



· 强激光物理与技术 ·

方形超高斯光束在 Kerr 介质中的强度演化特性*

艾亦章^{1,2}, 吕奇霖^{1,2}, 李世文³, 马再如¹, 王方², 刘红婕², 杜泉¹

(1. 西华大学 理学院 物理系, 成都 610039; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;
3. 攀枝花学院 数学与计算机学院, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: 基于非线性薛定谔方程, 采用分步傅里叶算法模拟了方形超高斯光束在 Kerr 介质中的传输情况, 重点分析了方形超高斯光束轴向中心强度与对角方向强度的演化特性, 同时还分析了其在 Kerr 介质中的自聚焦特性、峰值光强变化情况以及 B 积分变化情况。研究表明: 方形超高斯光束通过 Kerr 介质后, 距光束中心不同距离处有不同程度的强度增强和凹陷, 光束中心附近的强度增强和凹陷较弱, 光束边缘以及四角处的强度增强和凹陷较强, 且对角方向上的强度增强和凹陷程度要强于轴向中心方向; 减小阶数可以减缓光束的边缘强度增强, 并可以减缓 B 积分的增长; 减少 Kerr 介质厚度可以降低光束边缘强度增强程度, 并可以减小 B 积分的大小。提出了光束边缘强度起伏的主要原因可能是光束的相干叠加。

关键词: 非线性光学; 超高斯光束; Kerr 介质; 自聚焦; B 积分

中图分类号: O437

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210238

Intensity evolution characteristics of square super-Gaussian beam in Kerr medium

Ai Yizhang^{1,2}, Lü Qilin^{1,2}, Li Shiwen³, Ma Zairu¹, Wang Fang², Liu Hongjie², Du Quan¹

(1. Department of Physics, School of Science, Xihua University, Chengdu 610039, China;
2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China;
3. School of mathematics and computer, Panzhihua College, Panzhihua 617000, China)

Abstract: Based on the nonlinear Schrödinger equation, the step FFT is used to simulate the propagation of the square super-Gaussian beam in Kerr medium, and the evolution characteristics of the axial center and diagonal intensity of the square super-Gaussian beam are analyzed. At the same time, the self-focusing characteristics, the variation of peak intensity and B-integral in Kerr medium are also analyzed. The research results show that after the square super-Gaussian beam passes through the Kerr medium, there are different degrees of intensity enhancement and depression at different distances from the center of the beam, the intensity enhancement and depression are weak near the beam center, strong at the edge and four corners of the beam, and they are stronger in the diagonal direction than in the axial center direction. Reducing the order can slow down the edge intensity enhancement of the beam and the growth of the B-integral. Reducing the thickness of the Kerr medium can reduce the intensity enhancement of the beam edge and the size of the B-integral. It is proposed that the main reason for the fluctuation of the edge intensity of the beam probably be the coherent superposition of the beam.

Key words: nonlinear optics, super-Gaussian beam, Kerr medium, self-focusing, B-integral

自聚焦效应会导致强激光通过 Kerr 介质后光束强度剧增, 甚至超过阈值而对介质造成损伤^[1-5]。近期, 在利弗莫尔实验室的 NIF 装置激光打靶实验中, 强激光通过 Kerr 介质后发生强度剧增的位置总是出现在光束的边缘^[6], 而这种边缘强度增强的物理起源尚未明确。为了了解产生该现象的机理, 研究强激光在 Kerr 介质中的强度演化特性尤为重要。以往的文献更多是关于圆对称超高斯光束自聚焦形成机制与特性研究^[7-10], 但实际工程常采用填

* 收稿日期: 2021-06-15; 修订日期: 2021-12-24

基金项目: 四川省教育厅重点项目(11ZA011); 四川省科技支撑项目(2014GZ0003)

联系方式: 艾亦章, 18483669246@163.com。

通信作者: 马再如, simazairu@sina.com。

充因子更高的方形超高斯光束^[11-13], 而关于该光束在 Kerr 介质中的强度演化特性文献甚少。因此, 研究方形超高斯光束在熔石英介质中的强度演化特性, 抑制光束边缘强度增强对实际运用具有重要意义。本文重点对比分析了方形超高斯光束在 Kerr 介质内传输的轴向中心强度演化过程和对角强度演化过程、B 积分变化情况以及峰值强度的演化情况, 并给出了减缓光束边缘强度增强以及减缓 B 积分增长的方案。

1 理论模型

强激光在 Kerr 介质中传输满足近轴非线性波动方程^[14]

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{i}{2k_0} \nabla_{\perp}^2 E + \frac{ik_0}{n_0} \gamma |E|^2 E \quad (1)$$

式中: 右侧第一项表示光束衍射效应, 其中 i 代表虚数单位, k_0 为真空中的光波数, $\nabla_{\perp}^2 = \nabla_x^2 + \nabla_y^2$; 第二项表示非线性效应, n_0 为光波在介质中的线性折射率, γ 为熔石英介质的非线性系数。

在高功率激光器内, 强激光通过上游一系列光学元件后总是会存在一些空间光强调制及空间相位调制, 假设经上游光学元件调制后的方形超高斯光束在熔石英入射面 ($z = 0$) 处的光场表达式^[15] 为

$$E(x, y) = I_0^{1/2} \exp\left[-\left(x^2/\omega_0^2\right)^m - \left(y^2/\omega_0^2\right)^m\right] \Phi_a(x, y)^{1/2} \exp\left[-i\Phi_p(x, y)\right] \quad (2)$$

式中: I_0 为入射光束峰值光强; ω_0 为光腰半径; m 为超高斯阶数; $\Phi_a(x, y)$ 为光强调制函数, $\Phi_a(x, y) = 1 + \sigma_a R$, σ_a 为空间光强调制幅度, R 为 $[-1, 1]$ 区间上的随机数序列; $\Phi_p(x, y)$ 为空间相位调制函数, $\Phi_p(x, y) = \Phi_{p1}(x, y) + \Phi_{p2}(x, y)$, 其中 $\Phi_{p1}(x, y)$ 为低频相位调制函数, $\Phi_{p1}(x, y) = R \exp\left\{-\left[(x/S_x)^2 + (y/S_y)^2\right]\right\}$, S_x 和 S_y 分别 x 方向和 y 方向的空间起伏参数, $\Phi_{p2}(x, y)$ 为中高频相位调制函数, $\Phi_{p2}(x, y) = \sigma_p R(y)$, σ_p 为中高频随机相位调制幅度。

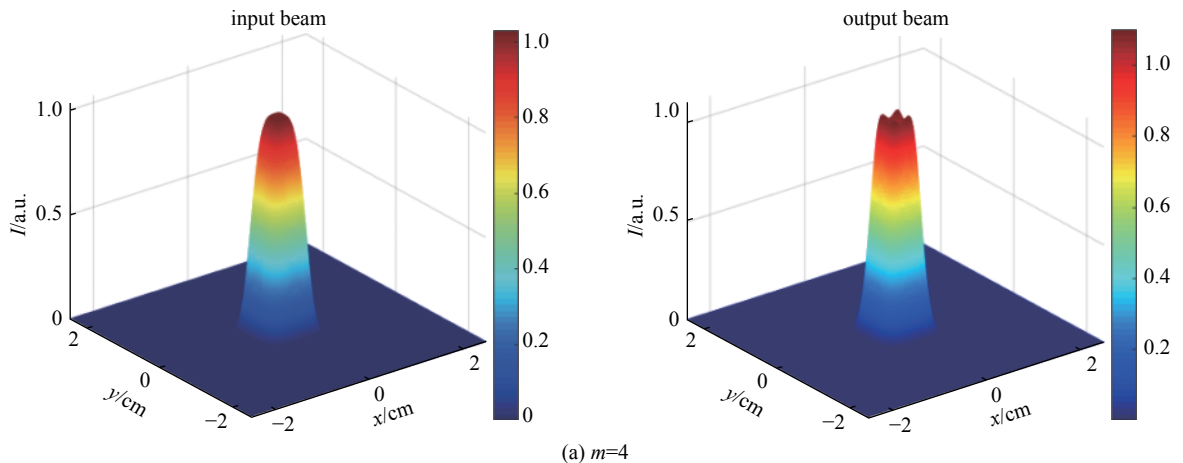
2 数值计算及分析

本研究以连续激光为模型, 计算采用如下参数: 入射光强 $I = 3 \text{ GW/cm}^2$, 传输光束波长 $\lambda = 1053 \text{ nm}$, 口径为 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$, 传输距离 $z = 20 \text{ cm}$, Kerr 介质的线性折射率和非线性折射率分别为 $n_0 \approx 1.477$, $\gamma \approx 2.7 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{GW}$ ^[16], S_x 和 S_y 均为 0.1 cm , 空间光强调制幅度 $\sigma_a = 0.05$, 中高频相位扰动幅度 $\sigma_p = 0.005$ 。通常而言, 方程 (1) 没有解析解, 本文采用分步傅里叶算法对其进行数值求解。

图 1 给出了阶数 $m=4, m=6, m=8$ 及 $m=10$ 时的方形超高斯光束在 Kerr 介质前表面和后表面的归一化光场分布情况。该图具有两个明显的特点: (1) 随着方形超高斯光束阶数的增长, 入射光束的边缘愈发陡峭; (2) 出射光束整体强度较入射光束有所提升, 但出射光束中心强度凹陷, 边缘强度增强, 在光束的四角位置, 强度呈非常高的丝状。导致这种现象的主要原因是衍射效应和自聚焦效应的共同作用。

为了探究造成出射光束不同位置处强度增强和凹陷程度不同的原因, 采用三维模型展示在介质中传播的光束轴向中心截面和光束对角截面的强度演化过程。图 2 给出了阶数 $m=4, m=6, m=8$ 及 $m=10$ 时, 方形超高斯光束在 Kerr 介质中传输的归一化轴向中心强度演化过程和归一化对角强度演化过程。如图 2 所示, 光束对角方向上的强度增强和凹陷程度相比于光束的轴向中心方向更强, 且阶数的增长会导致光束的自聚焦效应越来越强。

图 2 中, 出射光束对角方向上的强度增强和凹陷程度相比于光束的轴向中心方向更强, 因此, 需具体分析出射



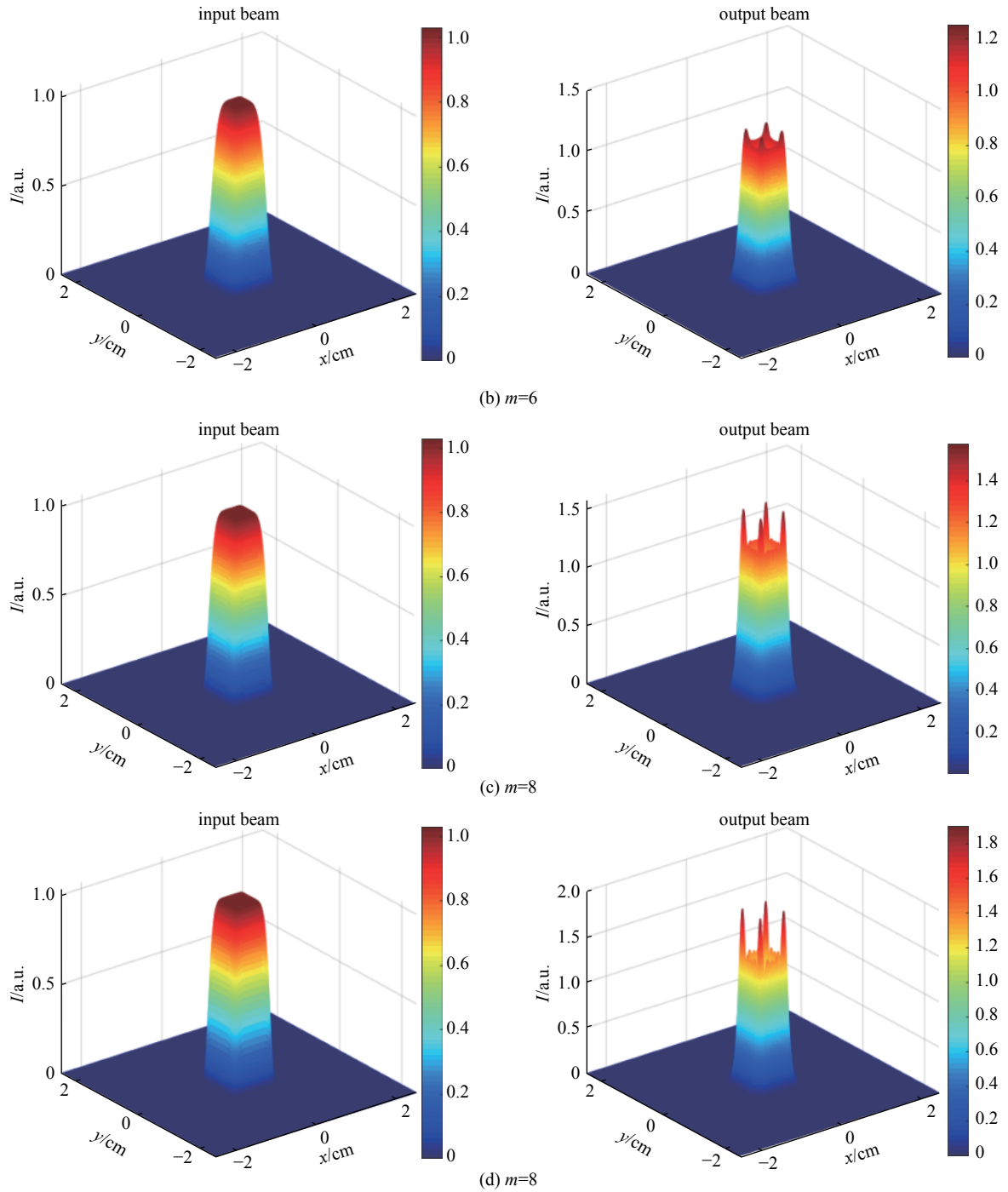


Fig. 1 Normalized field distribution of square super-Gaussian beams on the front and back surfaces of Kerr medium

图 1 方形超高斯光束在 Kerr 介质的前表面和后表面的归一化光场分布

光束的强度增强和凹陷程度以便及时对光束进行调制。图 3 给出了阶数 $m=4$, $m=6$, $m=8$ 及 $m=10$ 时的方形超高斯光束在 Kerr 介质后表面位置出射时轴向中心截面与对角截面的对比情况。可见：当 $m=4$ 时，在距光束中心约 0.16 cm 处，出射光束对角方向上的峰值强度约为入射峰值强度的 1.10 倍，轴向中心方向上的峰值强度约为入射峰值强度的 1.07 倍，对角方向上的峰值强度较轴向中心方向的峰值强度提升了约 1.03 倍；当 $m=6$ 时，在距光束中心约 0.25 cm 处，出射光束对角方向上的峰值强度约为入射峰值强度的 1.25 倍，光束轴向中心方向上的峰值强度约为入射峰值强度的 1.14 倍，对角方向上的峰值强度较轴向中心方向的峰值强度提升了约 1.10 倍；当 $m=8$ 时，在距光束中心约 0.28 cm 处，光束对角方向上的峰值强度约为入射峰值强度的 1.58 倍，光束轴向中心方向上的峰值强度约为入射峰值强度的 1.28 倍，对角方向上的峰值强度较轴向中心方向的峰值强度提升了约 1.23 倍。在距光束中心约 0.17 cm 处，光束对角方向上的强度约为入射峰值强度的 0.98 倍，光束轴向中心方向强度约为入射峰值强度的 1.01 倍，对

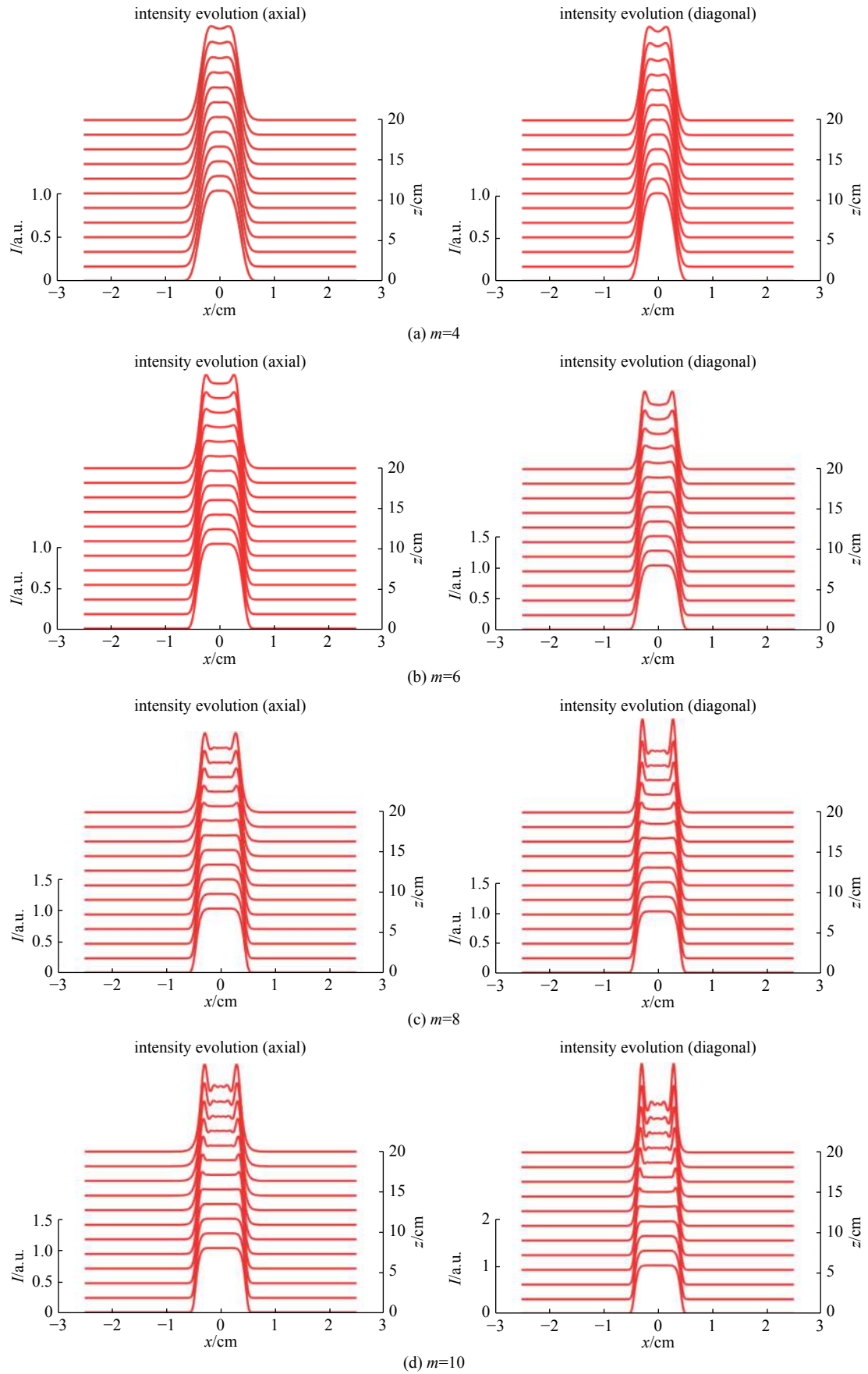


Fig. 2 Axial center intensity evolution process and diagonal intensity evolution process of a square super-Gaussian beam

图 2 方形超高斯光束轴向中心强度演化过程与对角强度演化过程

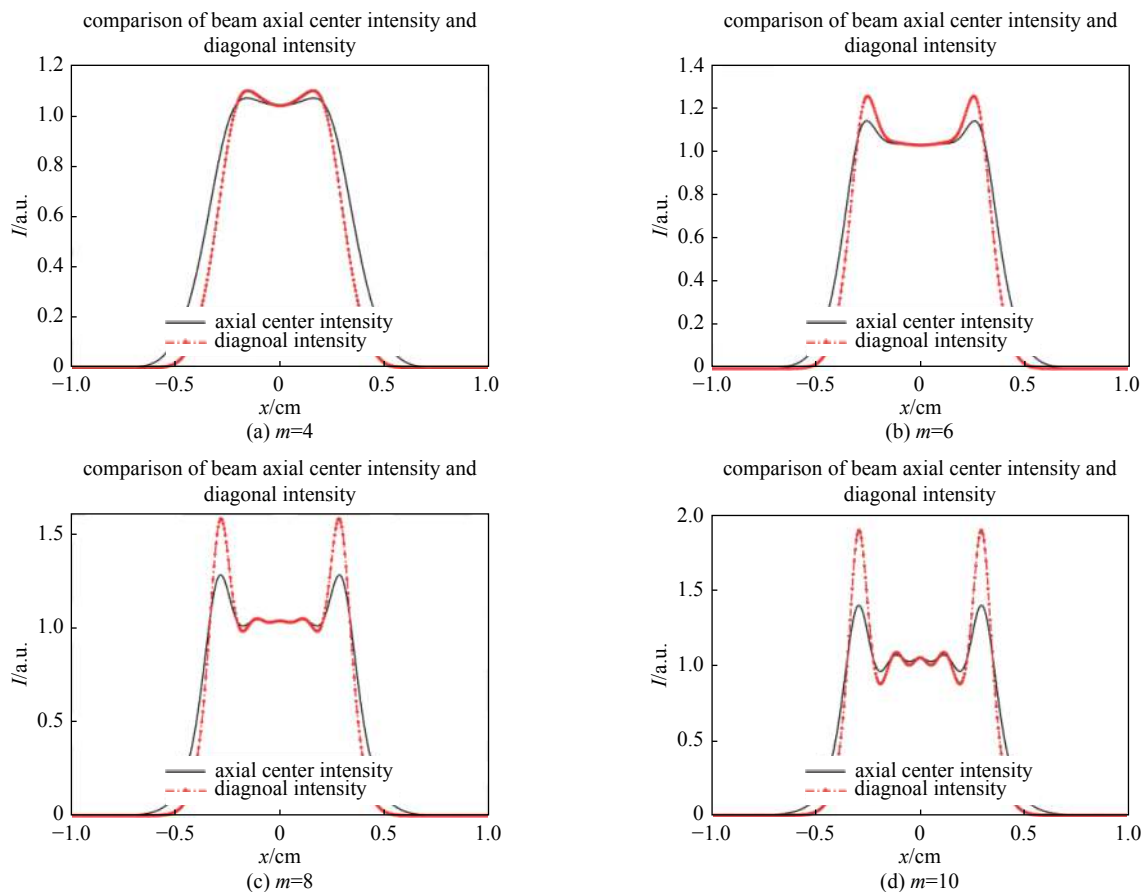


Fig. 3 Comparison of axial central intensity and diagonal intensity of square super-Gaussian beam on the back surface of Kerr medium

图 3 方形超高斯光束在 Kerr 介质后表面的轴向中心强度与对角强度对比图

角方向上的强度约为轴向中心方向的强度的 0.97 倍；当 $m=10$ 时，在距光束中心约 0.29 cm 处，光束对角方向上的峰值强度约为入射峰值强度的 1.90 倍，光束轴向中心方向上的峰值强度约为入射峰值强度的 1.40 倍，对角方向上的峰值强度较轴向中心方向的峰值强度提升了约 1.36 倍。在距光束中心约 0.19 cm 处，光束对角方向上的强度约为入射峰值强度的 0.88 倍，光束轴向中心方向强度约为入射峰值强度的 0.96 倍，对角方向上的强度约为轴向中心方向的强度的 0.92 倍。在四种阶数的光束中心区域，对角方向上与轴向中心方向上的强度都有小幅度的增强和凹陷，但二者相差较小。由上述可知，随着阶数的增加，出射光束对角方向上以及轴向中心方向上的自聚焦效应会显著增强，且出射光束对角方向上的自聚焦效应明显强于轴向中心方向，这可能导致介质的对角方向上更容易遭到破坏。同时，阶数越高，出射光束强度增强和凹陷的范围越广。光束中心区域的大部分相干叠加可能是造成光束中心区域附近以及光束边缘强度增强和凹陷的原因。衍射效应和自聚焦效应的共同作用会使光束四角强度剧增，引起光束对角方向上的强度增强和凹陷较光束的轴向中心方向更强，从而导致对角方向上的束宽小于轴向中心方向的束宽。

B 积分是评判自聚焦效应的强弱以及对光学元件破坏的危险性的基本判据^[17-18]，其表达式为

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^z \gamma I(z) dz \quad (3)$$

图 4 给出了阶数 $m=4$, $m=6$, $m=8$ 及 $m=10$ 的方形超高斯光束在 Kerr 介质中传输时 B 积分的变化情况。可以看出，四种阶数的 B 积分大小随着传输距离的增长而呈线性增长，但传输至一定距离后， B 积分增长速率随着阶数的增加而增加。四种阶数的光束从 Kerr 介质后表面出射时的 B 积分大小分别约为 1.012, 1.036, 1.12, 1.244 rad。这说明方形超高斯光束的阶数越高， B 积分的增长速率越快， B 积分的值越大。采用较低阶数的方形超高斯光束可以有效减缓 B 积分的增长。另外，减少 Kerr 介质的厚度也可以有效减小 B 积分的大小。

为了防止强自聚焦引起光束强度剧增而对介质造成损伤，减缓出射光束边缘的强度增强程度非常必要。图 5 给出了阶数 $m=4$, $m=6$, $m=8$ 及 $m=10$ 的方形超高斯光束在 Kerr 介质中传输时的归一化峰值光强变化情况。从图 5

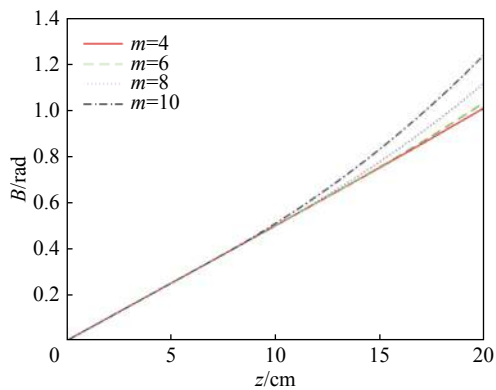


Fig. 4 B-integral variation of square super-Gaussian beams in Kerr medium

图4 方形超高斯光束在Kerr介质中的B积分变化情况

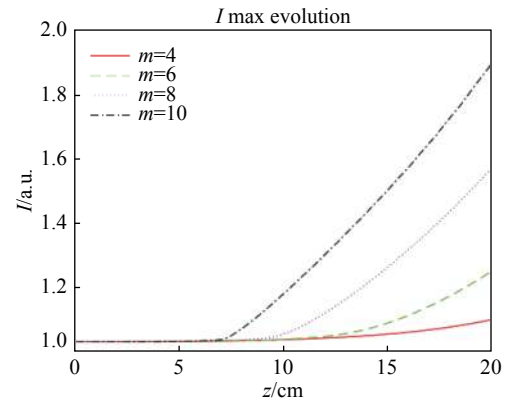


Fig. 5 Peak intensity variation of square super-Gaussian beams in Kerr medium

图5 方形超高斯光束在Kerr介质中的峰值光强变化情况

中可以看出,光束在Kerr介质内的传输过程中,自聚焦效应先与衍射效应相平衡,当光束传输至一定距离后,自聚焦效应强于衍射效应。四种阶数的方形超高斯光束峰值光强呈线性增长,当 $m=4$ 时,出射光束峰值光强约为入射光束峰值光强的1.1倍;当 $m=6$ 时,出射光束峰值光强约为入射光束峰值光强的1.25倍;当 $m=8$ 时,出射光束峰值光强约为入射光束峰值光强的1.58倍;当 $m=10$ 时,出射光束峰值光强约为入射光束峰值光强的1.9倍。随着超高斯阶数的增长,光束发生自聚焦的位置越来越靠近Kerr介质前表面,峰值光强增长得更快。其原因在于随着超高斯光束阶数的增长,光束边缘强度下降更快,致使光束边缘相速度变化更快,从而导致阶数更高的方形超高斯光束发生自聚焦的位置更靠近Kerr介质前表面,且自聚焦效应更强。这说明采用较低阶数的方形超高斯光束可以有效地减缓光束边缘强度增强。另外,减少Kerr介质的厚度也可以有效降低光束边缘强度增强。

3 结论

本文采用分步傅里叶算法模拟了方形超高斯光束在Kerr介质内传输情况,研究了阶数 $m=4, m=6, m=8$ 及 $m=10$ 时的方形超高斯光束在Kerr介质中的强度演化特性,并对其在Kerr介质内传输时的轴向中心强度和对角方向强度进行对比分析。研究表明,方形超高斯光束通过Kerr介质后,其强度会有不同程度的增强和凹陷,光束中心区域的强度增强和凹陷较弱,光束边缘以及四角处的强度增强和凹陷较强。阶数越高,方向超高斯光束强度增强和凹陷的范围越广,且强度增强和凹陷的程度越强。造成光束中心区域以及光束边缘强度增强和凹陷的原因可能在于光束中心区域的大部分相干叠加。衍射效应和自聚焦效应的共同作用会使光束四角处强度剧增,引起光束对角方向上的强度增强和凹陷较光束的轴向中心方向更强,从而导致对角方向上的束宽小于轴向中心方向。

在实际运用中采用较低阶数的方形超高斯光束可以减缓光束通过Kerr介质后边缘强度增强,同时可以减缓B积分的增长。减少Kerr介质的厚度可以有效降低光束边缘强度增强,也可以有效减小B积分的大小。

参考文献:

- [1] Baisden P A, Atherton L J, Hawley R A, et al. Large optics for the National Ignition Facility[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 295-351.
- [2] Wegner P J, Auerbach J M, Biesiada T A Jr, et al. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning[C]//Proceedings of SPIE 5341. 2004: 180-189.
- [3] Manes K R, Spaeth M L, Adams J J, et al. Damage mechanisms avoided or managed for NIF large optics[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 146-249.
- [4] Spaeth M L, Manes K R, Bowers M, et al. National Ignition Facility laser system performance[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 366-394.
- [5] Feigenbaum E, Di Nicola J M G, Bude J D. Revisiting beam filamentation formation conditions in high power lasers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 10611-10630.
- [6] Lanier T E, Cohen S J, Nicola J, et al. Time-gated measurements of fusion-class laser beam profiles[C]//Proceedings of SPIE 11259. 2020: 39.
- [7] 唐永林, 张小民, 景峰, 等. 强激光超高斯光束形成的自聚焦环的分裂与抑制[J]. *光学学报*, 2001, 21(4): 390-393. (Tang Yonglin, Zhang Xiaomin, Jing Feng, et al. Breakup and suppression of self-focusing rings originated from high intensity super-Gaussian beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(4): 390-393)
- [8] 卢光山, 胡巍, 傅喜泉, 等. 环形光束的聚焦性质研究[J]. *光子学报*, 2003, 32(2): 209-213. (Lu Guangshan, Hu Wei, Fu Xiquan, et al. Study of focused annular beam[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(2): 209-213)
- [9] 唐永林, 景峰, 张小民, 等. 强激光圆对称超高斯光束的自聚焦环[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(s1): 221-224. (Tang Yonglin, Jing Feng, Zhang Xiaomin, et

- al. Self-focusing ring of circle symmetric super-Gaussian beam[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(s1): 221-224)
- [10] 胡婧, 王欢, 季小玲. Kerr非线性介质中聚焦像散高斯光束的传输特性[J]. *物理学报*, 2021, 70: 074205. (Hu Jing, Wang Huan, Ji Xiaoling. Propagation characteristics of focused astigmatic Gaussian beams in Kerr nonlinear media[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70: 074205)
- [11] 陈雪琼, 陈子阳, 蒲继雄, 等. 平顶光束经表面有缺陷的厚非线性介质后的光强分布[J]. *物理学报*, 2013, 62: 044213. (Chen Xueqiong, Chen Ziyang, Pu Jixiong, et al. Intensity distribution of the flat-topped beam propagating through the thick nonlinear medium with defects[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62: 044213)
- [12] 吕百达, 罗时荣. 强激光的计算模拟: 平顶高斯光束模型[J]. *红外与激光工程*, 2001, 30(6): 457-461. (Lü Baida, Luo Shirong. High-power laser modeling: flattened Gaussian beams[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(6): 457-461)
- [13] 周宁, 张兰芝, 李东伟, 等. 飞秒平顶光束经微透镜阵列在熔融石英中的成丝及其超连续辐射[J]. *物理学报*, 2018, 67: 174205. (Zhou Ning, Zhang Lanzhi, Li Dongwei, et al. Filamentation and supercontinuum emission with flattened femtosecond laser beam by use of microlens array in fused silica[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67: 174205)
- [14] Shen Y R. The principles of nonlinear optics[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1984.
- [15] 李琨, 张彬, 李格宇, 等. 熔石英介质中强紫外激光自聚焦效应研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(10): 1653-1656. (Li Kun, Zhang Bin, Li Keyu, et al. Nonlinear self-focusing by intense UV laser in fused silica[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(10): 1653-1656)
- [16] Milam D, Hunt J T, Manes K R, et al. Modeling of filamentation damage induced in silica by 351-nm laser pulses[C]//Proceedings of SPIE 2966. 1996: 425-428.
- [17] 黄志华, 邓颖, 许党朋, 等. 高功率光纤啁啾脉冲放大光源中的B积分受限[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 081011. (Huang Zhihua, Deng Ying, Xu Dangpeng, et al. B integral limitation in high power fiber chirped pulse amplification optical source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 081011)
- [18] Erickson M A, Cohen S J, Di Nicola J M, et al. Spatially resolved B-integral measurements on the NIF laser[C]//Proceedings of SPIE 11259. 2020: 17.