

高斯光束经表面有缺陷的厚非线性介质的传输特性*

苏倩倩¹⁾ 张国文²⁾ 蒲继雄^{1)†}

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国家实验室, 上海 201800)

(2011年10月25日收到; 2011年11月28日收到修改稿)

光学元件上存在的缺陷会对传输光束产生局域振幅和位相调制. 基于衍射理论模型和分步傅里叶算法, 模拟分析了高斯光束经过表面有缺陷的非线性介质的传输过程中于介质内及从介质出射后在自由空气的传输特性, 并详细研究了在厚介质前表面有缺陷的情况下, 介质中和自由空气中的光强分布演化规律. 研究表明, 介质厚度越长、介质的非线性折射率越大, 光束整体聚焦越厉害, 聚焦点离介质后表面越近. 光束受调制点的位置离中心越近, 光束分裂成丝产生的局部光强越大, 且介质表面存在缺陷将使通过的光束在介质后表面处产生一个很大的光强, 相位调制型缺陷产生的这一光强点比振幅调制型缺陷产生的光强点更强.

关键词: 非线性光学, 振幅调制, 相位调制, 分步傅里叶变换

PACS: 42.65.-k, 42.65.Jx

1 引言

高斯光束通过非线性介质时出现的自聚焦或自散焦现象是非线性光学中的一个基本物理问题, 一直是热点研究方向^[1-6]. 由于非线性克尔效应使得通过的光束的整体光强分布发生变化, 而光学实验中所采用的元件在其加工、使用和环境等情况下, 不可避免地导致光学元件存在或多或少的缺陷, 如划痕、表面损伤、表面污染、灰尘颗粒等, 这些缺陷会对光束的强度分布产生调制^[7-14], 使得高斯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, 引起光束小尺度自聚焦, 由此引起光束分裂成丝, 不仅可能对激光器系统中的非线性介质造成损伤, 而且还可能引起介质后方特定位置处光学元件的损伤. 有关小尺度自聚焦的理论最早由 Bspalov 和 Talanov 提出, 该理论将平面光场视为均匀且光强不随传输距离变化的本底平面波与小尺度扰动的叠加^[15], 或是建立在薄片近似基础上, 该近似处

理在求解非线性近轴波动方程时忽略了衍射效应项^[16]. 而实际激光系统中的非线性介质均不满足薄片近似条件, 在不忽略衍射效应项影响的情况下, 非线性近轴波动方程没有解析解, 因此通过数值模拟的方式更能精确地分析高斯光束经过有缺陷的厚非线性介质的整体光强演化规律. 本文从光束的衍射理论模型出发, 用 Matlab 语言模拟分析高斯光束经厚介质的传输特性, 并重点考虑介质表面存在调制点 (包括振幅调制和相位调制)、调制点的位置、介质的非线性折射率大小、介质长度等参数的变化对光强分布及整体光束聚焦位置的影响, 所得研究结果对激光诱导损伤和光学元件被破坏的风险规避具有一定的参考价值.

2 理论分析

入射高斯光束经过前表面有一缺陷的非线性介质的整个传输过程如图 1, 首先是入射光束在非线性和介质中传输 d 距离, 包括光束的衍射作用及介质光束的非线性传输过程, 然后是从介质出射的光

* 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.

† E-mail: jixiong@hqu.edu.cn

束在自由空间中的传输过程(图 1).

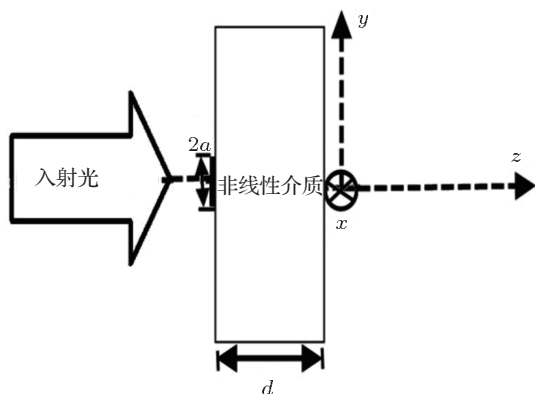


图 1 模拟物理模型示意图

由于非线性介质的三阶非线性光学效应,当强度高斯光束通过非线性介质时,在介质中光作用区域产生与光强成正比的附加折射率分布 $\Delta n(z)$,并引起位相延迟,对其传输特性将产生影响.若波长为 λ ,入射光强为 I_0 的光束通过厚度为 L ,非线性折射率为 n_2 的非线性介质时,在介质出射面处产生的横向附加相移分布可以表示为^[2,17,18]

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= k_0 \int_{z_0}^{z_0+L} \Delta n(z) dz \\ &= k_0 \int_{z_0}^{z_0+L} n_2 I_0 dz. \end{aligned} \quad (1)$$

光学元件缺陷种类繁多,性质各异,但从对光场影响的角度看,可归结为对光场的振幅和位相引入调制,对振幅的调制通过影响光学元件的振幅透过率分布实现.一般灰尘、污染物以及体内吸收杂质等缺陷主要为振幅型缺陷;而对相位的调制通过影响光学元件的光学厚度分布实现,划痕、凹陷等主要为相位调制型缺陷.而一般光学元件缺陷为振幅与相位混合型,其透过率为^[14]

$$T(x, y, z) = [1 - h(x, y, z)] e^{i\phi(x, y, z)}, \quad (2)$$

其中 $h(x, y, z)$ 为缺陷元件振幅挡光率的空间分布, $\phi(x, y, z)$ 为缺陷元件位相畸变的空间分布.本文分别针对这两种缺陷展开研究.结合实际情况,取缺陷的振幅透过率为高斯型,这比完全挡光点更为合理,则其透过率为^[19]

$$t_1(x, y) = 1 - A \exp \left[-\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{a^2} \right], \quad (3)$$

式中 (x_0, y_0) 为振幅调制缺陷横向中心坐标位置, A 为缺陷振幅调制幅度,决定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采用矩形基元表示为^[20]

$$t(x, y) = \exp \left\{ i\Delta \times \left[\text{rect} \left(\frac{x - x_0}{2a} \right) \times \text{rect} \left(\frac{y - y_0}{2b} \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

其中, Δ 为局域位相调制深度, $\Delta = \frac{(n - 1)2\pi h}{\lambda}$, h 为缺陷深度,且 $0 \leq \Delta \leq 2\pi$, a, b 分别为调制半宽度, (x_0, y_0) 为位相调制横向中心坐标.(4)式不仅可以表示矩形的局域位相调制,还可通过改变 a, b , 当 $a \geq b$ 或 $a \leq b$ 时,可近似表示为光学元件划痕对光束的局域调制.

以下将以 (3), (4) 式作为描述缺陷的数学模型,给出数值模拟,并着重讨论高斯光束经过表面有缺陷的厚非线性介质的光强分布在介质和自由空气中的演化特性.

3 数值模拟及分析

3.1 厚非线性介质表面无缺陷的情况

高斯光束经过厚非线性介质的传输过程可以采用数值模拟方式加以分析.在不忽略衍射效应项影响的情况下,非线性近轴波动方程没有解析解,因此这里采用分步傅里叶算法求解. Matlab 语言程序所用的参数选取如下:采样区间为 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$,采样点数为 1024×1024 ;折射率为 1.6,入射高斯光束的波长为 $1.053 \times 10^{-6} \text{ m}$,光腰尺寸取 $3 \times 10^{-3} \text{ m}$,入射光场强度为 10^{10} W/m^2 ,缺陷尺寸大小为 $50 \mu\text{m}$.

图 2(a) 所示为高斯光束从非线性折射率为 $2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 的介质出射后在沿着传输方向光强分布演化图,介质厚度为 6 cm .从图中可以看出,从非线性介质后表面出射后,沿着光束传输方向,光束先会聚,在 1 m 附近会聚最强,中心光强值达到最大;然后光束将开始发散,犹如光束经透镜聚焦一样,此现象即为光束的自聚焦效应,如果其他光学元件正好位于自聚焦的焦点附近就可能引起光学元件损伤.而产生自聚焦的根本原因在于高斯光束的光强中心强而边缘弱,非线性效应引起的位相延迟分布与正透镜所引起的位相延迟分布相似,也是中心大而边缘小,继而就产生与正透镜聚焦作用类似的自聚焦作用.若介质的厚度足够长,高斯光束在介质内传输一定距离就可能发生自聚

焦现象, 如图 2(c), 入射光在介质内传输 12 cm 左右发生自聚焦现象, 中心光强明显增大, 就可能导致元件内部受到损坏. 接下来我们研究介质的厚度及 n_2 大小如何影响光束在自由空气中的会聚最强点的强度大小和位置. 图 3 为光束从介质后表面出射后光束的峰值强度随传输距离的变化. 其中图 2(a) 为非线性折射率为 $2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 而介质厚度不同; 图 2(b) 为介质厚度为 6 cm 而非线性折射率大小不同. 由图中可以看出, 随介质长度增长或非线性折射率增大, 会聚最强点产生的光强越大,

且光强最大点的位置离介质后表面的距离也越短, 说明厚度越长或折射率越大的介质对光束的会聚效果越好.

图 4 所示为介质的非线性折射率为负值时光强分布随传输距离变化的二维曲线图. 高斯光束经过非线性折射率为负值的介质之后位相延迟分布中心小边缘大, 与负透镜引起的位相延迟分布相似, 即 n_2 为负的介质对光束具有发散的作用. 从图中可看出, n_2 绝对值越大, 介质厚度越长, 对光束的发散效果也越明显.

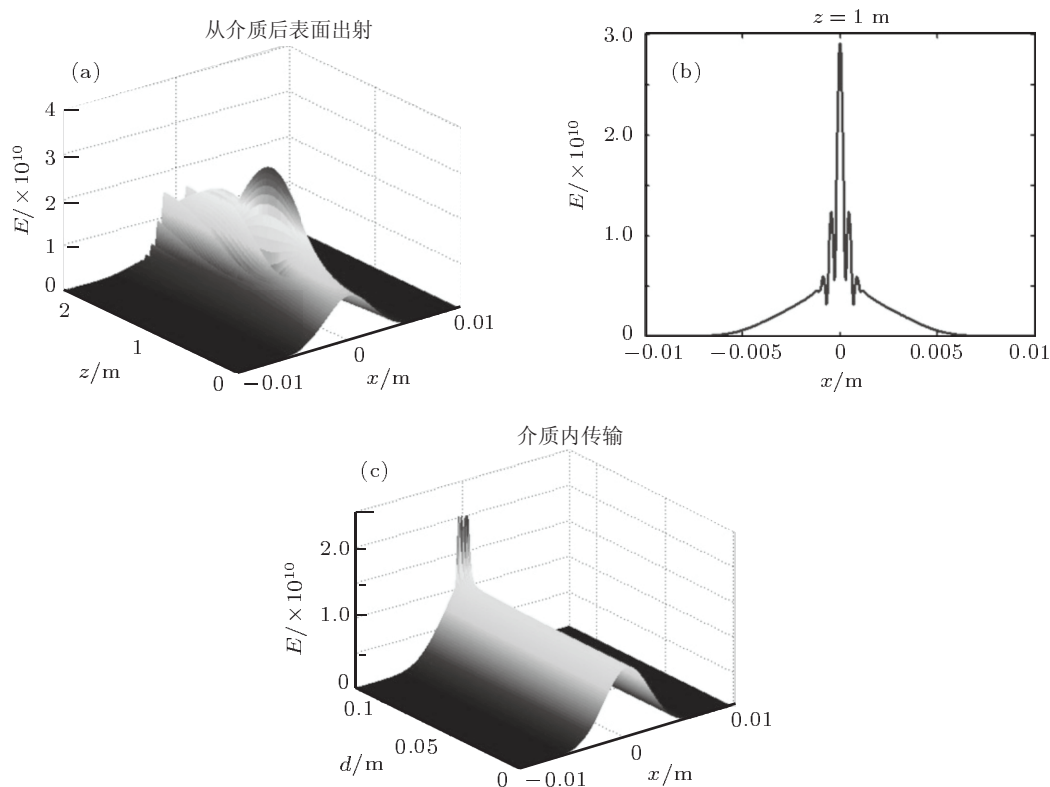


图 2 (a) 高斯光束从 6 cm 厚的介质出射后在自由空间的光强分布演化; (b) 离介质后表面 1 m 处的光强分布; (c) 高斯光束在介质内传输过程中的光强分布演化

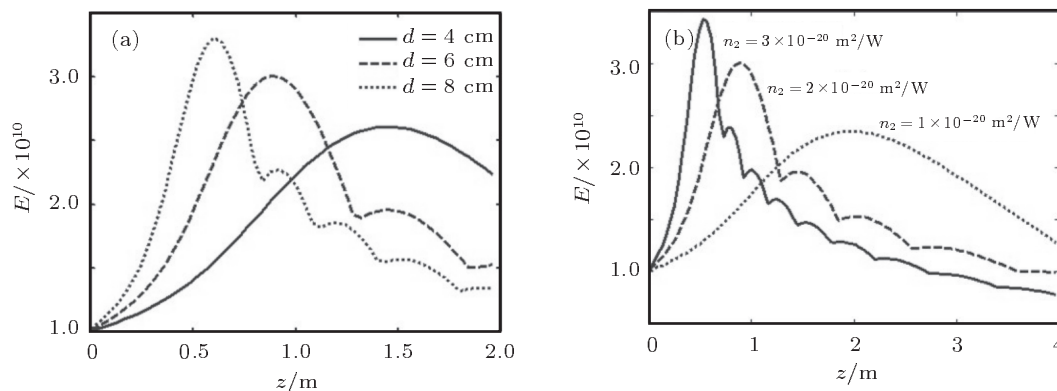


图 3 光束从介质后表面出射后光束的峰值强度随传输距离的变化曲线 (a) 非线性介质厚度不同; (b) 非线性介质的非线性折射率大小不同

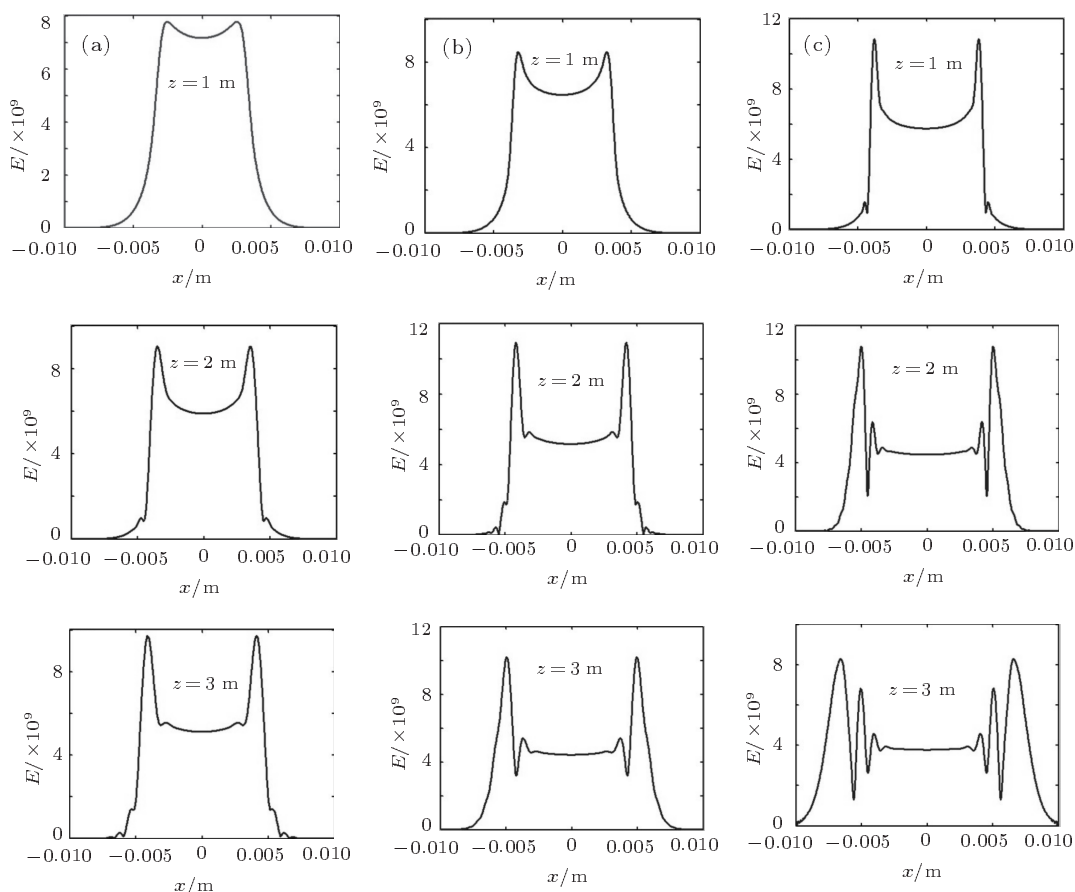


图4 高斯光束从6 cm厚,非线性折射率为负的介质出射后在自由空间的光强分布演化 (a) $d = 4 \text{ cm}$, $n_2 = 2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$; (b) $d = 6 \text{ cm}$, $n_2 = 2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$; (c) $d = 6 \text{ cm}$, $n_2 = 3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$

3.2 厚非线性介质表面有缺陷的情况

接下来考虑介质表面存在缺陷的情况下光强的演化规律, 介质厚度为 4 cm. 图 5 为高斯光束在表面有缺陷的介质内传输时的光强分布演化. 如图 5(a) 所示, 高斯光束在 $n_2 = 2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 且表面有缺陷的介质内传输 1.5 cm 左右光强分布就发生明显变化, 这是由于入射光束受到介质表面缺陷调制后光强分布存在起伏, 而 n_2 为正的介质引起的位相延迟将引起光强起伏被强烈放大, 从而使光束分裂成若干独立的被自聚焦的截面, 此即为光束分裂或小尺度自聚焦效应. 因此高斯光束在表面有缺陷的非线性介质中传输时更容易对元件内部造成损坏. 而图 5(b) 中 n_2 为负值的介质引起的位相延迟效应与 n_2 为正值介质相反, 则可抑制光强起伏的放大作用, 因此没有局部小尺度自聚焦的现象, 光强分布更加光滑. 而当光束受调制点的位置不同时, 如图 6 所示, 为入射光的受调制点于中心与受调制点不在中心两种情况下, 光束在非线性介

质中的传输特性. 比较图 6(a) 和 (b) 可以看出, 受介质表面缺陷调制的位置在中心的入射光束在介质中局部聚焦产生的光强比受调制点位置不在中心的光束产生的局部光强大, 即调制点的位置越靠近光束的中心, 对元件内部造成损伤的风险也更大.

以下我们研究从介质出射后光强分布随传输距离的演化情况. 图 7(a) 表示介质的非线性折射率为正, 而图 7(b) 介质的非线性折射率为负. 在图 7(a) 中, 由于光束在介质中已分裂成若干独立的被自聚焦的截面, 则从介质中出射的光束的光强分布产生的毛刺很多, 且可看出在靠近介质后表面处产生一较大光强, 且整体光束在沿着传输的方向 1 m 左右仍可会聚产生一强光点, 即受缺陷调制的入射光经过非线性介质之后光强分布很不均匀但整体光束自聚焦现象仍可能存在. 而图 7(b) 中的光强分布曲线相比图 7(a) 毛刺明显减少, 且受缺陷的影响, 光束经过非线性折射率为负的介质仍可在介质后表面附近产生一较大光强点. 图 8(a) 为对这两种介质在后表面处产生的光强点进行比较, 由图中可以

看出 n_2 为正的介质表面上的缺陷使得经过的光束在后表面产生的光强极值点比 n_2 为负的介质在后表面产生的光强极值点光强更强, 且极值点的位置更接近后表面. 图 8(b) 中所示为振幅调制型与相位

调制型缺陷的光强分布曲线比较, 由图中我们可以看出, 相位调制型在介质后表面产生的光强极值点比振幅调制产生的极值点大. 这说明相位调制可能比振幅调制带来更严重的光损伤.

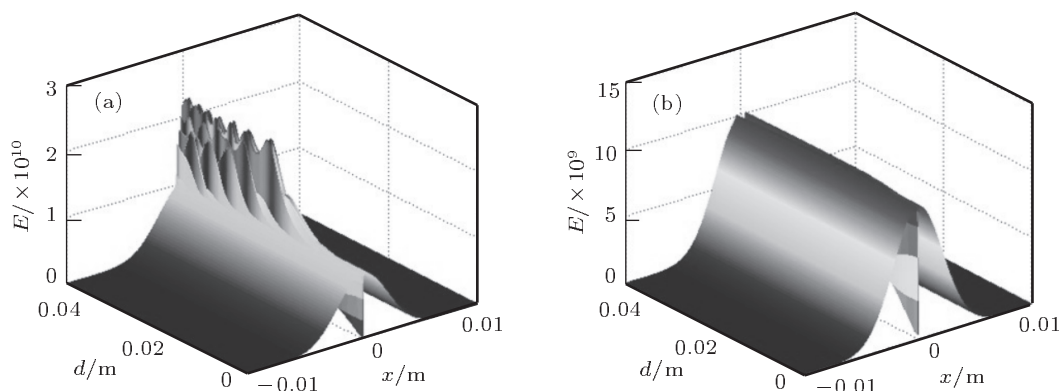


图 5 高斯光束在表面有缺陷的非线性介质内传输过程中的光强分布演化图 (a) 介质的非线性折射率为正; (b) 介质的非线性折射率为负

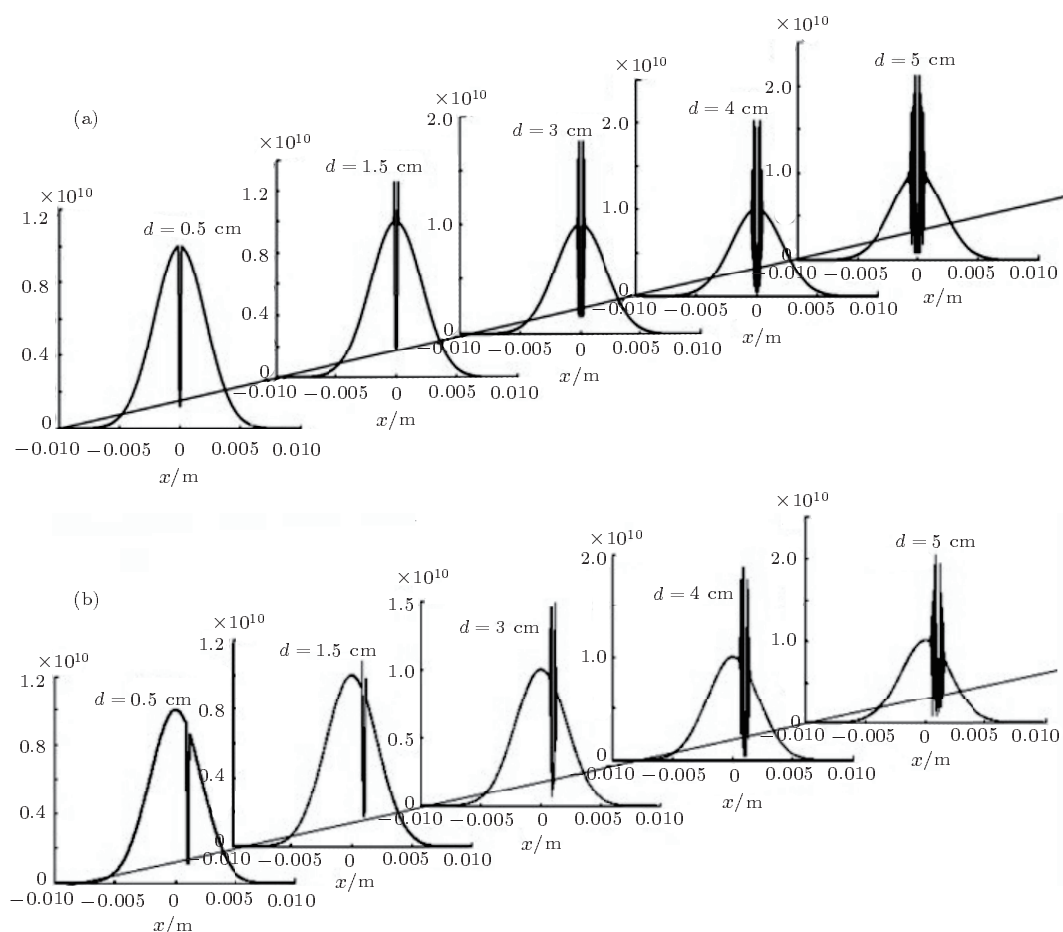


图 6 高斯光束在表面有缺陷的非线性介质内传输过程中的光强分布演化, $r = 80 \mu\text{m}$ (a) 高斯光束的中心受到缺陷调制; (b) 缺陷调制位置偏离光束的中心

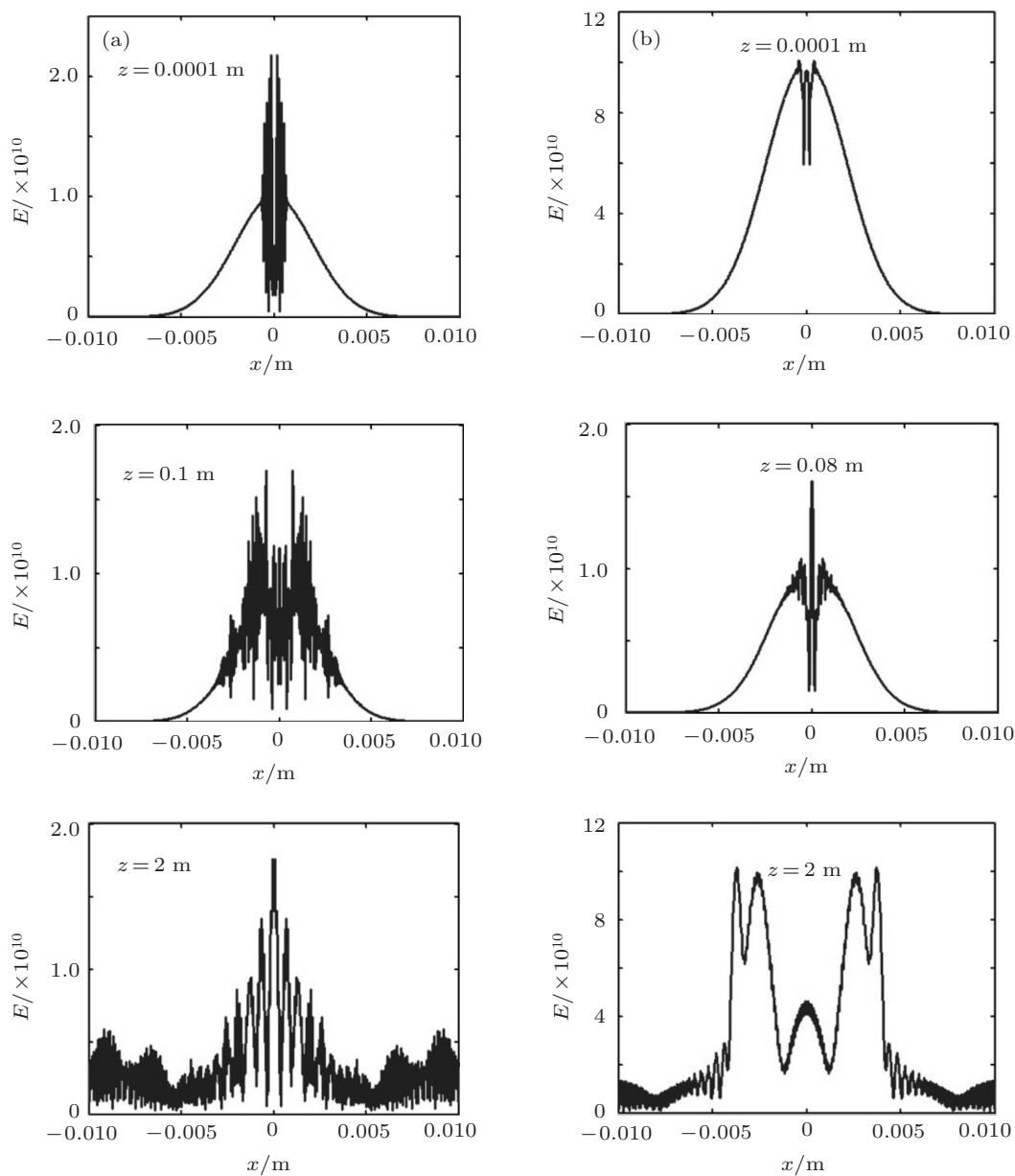


图 7 高斯光束从表面有缺陷的介质后表面出射后光强分布随传输距离的变化 (a) $d = 4 \text{ cm}$, $n_2 = 2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$; (b) $d = 4 \text{ cm}$, $n_2 = -2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$

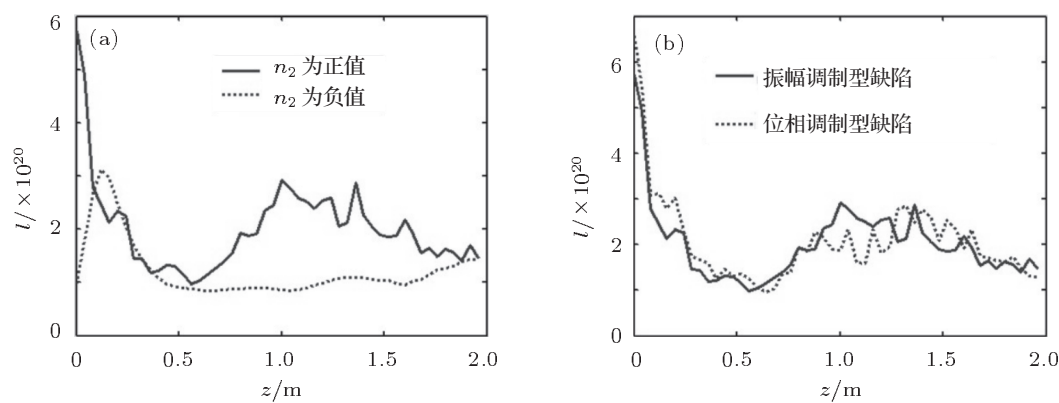


图 8 光束从介质后表面出射后光束的峰值强度随传输距离的变化曲线 (a) 非线性折射率正负不同; (b) 介质表面的两种不同缺陷, 介质后表面产生的光强峰值比较

4 结论

以数值模拟的方式研究了高斯光束的光强分布在厚非线性介质和自由空气中的演化规律. 研究表明, 高斯光束经在非线性折射率为正值的非线性介质后, 沿着传输的方向, 产生整体光束自聚焦效应, 且非线性折射率越大, 介质厚度越长, 光束会聚产生的最大光强值越大, 会聚最强点离介质后表面的距离越短即介质的聚焦效果越好; 相应地当非线性折射率为负值时, 随着非线性折射率绝对值越大, 介质厚度越长, 对光束的发散效果也越好. 介质表面存在的缺陷对光束光强的分布的扰动使得光束在非线性折射率为正值的介质中很容易出现光束分裂, 发生局部自聚焦产生较大光强可能对元件内

部造成损伤, 且入射光受缺陷调制的位置越靠近光束的中心, 局部自聚焦产生的光强越大, 对元件内部造成的损伤就越强. 而介质表面的缺陷还可使后表面处产生一很大光强, 并且受缺陷调制的光束经过非线性介质后光强分布虽很不均匀, 但整体光束的自聚焦现象仍可能存在. 因此由于介质表面的缺陷引起的光束在介质内的小尺度自聚焦和介质后表面产生的最大光强极值点都可能损坏光学元件, 而且对正好处于整体光束自聚焦的焦点附近的光学元件也可能引起损伤. 并且相位调制型缺陷在介质后表面产生的光强极值点比振幅调制型缺陷产生的极值点大, 即相位调制可能比振幅调制带来更严重的光损伤威胁. 研究结果对激光诱导损伤和光学元件被破坏的风险规避具有一定的参考价值.

- [1] Wen S C, Fan D Y 2001 *Chinese J. Lasers* **28** 1066 (in Chinese) [文双春, 范滇元 2001 中国激光 **28** 1066]
- [2] Wen S C, Fan D Y 2001 *Acta Opt. Sin.* **21** 1330 (in Chinese) [文双春, 范滇元 2001 光学学报 **21** 1330]
- [3] Lin X D, Wang X, Li D Y 2002 *Chinese J. Lasers* **29** 418 [林小东, 王道, 李大义 2002 中国激光 **29** 418]
- [4] Gu Y L, Zhu J Q 2006 *Acta Opt. Sin.* **26** 1734 (in Chinese) [顾亚龙, 朱健强 2006 光学学报 **26** 1734]
- [5] Zhang B, Lü B D 1999 *Laser Technol.* **23** 106 (in Chinese) [张彬, 吕百达 1999 激光技术 **23** 106]
- [6] Fleck J A, Morris J R, Bliss E S 1987 *Quantum Electronics* **14** 353
- [7] Wang Y W, Hu Y H, Wen S C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5855 (in Chinese) [王友文, 胡勇华, 文双春 2007 物理学报 **56** 5855]
- [8] Wang Y W, Deng J Q, Wen S C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1738 (in Chinese) [王友文, 邓剑钦, 文双春 2009 物理学报 **58** 1738]
- [9] Zhou W Y, Tian J G, Zang W P 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2623 (in Chinese) [周文远, 田建国, 臧维平 2002 物理学报 **51** 2623]
- [10] Zang W P, Tian J G, Zhang G Y 1994 *Acta Phys. Sin.* **43** 476 (in Chinese) [臧维平, 田建国, 张光寅 1994 物理学报 **43** 476]
- [11] Hu P, Chen F L 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 961 (in Chinese) [胡鹏, 陈发良 2005 强激光与粒子束 **17** 961]
- [12] Neauport J, Lemaignere L, Bercegol H, Pilon F, Birolleau J C 2005 *Opt. Express* **13** 10163
- [13] Mainguy S, Tovenca-Pecault I, Le Garrec B 2005 *Proc. SPIE* **5991** 59910G-1-9
- [14] Zhou L D, Su J Q, Li P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024202 (in Chinese) [周丽丹, 粟敬钦, 李平 2011 物理学报 **60** 024202]
- [15] Bespalov V I, Talanov V I 1966 *JETP Lett.* **3** 307
- [16] Xie L P, Su J Q, Jing F 2004 *High Power Laser and Particle Beam* **16** 1001 (in Chinese) [谢良平, 粟敬钦, 景峰 2004 强激光与粒子束 **16** 1001]
- [17] Ye P X 2007 *Nonlinear Optical Physics* (1) (Beijing: Peking University Press) (in Chinese) [叶佩弦 2007 非线性光学物理 (1) (北京: 北京大学出版社)]
- [18] He K N, Deng L G 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 940 (in Chinese) [何坤娜, 邓罗根 2003 强激光与粒子束 **15** 940]
- [19] Tao H, Zhang G W, Pu J X 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 100411 (in Chinese) [陶华, 张国文, 蒲继雄 2011 光学学报 **31** 100411]
- [20] Dai M K, Xu D Y 1997 *Acta Photonica Sinica* **17** 351 (in Chinese) [戴名奎, 徐德衍 1997 光子学报 **17** 351]

The propagation characteristics of a Gaussian beam passing through the thick nonlinear medium with defects*

Su Qian-Qian¹⁾ Zhang Guo-Wen²⁾ Pu Ji-Xiong^{1)†}

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 25 October 2011; revised manuscript received 28 November 2011)

Abstract

The defects unavoidably existing on the optical component will modulate the phase and the amplitude of the beam propagation in the system. Based on the Fresnel diffraction and split-step Fourier method, the two-dimensional intensity distributions of the Gaussian beam propagation in the nonlinear medium and the free space are simulated. And the intensity distributions of the beam propagation in the medium and the free space are also studied in the case where there exist defects on the front surface of thick medium. It is shown that the thicker the medium and the larger the nonlinear index of refraction, the stronger the beam focus and the closer to the medium surface the focal position is. The defects on the medium surface will lead to a strong beam intensity near the rear surface of the medium. And the intensity generated by the phase modulated defects is stronger than by the amplitude modulated defects.

Keywords: nonlinear optics, phase modulation, amplitude modulation, split-step Fourier-transform

PACS: 42.65.-k, 42.65.Jx

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

† E-mail: jixiong@hqu.edu.cn