

激光与光电子学进展

振幅调制平顶光束在靶腔内的光强分布特性

苏倩倩*, 汤梦饶

厦门工学院电子与电气工程学院, 福建 厦门 361021

摘要 推导出了平顶高斯光束经有限个小尺寸振幅调制型缺陷调制聚焦后, 激光间接驱动聚变靶腔内及腔壁的光场分布解析式, 详细研究了缺陷尺寸和调制幅度等因素对光强分布的影响, 并进一步研究了入射角度对调制光束在腔壁上投影衍射光场的影响。结果表明: 缺陷尺寸越大, 缺陷调制幅度越大, 光束受到的扰动越明显, 调制光场恢复为平顶高斯分布所需的传输距离越远; 当光束的入射角小于 10° 时, 光束到达腔壁前经过的路径较长, 调制后的平顶高斯光束在腔壁上投影的光斑往 x 轴方向扩散, 缺陷引起的光强扰动变化明显减弱, 光斑强度整体下降。

关键词 激光光学; 平顶高斯光束; 振幅调制; 光强分布

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1914001

Intensity Distribution Characteristics of Flat-Top Beam After Amplitude Modulation in Target Cavity

Su Qianqian*, Tang Mengrao

School of Electronics and Electrical Engineering, Xiamen Institute of Technology,
Xiamen 361021, Fujian, China

Abstract In this paper, the analytical expression of the light field distribution in the cavity and the wall of the laser indirect driven fusion target after the flat-top Gaussian beam is focused by the finite number of small amplitude modulated defects are derived. The influence of the size of the defect and the modulation amplitude on the intensity distribution is studied in detail. The influence of incident angle on the diffracted light field of the modulated beam projected onto the cavity wall is further studied. The results show that the larger the size of the defect, the larger the modulation amplitude of the defect, the more obvious the disturbance of the beam, and the longer the transmission distance required for the optical field distribution to be restored to the flat-top Gaussian distribution. When the incident angle of the incident beam is less than 10° , the path of the beam before reaching the cavity wall is long, and the spot projected by the modulated flat-top Gaussian beam on the cavity wall diffuses to the x -axis direction. The change of intensity disturbance caused by defect is obviously weakened, and the spot intensity decreases as a whole.

Key words laser optics; flat-top Gaussian beam; amplitude modulation; intensity distribution

1 引言

激光驱动惯性约束聚变(ICF)是实现受控热核聚变、完成实验室核爆模拟的重要手段之一^[1-2]。间接驱动先将强激光照射在高原子序数元素制成的腔靶内壁上, 腔靶内壁将吸收的激光能量转化为强 X 射线, 然后通过强 X 射线灼烧压缩位于腔靶中心的氘氚(DT)燃料球形靶丸。激光能量主要沉积在腔壁附近, 并以面

发射形式在腔壁附近将激光能量转换为 X 光, 控制 X 光发射的空间位置和时间, 从而控制靶丸的辐照均匀性。因此, 创造一个高温、干净、均匀的辐射场是实现间接驱动的前提。

激光加热初期, 靶丸的辐照不均匀性主要由腔内的激光光场分布决定^[3]。高功率系统的结构相当复杂, 其中, 光学元件承载着整个光束的传输, 而光学元件表面会不可避免地存在缺陷, 如划痕、污染、损伤, 这

收稿日期: 2021-07-13; 修回日期: 2021-08-18; 录用日期: 2021-09-24

基金项目: 2020 年福建省中青年教育科研项目科技 A 类(JAT200835)、电子与电气工程学院 2020 年度院级科研项目(EEKY202002)、厦门工学院嵌入式人工智能计算及应用科研创新团队(KYTD202003)

通信作者: *suqianqian198771@126.com

些缺陷均会引起光束畸变,降低靶腔内的光场均匀性^[4-8]。国内外学者在多方面报道了缺陷对光束近场分布的影响,如针对宏观可见缺陷引入的畸变在传输过程中的演化研究^[6-7],但针对微小尺寸振幅调制型缺陷对平顶光束在靶腔及腔壁上光强分布的影响研究较少。因此,本文研究了有限个振幅调制点对平顶高斯光束光强分布的影响,建立了平顶高斯光束受集群调制后的光强模型,并着重分析了振幅调制幅度、缺陷尺寸、集群调制等因素对腔内及腔壁光场演化规律的影响。

2 振幅调制的模型建立及理论分析

实验仅研究振幅调制型缺陷对靶腔内光场分布的影响。振幅调制型缺陷的透过率可表示为

$$t(X, Y) = 1 - A \exp\left[-\frac{(X - x_0)^2 + (Y - y_0)^2}{r_0^2}\right], \quad (1)$$

式中: A 为缺陷的振幅调制幅度; (X, Y) 为光束横截面上任意一点的坐标; (x_0, y_0) 为缺陷在横向的中心坐标位置; r_0 为缺陷的半径。

光强分布可用超高斯光束模型描述^[8-12],若 z 为光束传输的中心轴,则 $z=0$ 处的光场分布可表示为

$$E_1(X_1, Y_1, 0) = \exp\left[-\frac{(N+1)X_1^2}{\omega_{0x}^2}\right] \times \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[\frac{(N+1)X_1^2}{\omega_{0x}^2}\right]^n \exp\left[-\frac{(M+1)Y_1^2}{\omega_{0y}^2}\right] \times \sum_{m=0}^M \frac{1}{m!} \left[\frac{(M+1)Y_1^2}{\omega_{0y}^2}\right]^m, \quad (2)$$

式中: N, M 分别为 X, Y 方向的阶数; ω_{0x}, ω_{0y} 分别为 X, Y 方向的光束腰半径;方形平顶光束的 $N=M=10$, $\omega_{0x} = \omega_{0y} = \omega_0$ 。

图 1 为光束照射到柱形靶腔装置的示意图^[13]。其中: L 为柱形靶腔的长; R 为柱形靶腔的外径;靶丸置

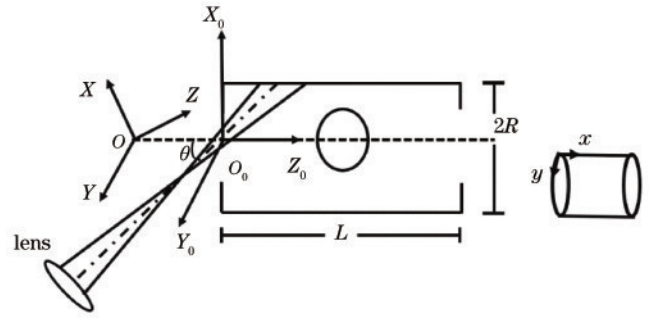


图 1 ICF 靶腔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the ICF target cavity

于柱形腔中心,激光束与腔轴的夹角为 θ 。入射光坐标 (X, Y, Z) 与腔体坐标 (X_0, Y_0, Z_0) 的转换公式为

$$\begin{cases} Z = Z_0 \cos \theta + X_0 \sin \theta \\ X = X_0 \cos \theta - Z_0 \sin \theta \\ Y = Y_0 \end{cases} \quad (3)$$

腔壁所在坐标系的坐标 (x, y) 与入射光坐标之间的转换公式^[13-16]为

$$\begin{cases} X = R \sin(y/R) \\ Y = R \cos(y/R) \cos \theta - (R \cos \theta + x \cos \theta) \\ Z = z_0 + f + \frac{R \cos(y/R) \sin^2 \theta + \cos^2 \theta}{\sin \theta} + x \cos \theta \end{cases}, \quad (4)$$

近轴光学系统的光学矩阵可表示为

$$\begin{cases} A = -Z/f \\ B = Z + f \\ C = -1/f \\ D = 1 \end{cases}, \quad (5)$$

式中: f 为透镜焦距; A, B, C, D 为传输矩阵中的元素。平顶高斯光束通过振幅调制型缺陷的透镜入射到靶腔内,在傍轴近似的情况下,利用广义菲涅耳衍射积分公式得到靶腔内的光场分布,可表示为

$$E_3(X, Y, Z) = \frac{ik}{B} \exp(-ikZ) \times \iint_s E_1(X_1, Y_1, 0) t(X_1, Y_1) \times \exp\left\{-\frac{ik}{2B} \times \left[A(X_1^2 + Y_1^2) - 2[X_1X + Y_1Y + D(X_1 + Y_1)] \right]\right\} dX_1 dY_1, \quad (6)$$

式中: $E_1(X_1, Y_1, 0)$ 为入射光束的光场分布函数; $E_3(X, Y, Z)$ 为光束传输过程中的光场分布函数。

根据 $ABCD$ 传输矩阵和 Collins 衍射积分公式^[13],推导得到傍轴近似下光场复振幅对应的解析表达式为

$$E_3(X, Y, Z) = E_0(X, Y, Z) - A \frac{ik}{B} \frac{\exp(-\frac{x_0^2 + y_0^2}{r_0^2})}{\sqrt{\frac{N+1}{\omega_0^2} + \frac{ikA}{B} + \frac{1}{r_0^2}}} E_{3X}(X, Y, Z) E_{3Y}(X, Y, Z), \quad (7)$$

$$E_{3X}(X, Y, Z) = \exp\left(-\frac{ikD}{2B} X^2\right) \exp\left[-\frac{\left(\frac{kX}{B} - i\frac{2x_0}{r_0^2}\right)^2}{4\left(\frac{N+1}{\omega_0^2} + \frac{ikA}{B} + \frac{1}{r_0^2}\right)}\right] \sum_{n_1=0}^N \left[\left(-\frac{1}{4}\right)^{n_1} \frac{1}{n_1!} \times \left(\frac{N+1}{\omega_0^2}\right)^{n_1} \left(\frac{N+1}{\omega_0^2} + \frac{ikA}{B} + \frac{1}{r_0^2}\right)^{-n_1} H_{2n_1}\left(\frac{kX/B}{2\sqrt{\frac{N+1}{\omega_0^2} + \frac{ikA}{B} + \frac{1}{r_0^2}}}\right) \right], \quad (8)$$

$$E_{3Y}(X, Y, Z) = \exp\left(-\frac{ikD}{2B} Y^2\right) \exp\left[-\frac{\left(\frac{kY}{B} - i\frac{2y_0}{r_0^2}\right)^2}{4\left(\frac{N+1}{\omega_0^2} + \frac{ikA}{B} + \frac{1}{r_0^2}\right)}\right] \sum_{n_2=0}^N \left[\left(-\frac{1}{4}\right)^{n_2} \frac{1}{n_2!} \times \left(\frac{N+1}{\omega_0^2}\right)^{n_2} \left(\frac{N+1}{\omega_0^2} + \frac{ikA}{B} + \frac{1}{r_0^2}\right)^{-n_2} H_{2n_2}\left(\frac{kY/B}{2\sqrt{\frac{N+1}{\omega_0^2} + \frac{ikA}{B} + \frac{1}{r_0^2}}}\right) \right], \quad (9)$$

式中： E_0 为未被调制的光场复振幅； H_{2n} 为厄米多项式。平顶高斯光束经振幅调制缺陷调制后在靶腔内的光强分布可表示为

$$I_3(X, Y, Z) = |E_3(X, Y, Z)|^2. \quad (10)$$

3 数值模拟及分析

对式(7)~式(10)进行数值模拟,以进一步研究平顶高斯光束通过振幅型缺陷透镜后在靶腔截面和腔壁的光强分布情况。仿真参数:入射激光束的波长 $\lambda=351 \text{ nm}$;黑腔长度 $L=9.425 \text{ mm}$;黑腔的外径 $R=2.72 \text{ mm}$;光的束腰半径 $\omega_0=180 \text{ mm}$;透镜的焦距 $f=2.2 \text{ m}$ 。

对腔内截面光强的分布特性进行数值模拟时,考虑光束入射到靶腔的角度为 0,缺陷位于透镜中心处的情况,得到不同调制幅度和不同尺寸局域振幅缺陷对靶腔内横截面光场分布的影响如图 2 所示。可以发现:在接近透镜焦点 0.005 mm 的位置,被调制区域的光强分布起伏明显;当调制缺陷尺寸为 0.5 mm 、调制幅度为 0.5 时,只需传输 0.145 mm 就能使光强分布弥散接近均匀;当缺陷尺寸由 0.5 mm 增大到 1.0 mm 、调制幅度由 0.5 增大到 1.0 时,缺陷的挡光率增大,被调制区域的光强分布起伏明显增加,调制范围增大,光强恢复为原来大小所需的传输距离增大。这表明缺陷尺寸和调制幅度的微小变化对光强分布的调制会起到明显作用。

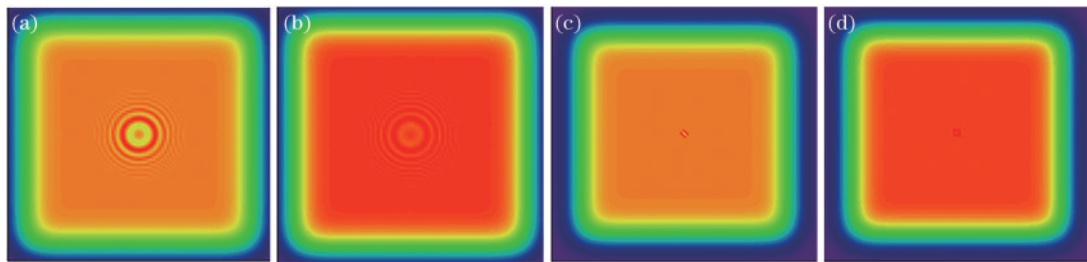


图 2 调制幅度和缺陷尺寸对靶腔截面光强分布的影响。(a) $r_0=1.0 \text{ mm}, A=1.0, z_0=0.005 \text{ mm}$; (b) $r_0=0.5 \text{ mm}, A=0.5, z_0=0.005 \text{ mm}$; (c) $r_0=1.0 \text{ mm}, A=1.0, z_0=0.250 \text{ mm}$; (d) $r_0=0.5 \text{ mm}, A=0.5, z_0=0.150 \text{ mm}$

Fig. 2 Influence of modulation amplitude and defect size on the intensity distribution in the target cavity section. (a) $r_0=1.0 \text{ mm}, A=1.0, z_0=0.005 \text{ mm}$; (b) $r_0=0.5 \text{ mm}, A=0.5, z_0=0.005 \text{ mm}$; (c) $r_0=1.0 \text{ mm}, A=1.0, z_0=0.250 \text{ mm}$; (d) $r_0=0.5 \text{ mm}, A=0.5, z_0=0.150 \text{ mm}$

当激光束的入射角 $\theta=30^\circ$,且缺陷位于透镜中心时,不同调制幅度和缺陷尺寸对激光会聚后在靶腔腔壁上光强分布的影响如图 3 所示。其中,图 3(a)~图 3(c)为单个缺陷调制后的情况,可以发现:调制幅度 A 由 0.3 增大到 1.0 ,缺陷尺寸由 1.0 mm 增大到 3.0 mm 时,腔壁上的光强起伏逐渐明显,被调制范围明显增大,衍射现象也越来越明显;在横向方向光斑拉长,光场波动起伏影响范围增大,而纵向方向光强分布

相对均匀。图 3(d)为两个尺寸及位置不同缺陷下入射平顶高斯光束在靶腔腔壁上的光强分布。可以发现,平顶高斯光束经过两个振幅调制型缺陷调制后,光场分布相互干涉,整个光强分布更紊乱。图 3(e)为不同缺陷调制后 x 方向的光强分布,能更直观地分析不同幅度、尺寸、数量的缺陷对横向光强分布的影响。

当缺陷尺寸为 2.0 mm ,调制深度为 1 ,调制光束以不同角度入射到靶腔内时腔壁上的光强分布如图 4 所

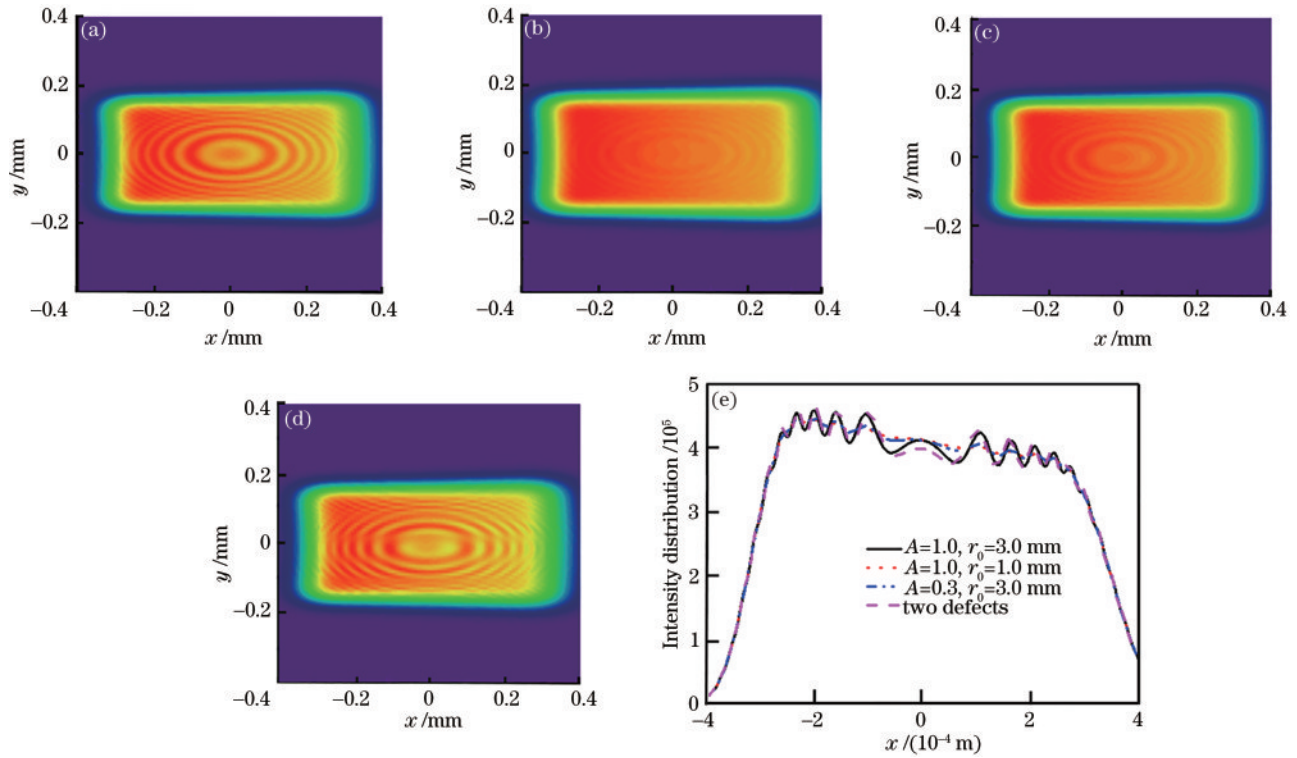


图 3 调制幅度和缺陷尺寸对腔壁光场分布影响。(a) $r_0=3.0$ mm, $A=1.0$; (b) $r_0=1.0$ mm, $A=1.0$; (c) $r_0=3.0$ mm, $A=0.3$; (d) 两个缺陷; (e) x 轴的光强分布

Fig. 3 Influence of modulation amplitude and defect size on the intensity distribution of the cavity wall. (a) $r_0=3.0$ mm, $A=1.0$; (b) $r_0=1.0$ mm, $A=1.0$; (c) $r_0=3.0$ mm, $A=0.3$; (d) two defects; (e) intensity distribution of x -axis

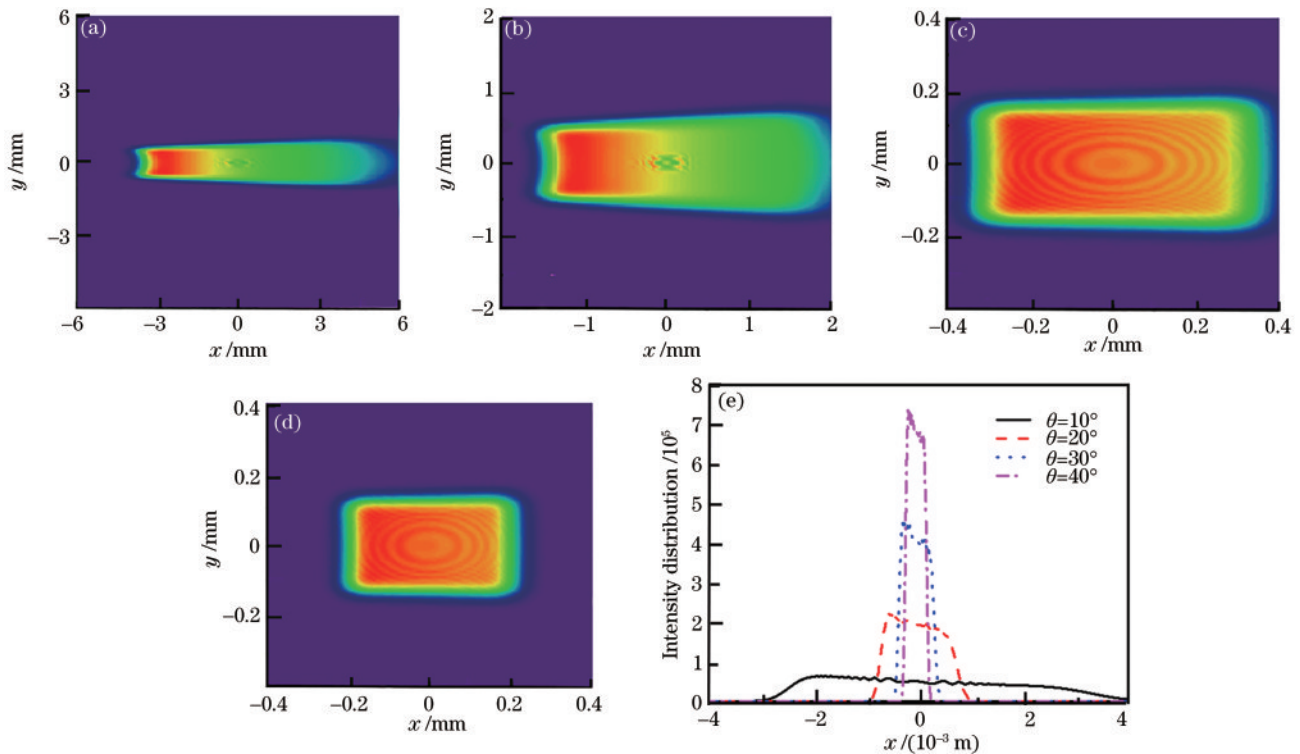


图 4 不同入射角对腔壁上光强分布的影响。(a) $\theta=10^\circ$; (b) $\theta=20^\circ$; (c) $\theta=30^\circ$; (d) $\theta=40^\circ$; (e) x 轴的光强分布

Fig. 4 Influence of different incident angles on the intensity distribution of the cavity wall. (a) $\theta=10^\circ$; (b) $\theta=20^\circ$; (c) $\theta=30^\circ$; (d) $\theta=40^\circ$; (e) intensity distribution of x -axis

示。可以发现:当入射角度由 10° 增大到 40° 时,光束到达腔壁前经过的路径越来越短,光斑在腔壁上的投影往 x 方向扩散明显,缺陷引起的光强起伏变化也越明显;由于缺陷尺寸较大,光场到达腔壁前还无法弥散均

匀,但缺陷引起的光强扰动已明显减小;当入射角度增大到 30° 时,光束到达腔壁前经过的路径较短,光强起伏主要受缺陷调制幅度的影响。图 4(e)为被调制光束以不同角度入射在 x 方向的分布,能更直观地分析不同入射角度对横向光强分布的影响。可以发现,在腔壁上投影的光斑往 x 方向扩散,光斑强度整体下降,且沿 x 轴正方向光强逐渐减弱,离调制缺陷中心的距离越大,光强起伏越小。

4 结 论

推导了平顶高斯光束经有限个小尺寸振幅调制型缺陷调制后在激光间接驱动聚变装置腔内及腔壁的光场分布解析式,详细研究了振幅调制点的尺寸、调制幅度、调制点数目、光束入射角度等因素对激光靶腔横截面和腔壁光场分布的影响。仿真结果表明,光束受到缺陷调制的区域光强会明显减小:当缺陷尺寸由 0.5 mm 增大到 1.0 mm ,调制幅度由 0.5 增大到 1.0 时,缺陷挡光率增大,被调制区域的光强分布起伏明显增加,调制范围增大,光强恢复为原来大小所需的传输距离也越远;当缺陷尺寸为 2.0 mm ,入射角小于 20° 时,光束到达腔壁前经过的路径较远,腔壁上的投影光斑往 x 方向扩散明显,缺陷引起的光强扰动也明显减小;当入射角度增大到 30° 时,腔壁上的投影光强起伏主要受缺陷调制的影响,且被调制光束在腔壁上的投影光斑强度整体下降,沿 x 轴正方向光强逐渐减弱。本研究结果为靶面上的均匀辐照提供一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] 朱健强, 陈绍和, 郑玉霞, 等. 神光 II 激光装置研制[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100002.
Zhu J Q, Chen S H, Zheng Y X, et al. Review on development of Shenguang-II laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100002.
- [2] 李琼瑶, 扎西巴毛, 陈子阳, 等. 激光通过不同厚度的强散射介质的聚焦[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111016.
Li Q Y, Zhaxi B, Chen Z Y, et al. Focusing of laser through strong scattering media with different thicknesses[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111016.
- [3] 张小民, 胡东霞, 许党朋, 等. 浅论强激光系统的物理受限问题[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1201002.
Zhang X M, Hu D X, Xu D P, et al. Physical limitations of high-power, high-energy lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1201002.
- [4] 张小民, 魏晓峰. 中国新一代巨型高峰值功率激光装置发展回顾[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100003.
Zhang X M, Wei X F. Review of new generation of huge-scale high peak power laser facility in China[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100003.
- [5] Jiang Y, Yuan X D, Xiang X, et al. Scratch types and damage thresholds of fused silica[C]//2010 Symposium on Photonics and Optoelectronics, June 19-21, 2010, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2010.
- [6] 陆敏, 王治乐, 张树青, 等. 表面缺陷的偏振散射表征方法及区分原理[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1229001.
Lu M, Wang Z L, Zhang S Q, et al. Polarization scattering characterization and discrimination principle of surface defects[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1229001.
- [7] 黄晚晴. 大口径熔石英元件表面激光损伤特性研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2009.
Huang W Q. Study on laser damage characteristics of large diameter fused silica element surface[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2009.
- [8] 王友文, 胡勇华, 文双春, 等. 高功率激光系统中非线性热像与模糊斑大小的关系[J]. 光学学报, 2007, 27(10): 1836-1841.
Wang Y W, Hu Y H, Wen S C, et al. Relationship between nonlinear hot image and dimensions of obscurations in high-power lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(10): 1836-1841.
- [9] 刘兰琴, 林宏奂, 彭志涛, 等. 堆积啁啾脉冲时间调制及强度演化规律[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1305-1309.
Liu L Q, Lin H H, Peng Z T, et al. Evolutionary rules of time modulation and intensity of stacked chirped pulses[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1305-1309.
- [10] 肖峻, 吕百达, 袁晓东, 等. 激光直接驱动聚变中光束排布的优化[J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(2): 234-238.
Xiao J, Lü B D, Yuan X D, et al. Optimization of the configuration of beams for laser direct driven fusion[J]. High Power Laser & Particle Beams, 1998, 10(2): 234-238.
- [11] 郑建洲, 于清旭, 卢永军, 等. 焦斑可调的透镜阵列均匀辐照光学系统[J]. 中国激光, 2007, 34(3): 331-336.
Zheng J Z, Yu Q X, Lu Y J, et al. Improved lens arrays optical system with controllable focus width for uniform irradiation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(3): 331-336.
- [12] 田明旺, 王一帆, 张书练, 等. 高斯光束准直倍率的研究及再讨论[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0914001.
Tian M W, Wang Y F, Zhang S L, et al. Research and rediscussion on collimation factor of Gaussian beam[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0914001.
- [13] 吕百达. 激光光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
Lü B D. Laser Optics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [14] 侯鹏程, 钟哲强, 文萍, 等. 激光间接驱动柱形腔壁辐照特性[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 1106001.
Hou P C, Zhong Z Q, Wen P, et al. Irradiation characteristics of laser quads on cylindrical hohlraum wall in indirect-drive facility[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(11): 1106001.
- [15] 卢光山. 激光光束传输算法研究[D]. 广州: 华南师范大学, 2003.
Lu G S. Research on the algorithm of laser beam propagation[D]. Guangzhou: South China Normal University, 2003.
- [16] 黄德权, 姚欣, 赵曦, 等. ICF 靶腔曲面光场计算[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(1): 69-74.
Huang D Q, Yao X, Zhao X, et al. Light intensity distribution calculation of curved surface diffraction patterns applied in ICF[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1): 69-74.