在自由空间传输的峰值强度变化 (a) 阶数 N 不同; (b) 入射光强不同; (c) 非线性介质 n_2 不同; (d) 介质厚度 L 不同

图 4 是非线性折射率为正值时, 光场强度的最大值随传输距离的变化情况. 图 4(a) 为不同平顶阶数时的光强分布, 可以看出, N 越大, 介质后面产生的最大光强点越靠近介质后表面, 但其值会变小. 这是因为阶数越大, 介质的自聚焦效应越小, 所以光强越小. 由图 4(b), (c), (d) 可知, 入射光强越强, 非线性折射率系数 n_2 和介质厚度 L 越大, 相对光强峰值越大, 越靠近介质后表面. n_2 和 L 越大相当于对光场的相位延迟越大, 因此对光束的自聚焦效果越好, 但是最大光强越大, 光束发散得越快, 光强减小得越多. 在最大光强点后大约 1 m 内光强波动较激烈.

图 5 是非线性系数为负值时, 光场随传输距离变化的二维分布图. 从图 5 中可以得到, 平顶阶数越大, 介质对光场的影响越小, 越不发生扩散, 如果在传输过程中加上一定大小的光阑, 仍可以得到平顶光束. 说明初始光束的光场变化梯度较大, 受非线性效应的影响较大. 非线性介质的厚度 L 和非线性系数 n_2 越大, 光束越容易发散. 这相当于凹透镜对光的发散作用, L 和 n_2 的增加等价于发散透镜的边缘厚度增加, 中间变薄, 从而增加发散的效果. 与没经过介质的平顶光束相比, 发散更迅速, 边上产生多个圆环, 光斑变大, 光束质量变差.

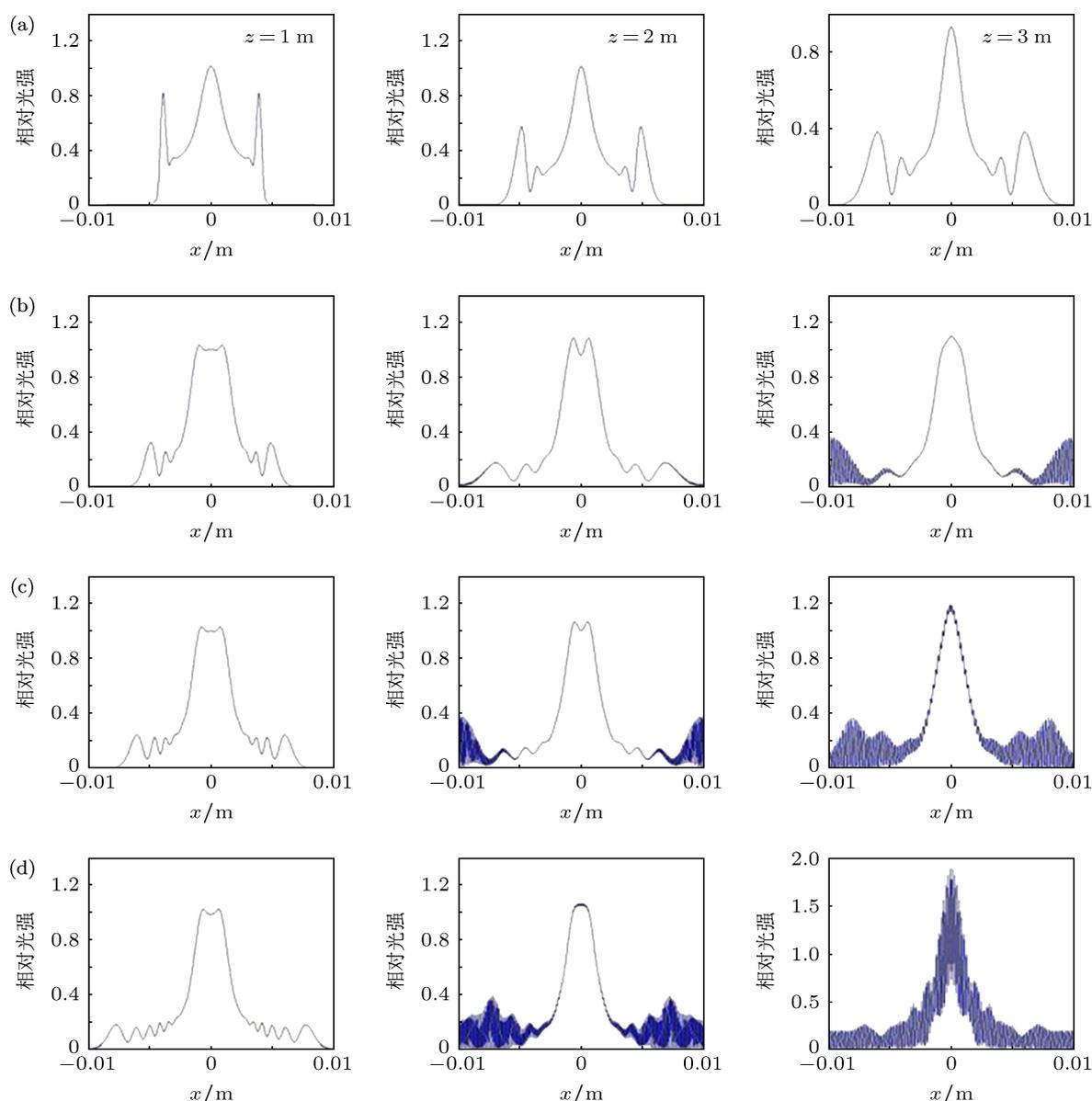


图 5 非线性系数为负值时, 光束从介质出射后在自由空间的光强分布图 (a) $N = 2, L = 4 \text{ cm}, n_2 = -2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$; (b) $N = 10, L = 4 \text{ cm}, n_2 = -2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$; (c) $N = 10, L = 6 \text{ cm}, n_2 = -2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$; (d) $N = 10, L = 6 \text{ cm}, n_2 = -3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$

图 6 为介质表面有缺陷的光场分布演化规律. 在非线性介质的作用下, 缺陷使得光强变化波动更大, 整体的光强比没有调制时的大. 图 6(a) 为介质表面有振幅调制型缺陷且非线性系数为负值时的光强分布, 可以看出缺陷抑制光强的放大作用, 没有自聚焦现象, 光场分布相对光滑, 光强没有增大的趋势. 图 6(b) 的非线性系数为正值, 相比图 6(a) 可知, 在有缺陷的情况下光束在介质内将产生自聚焦, 而且缺陷的作用使得光束中心及周围的极大值点分裂在多个不同的横截面上. 由图 7(a) 可见, 相位调制缺陷使光束在散焦介质中光强分布变得不平坦, 中心光强增大. 图 7(b) 和图 6(b) 的对比说明, 相位调制型缺陷使得光束在介质内更容易发生自聚焦现象, 因此对系统的安全运转更具有破坏威胁,

在实际中应当尽量避免这类缺陷的产生.

图 8 是平顶光束从介质输出后在自由空间的传输特性. 其中图 8(a) 非线性系数为正值, 图 8(b) 非线性系数为负值. 在介质后表面光强变大, 整体光束质量变得很差. 图 8(a) 中光束会产生严重的毛刺, 在介质后表面有相对较大的光强点, 其光场强度大约是入射光强的 4 倍多, 且之后有光强最大值, 其值大约是入射光强的 5 倍多. 而图 8(b) 中缺陷对散焦介质的影响较小, 但是仍然可以在介质后面出现大的光强点, 中心光强在 0.05 m 处最强. 这是中心缺陷对光场调制的结果. 光束经过 n_2 为正值的面有缺陷的介质后在自由空间产生的较大光强值比 n_2 为负值的较大光强大很多.

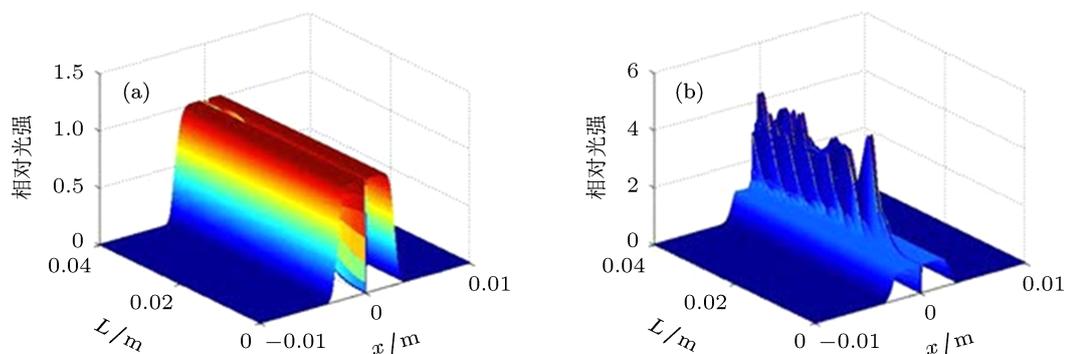


图 6 平顶光束在有振幅调制型缺陷的介质内传输的光强演变 (a) 非线性系数为负值; (b) 非线性系数为正值

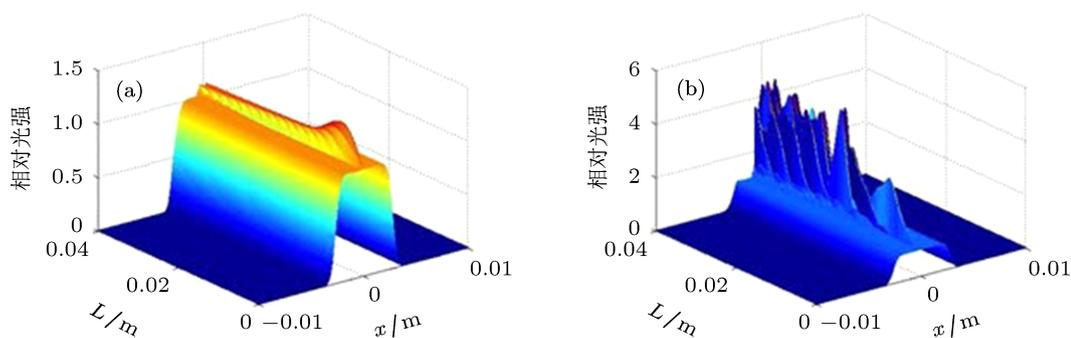


图 7 平顶光束在有相位调制型缺陷的介质内的光强演变 (a) 非线性系数为负值; (b) 非线性系数为正值

4 结论

本文数值模拟了高功率平顶高斯光束经过厚的非线性介质以及经过介质后自由空间上的光强分布演变图. 研究表明, 非线性系数为正值时, 近距离处光束中心的光强小于两边的光强, 光束在介质后面传输的过程中有极大值, 出现自聚焦现象. 平顶阶数 N 越大, 介质后面产生的极值光强点越靠

近介质后表面, 但是光强变小. 入射光越强, 非线性系数 n_2 和介质厚度 L 越大, 对光束的自聚焦效果越好, 极值点越靠近介质后表面. 入射光场的不稳定也可能导致元件损伤. 非线性系数为负值时, 阶数 N 越小、介质的厚度越长和非线性系数越大, 光束越容易发散. 在有缺陷的情况下, 光束在介质内产生自聚焦并分裂成细丝. 缺陷引起聚焦或散焦介质后表面有相对较大的光强点. 相位调制型缺陷

比振幅调制型缺陷对系统安全运行更具破坏威胁. 风险有一定的参考意义.
本文所得到的结果对避免元件被破坏和降低损伤

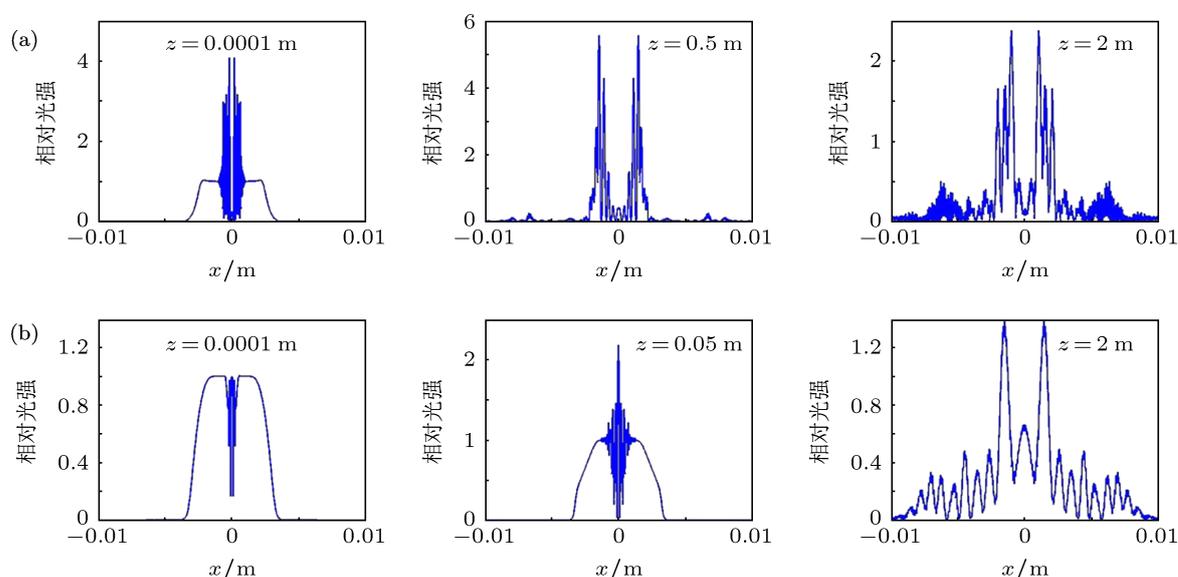


图8 平顶光束从有缺陷的介质后表面出射后光强分布随传输距离的变化 (a) 非线性系数为正值; (b) 非线性系数为负值

- [1] Neauport J, Lemaignere L, Bercegol H, Pilon F, Birolleau J C 2005 *Opt. Express* **13** 10163
- [2] Feit M D, Rubenchik A M 2004 *Proc. SPIE* **5273** 264
- [3] Zhou L D, Su J Q, Li P, Wang W Y, Liu L Q, Zhang Y, Zhang X M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024202 (in Chinese) [周丽丹, 粟敬钦, 李平, 王文义, 刘兰琴, 张颖, 张小民 2011 物理学报 **60** 024202]
- [4] Zhou L D, Su J Q, Li P, Liu L Q, Wang W Y, Wang F, Mo L, Cheng W Y, Zhang X M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 627906 (in Chinese) [周丽丹, 粟敬钦, 李平, 刘兰琴, 王文义, 王方, 莫磊, 程文雅, 张小民 2009 物理学报 **58** 627906]
- [5] Schweinsberg A, Kuper J, Boyd R W 2011 *Phys. Rev. A* **84** 053837
- [6] Lee H H, Chae K M, Yim S Y, Park S H 2004 *Opt. Express* **12** 2603
- [7] Fleck J A, Morris J R, Bliss E S 1987 *Quantum Electron.* **14** 353
- [8] Jokipii S R, Marburger J 1973 *Appl. Phys. Lett.* **23** 696
- [9] Zhang G W, Lu X Q, Cao H B, Yin X H, Lü F N, Zhang Z, Li J H, Wang R G, Ma W X, Zhu J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 024201 (in Chinese) [张国文, 卢兴强, 曹华保, 尹宪华, 吕凤年, 张臻, 李菁辉, 王仁贵, 马伟新, 朱俭 2012 物理学报 **61** 024201]
- [10] Widmayer C C, Nickels M R, Milam D 1998 *Appl. Opt.* **37** 4801
- [11] Peng T, Zhao J L, Xie L P, Ye Z J, Li Q, Su J Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3255 (in Chinese) [彭涛, 赵建林, 谢良平, 叶知隽, 李强, 粟敬钦 2007 物理学报 **56** 3255]
- [12] Xie L P, Jing F, Zhao J L, Su J Q, Wang W Y, Peng H S 2004 *Opt. Commun.* **236** 343
- [13] Li D, Zhao J L, Peng T, Cai Z B 2009 *Appl. Opt.* **48** 6229
- [14] Wen S C, Fan Z Y 2001 *Acta Opt. Sin.* **21** 1158 (in Chinese) [文双春, 范缜元 2001 光学学报 **21** 1458]
- [15] Bespalov V I, Talanov V I 1966 *Jept. Lett.* **3** 307
- [16] Lü B D 2003 *Laser Optics* (Beijing: High Education Press) p228 (in Chinese) [吕百达 2003 激光光学 (北京: 高等教育出版社) 第 228 页]
- [17] Zhou L D, Su J Q, Liu L Q, Wang W Y, Wang F, Mo L, Li P, Zhang X M 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 326 (in Chinese) [周丽丹, 粟敬钦, 刘兰琴, 王文义, 王方, 莫磊, 李平, 张小民 2009 强激光与粒子束 **21** 326]
- [18] Zhang G W, Tao H, Pu J X, Lu X Q, Ma W X 2012 *Chin. J. Lasers* **39** 0102005 (in Chinese) [张国文, 陶华, 蒲继雄, 卢兴强, 马伟新 2012 中国激光 **39** 0102005]

Intensity distribution of the flat-topped beam propagating through the thick nonlinear medium with defects*

Chen Xue-Qiong¹⁾ Chen Zi-Yang¹⁾ Pu Ji-Xiong^{1)†}
Zhu Jian-Qiang²⁾ Zhang Guo-Wen²⁾

1) (*Department of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China*)

2) (*National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

(Received 11 July 2012; revised manuscript received 25 August 2012)

Abstract

Based on the nonlinear Schrödinger equation and Fourier transformation, the intensity distributions of the high power flat-topped beam propagating in the nonlinear medium and the free space are studied. The influences of the defects on medium surface on the intensity evolution of flat-topped light beam in the medium and the free space are analyzed. The results show that the larger the beam order, the poorer the beam self-focusing property is, and the closer to the back surface of the medium the position related to the maximal intensity point is a stronger initial intensity, a thicker medium or a higher nonlinear coefficient will lead to a stronger self-focusing property. The defects on the surface of medium will produce a relatively large intensity, closer to the back surface of medium. The effect of the phase modulated defect on the intensity evolution is greater than that of amplitude modulated defect.

Keywords: flat-topped beam, self-focusing, defect, intensity distribution

PACS: 42.65.-k, 42.65.Jx, 42.30.Kq, 02.30.Nw

DOI: 10.7498/aps.62.044213

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60977068, 61178015) and the Open Foundation of the Key Laboratory of High Power Laser and Physics, China (Grant No. SG-001102).

† Corresponding author. E-mail: jixiong@hqu.edu.cn