

振幅调制型“缺陷”对高斯光束的光强分布和角谱的影响

苏倩倩¹ 张国文² 陶 华¹ 蒲继雄¹

(¹华侨大学信息科学与工程学院, 福建 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)

摘要 光学元件上不可避免存在的“缺陷”会对传输光束产生调制, 基于广义惠更斯-菲涅耳衍射积分和角谱的定义, 推导出了高斯光束经有限个小尺寸振幅调制型“缺陷”之后的光强和角谱解析式。详细研究了振幅调制型“缺陷”的尺寸大小及调制幅度对受调制光束的光强分布和角谱影响。结果表明, 经过“缺陷”的光束传输一定距离之后光强恢复为高斯分布。而“缺陷”的尺寸越大, 光强分布恢复为高斯分布所需的传播距离越长, 且随“缺陷”尺寸及调制幅度增大, 低频区的角谱减小, 中高频区的角谱增大。

关键词 激光光学; 振幅调制; 菲涅耳衍射积分; 光强分布; 角谱

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.s102004

Effect of the Amplitude Modulated Defects on the Intensity Distribution and the Angular Spectrum of a Gaussian beam

Su Qianqian¹ Zhang Guowen² Tao Hua¹ Pu Jixiong¹

(¹Department of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China
²National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The unavoidable defects existing in optical components will influence the beam propagation in the optical system. Based on the Fresnel diffraction integral and the definition of angular spectrum, the analytical expressions for the light-intensity distribution and angular spectrum of a Gaussian beam modulated by finite-amplitude modulated defects are derived. The influence of the size and the modulation amplitude of the defects on the intensity distribution and angular spectrum of the beam is also studied. It is shown that the intensity distribution will recover to Gaussian distribution after propagating a certain distance. The larger size of defects is, the longer propagation distance is for the beam recovering to Gaussian distribution. Furthermore, the angular spectrum of the modulated beam in the low-frequency area becomes smaller and the angular spectrum in the high frequency area becomes greater with the increase of the size and the modulation amplitude of the defects.

Key words laser optics; amplitude modulation; Fresnel diffraction integral; light-intensity distribution; angular spectrum

OCIS codes

1 引 言

光学系统中的光学元件一般决定着输出光束的

质量, 特别是在高功率固体激光装置中, 该系统具有相当复杂的结构及众多的元件, 如美国的国家点火

收稿日期: 2011-07-10; **收到修改稿日期:** 2011-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(60977068)和高功率激光物理国家实验室开放基金课题(SG-001102)和华侨大学学科重点建设项目资助课题。

作者简介: 苏倩倩(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光传输与光束变换的等方面的研究。

E-mail: qianqian198771@126.com

导师简介: 蒲继雄(1962—), 男, 教授, 主要从事光束传输与非线性光学等方面的研究。E-mail: jixiong@hqu.edu.cn

装置(NIF),法国的兆焦耳激光器(LMJ)以及我国的神光等,其中数目上千块的光学元件承载着整个系统的光传输。由于加工工艺及运行环境等原因,光学元件表面必然存在的杂质、划痕、麻点、亚表面缺陷和灰尘等“缺陷”^[1~11],会引起光束畸变,降低光束质量,从而增加了光学元件损伤的风险。目前,国内外广泛报道了“缺陷”对光束近场的影响^[7,9,10,13~15],有针对宏观可见的“缺陷”引入的畸变在传输过程中的演化研究,还有研究者采用统计方法进行分析振幅调制对传输光束的影响^[12,13]。而针对微小尺寸的振幅调制型“缺陷”的调制幅度及集群调制如何影响光束的光强和角谱的鲜有报道。基于此,本文研究了有限多个振幅调制点对高斯光束的光强分布和角谱的影响情况,建立了高斯光束受集群调制之后的光强和角谱的模型,并着重分析了振幅调制幅度、“缺陷”尺寸大小和集群调制等因素对光束近场的演化规律及对角谱的影响,所得研究结果对激光诱导损伤的研究有一定的参考价值。

2 局域振幅调制的模型建立及理论分析

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相位引入调制,对振幅的调制通过影响光学元件的振幅透射率分布实现,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,比如划痕、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,其透射率为^[13]

$$T(x, y, z) = [1 - h(x, y, z)] \exp[i\phi(x, y, z)], \quad (1)$$

式中 $h(x, y, z)$ 为“缺陷”元件振幅挡光率的空间分布, $\phi(x, y, z)$ 为“缺陷”元件相位畸变的空间分布。本文只针对振幅调制型“缺陷”对光强和角谱的影响

情况进行研究。取“缺陷”的振幅透射率为高斯型,这比完全挡光点更为合理,则其透射率为

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

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, r_0 为“缺陷”半径。

高斯光束通过振幅调制型“缺陷”之后传输,在傍轴近似的情况下,其近场光场可由菲涅耳衍射积分公式^[16]表示为

$$E(x_2, y_2, z) = \left(-\frac{i}{\lambda z}\right) \exp(ikz) \iint_s \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{w^2}\right) t(x_1, y_1) \times \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1, \quad (3)$$

式中 w 为高斯光束的束腰宽度。将(2)式代入(3)式积分整理得

$$E(x_2, y_2, z) = \left(-\frac{i}{\lambda z}\right) \exp(ikz) \times \left\{\frac{\pi}{S} \exp\left[(x_2^2 + y_2^2)\left(\beta + \frac{\beta^2}{S}\right)\right] - AW(x_2, y_2)\right\}, \quad (4)$$

式中

$$W(x_2, y_2) = \frac{\pi}{S + 1/r_0^2} \exp\left[\beta(x_2^2 + y_2^2) - \frac{(x_0^2 + y_0^2)}{r_0^2}\right] \exp\left\{\frac{1}{S + 1/r_0^2} \left[\left(\beta x_2 - \frac{x_0}{r_0}\right)^2 + \left(\beta y_2 - \frac{y_0}{r_0}\right)^2\right]\right\}, \quad (5)$$

$$\beta = \frac{i\pi}{\lambda z}, \quad (6)$$

$$S = \frac{1}{w^2} - \frac{i\pi}{\lambda z}. \quad (7)$$

高斯光束经单一振幅调制点之后光场中对应的光强分布为

$$E(f_x, f_y) = |E(x_2, y_2, z)|^2. \quad (8)$$

对于通过 m 个随机分布的振幅调制型“缺陷”光束的近场表达式则为

$$E'(x_2, y_2, z) = \left(-\frac{i}{\lambda z}\right) \exp(ikz) \times \left\{\frac{\pi}{S} \exp\left[(x_2^2 + y_2^2)\left(\beta + \frac{\beta^2}{S}\right)\right] - \sum_{n=0}^m A_n W_n(x_2, y_2)\right\}, \quad (9)$$

$$W_n(x_2, y_2) = \frac{\pi}{S + 1/r_n^2} \exp\left[\beta(x_2^2 + y_2^2) - \frac{(x_n^2 + y_n^2)}{r_n^2}\right] \exp\left\{\frac{1}{S + 1/r_n^2} \left[\left(\beta x_2 - \frac{x_n}{r_n}\right)^2 + \left(\beta y_2 - \frac{y_n}{r_n}\right)^2\right]\right\}, \quad (10)$$

第 n 个“缺陷”的调制幅度为 A_n , “缺陷”尺寸为 r_n , 中心坐标为 (x_n, y_n) 。

高斯光束经多个振幅调制点之后,在 z 平面的光场所对应的光强分布为

$$I'(x_2, y_2, z) = |E'(x_2, y_2, z)|^2. \quad (11)$$

经过“缺陷”之后的光场作空间坐标的二维傅里叶变换,可求得空间频率为 (f_x, f_y) 的基元函数在线性组合中所占权重,即调制光的角谱为^[16]

$$E(f_x, f_y) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{w^2}\right) t(x_1, y_1) \times \exp[-2\pi i(xf_x + yf_y)] dx_1 dy_1, \quad (12)$$

积分整理可得

$$E(f_x, f_y) = w^2 \pi \exp[-w^2 \pi^2 (f_x^2 + f_y^2)] - \frac{w^2 r^2 \pi}{r^2 + w^2} \exp\left\{-\frac{1}{r_0^2 + w^2} [(x_0^2 + 2\pi w^2 f_x x_0 i + \pi^2 w^2 r_0^2 f_x^2) + (y_0^2 + 2\pi w^2 f_y y_0 i + \pi^2 w^2 r_0^2 f_y^2)]\right\}, \quad (13)$$

式中

$$f_x = \frac{\cos \theta}{\lambda}, \quad f_y = \frac{\cos \phi}{\lambda}. \quad (14)$$

式中 $\cos \theta, \cos \phi$ 为波矢的方向余弦。

本文主要采用(8)、(11)、(13)式来研究单一或多个振幅调制型“缺陷”对高斯光束光强和角谱影响规律。下面将给出数值模拟,着重讨论经振幅调制型“缺陷”后的高斯光束在传输中的光强分布和角谱特性。

3 数值模拟及分析

首先考虑一个振幅调制点对高斯光束的传输影

响。设入射高斯光束的波长为 1.053×10^{-6} m, 光腰尺寸取 3×10^{-3} m, 一般“缺陷”尺寸大小为微米量级到毫米量级。如图 1(b)所示为入射高斯光束的中心受到单一局域振幅调制之后在不同传输距离下的光强分布曲线,入射光受到调制之后,在一定范围内光强分布不再是高斯分布,若“缺陷”尺寸较小,传输一定距离之后光强分布逐渐又恢复为高斯分布,且光束受调制点的光强受到的影响最大,但在光强分布恢复为高斯分布之前该点的光强早已恢复为正常值。以下可以对入射光受调制点的光强变化情况作详细的研究,图 2 所示为入射高斯光束中心受不

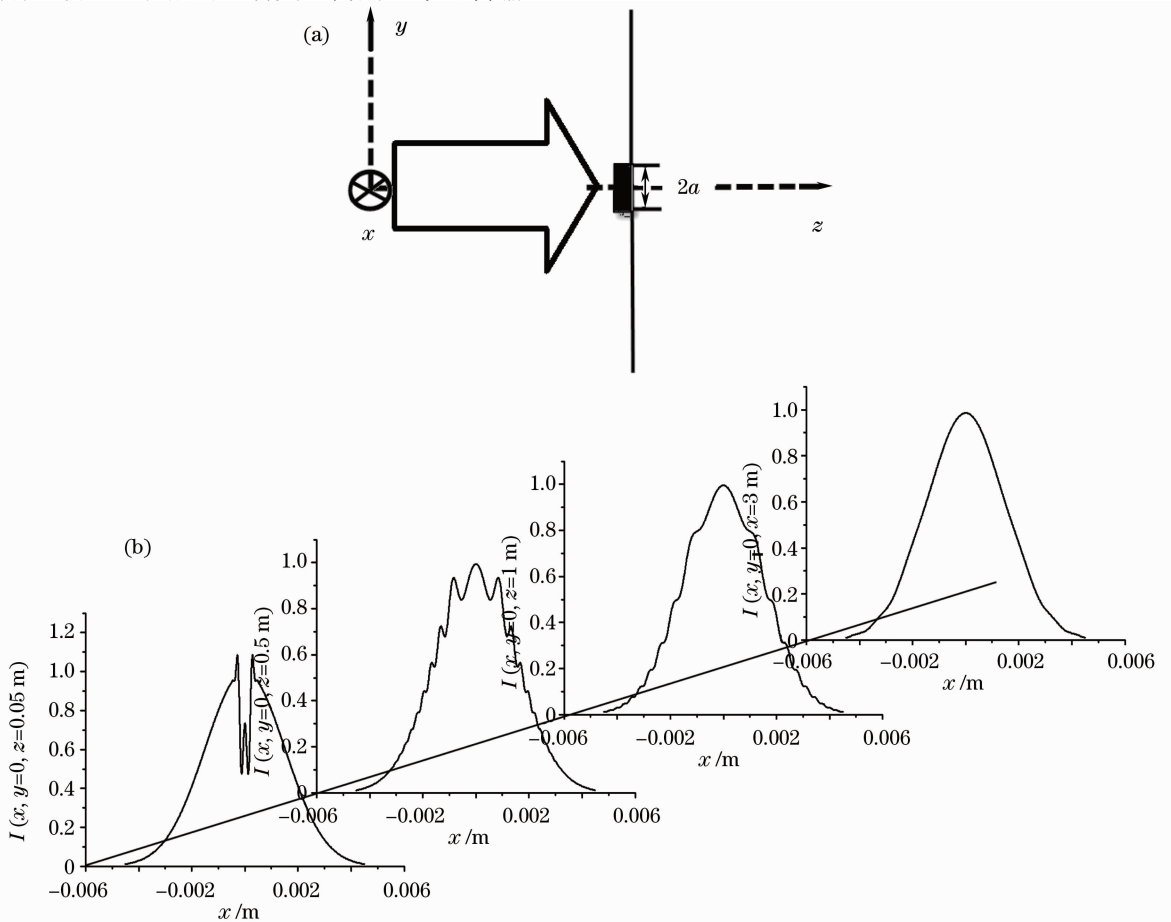


图 1 (a)模拟物理模型示意图;(b)单一振幅调制“缺陷”对高斯光束调制之后在不同传输距离下的光强分布曲线
Fig. 1 (a) Schematic of simulated physical model; (b) curve of the light-intensity distribution of the Gaussian beam modulated by amplitude modulated defects in different propagation distances

同调制幅度和大小的单一振幅调制型“缺陷”调制后,轴上光强随传输距离的变化关系。高斯光束经过不同大小、不同调制幅度的“缺陷”后轴上光强分布在传输过程中的演变规律基本是一样的,受调制光在“缺陷”附近的光强明显减小,继续传输一定的距离之后光强逐渐增大并恢复为原来的大小。图 2(a)为调制幅度都为 0.5,而尺度不同的“缺陷”对入射高斯光束调制后轴上光强随传输距离变化关系。随着“缺陷”尺寸由 $50\ \mu\text{m}$ 增大到 $300\ \mu\text{m}$,入射

光束受到调制的范围越大,沿着光传播的方向,受调制点的光强恢复为原来大小所需的传输距离越远。而图 2(b)为尺寸为 $100\ \mu\text{m}$,调制幅度不同的“缺陷”对入射高斯光束调制后轴上光强随传输距离变化关系,随着调制幅度从 0.2 增大到 1,“缺陷”的挡光率增大,光强受到的调制越强,但调制幅度的大小基本不影响受调制点的光强恢复为原来大小所需的传输距离。

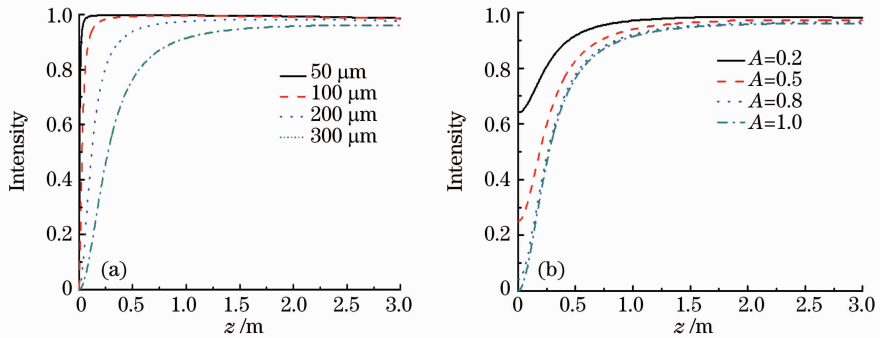


图 2 不同大小和调制幅度的单一局域振幅“缺陷”对高斯光束调制之后,轴上光强随传输距离的变化关系。

(a)“缺陷”调制尺寸不同;(b)“缺陷”调制幅度不同。 $x_0=0, y_0=0$

Fig. 2 Evolution of the light intensity on the propagation axial of the Gaussian beam being modulated by different sizes of the defects and modulation depths of amplitude modulated defects. (a) Sizes of the defects are different; (b) modulation amplitudes of the defects are different. $x_0=0, y_0=0$

图 3 和图 4 分别表示单一振幅调制点和多个振幅调制点对高斯光束横向光强分布的影响。入射高斯光经过振幅调制型“缺陷”之后光强横向空间分布不均匀,有一定的波动起伏,沿着光轴传输一定距离之后光强弥散均匀。比较图 3(a)和(b)可知,“缺陷”调制幅度越大,光强起伏越明显,衍射现象越明显,且高斯光束在大小相同而调制幅度不同的单个振幅调制之后沿着光轴传输方向光强弥散均匀所需的距离相对较近。而比较图 3(b)和(c)可知调制尺寸越大,光强起伏越明显,光强分布弥散均匀所需的传输距离较远,即调制尺寸越大使得光束受调制越强,沿着传输方向光强受到影响的范围越大。图 4 为高斯光束经多个振幅调制之后,在传输过程中横向光强分布演化规律。高斯光束经多个振幅调制之后产生的衍射条纹互相干涉,整个光强分布更加紊乱,这就是所谓的集群效应调制影响。由上可知,“缺陷”调制幅度的大小主要影响光束的横向光强分布高低起伏,而振幅调制尺寸不仅影响光强高低起伏,而且还决定横向光强分布受到影响范围的大小。

图 5 为高斯光束在调制幅度都为 1 而大小不同的单一振幅调制型“缺陷”调制之后的角谱变化情

况,由图中可知单一振幅调制型“缺陷”对高斯光束的角谱影响很小,对于尺寸较小“缺陷”对高斯光束的角谱基本不产生影响,而当“缺陷”的尺寸较大时,光束的角谱大小发生变化。光束的角谱在空间频率为 $-200\sim 200\ \text{mm}^{-1}$ 区域减小,而在这个区域之外的角谱变大。图 6 为大小都为 $700\ \mu\text{m}$ 而调制幅度不同的单一振幅调制型“缺陷”对高斯光束角谱的影响情况。随着调制深度由 0.2~1 增大,即“缺陷”对光强的透射率逐渐减小,空间频率大概在 $-200\sim 200\ \text{mm}^{-1}$ 区域对应的角谱减小,而在这个区域之外的空间频率所对应的角谱明显变大。图 7 所示为多个振幅调制型“缺陷”对高斯光束角谱的影响情况。当高斯光束受到多个振幅调制时,由于集群调制效应,角谱大小受到的影响很明显,特别是中高频区对应的角谱波动起伏变大。而高斯光束的角谱发生变化是因为经过振幅调制型“缺陷”后发生了一定的衍射,使得在空间频率高的光波成分增多,相应的空间频率低的光波成分就会减少。由图 5、6 和 7 可知,随着振幅调制型“缺陷”尺寸的增大,“缺陷”对光强透射率降低,调制的数目增多,则光束低频区的基元函数在线性组合中所占权重减小,相应的空

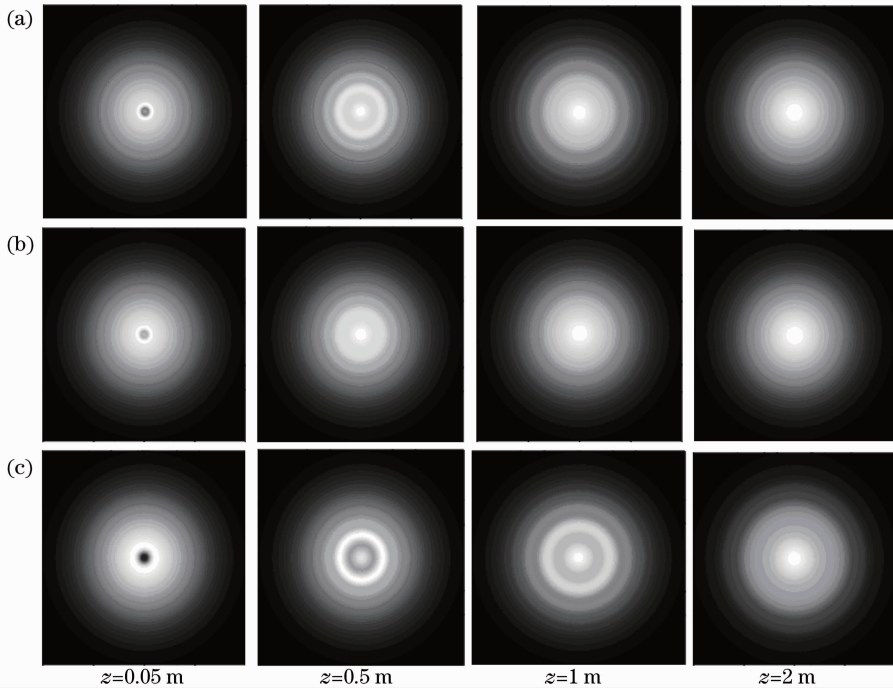


图 3 不同调制幅度和不同大小的局域振幅“缺陷”对高斯光束调制之后的光强分布图。(a) $a=100 \mu\text{m}, A=1$;
(b) $a=100 \mu\text{m}, A=0.5$; (c) $a=200 \mu\text{m}, A=1; x_0=0, y_0=0$

Fig. 3 Evolution of the light intensity distribution in the process of transmission after the light beam being modulated by the defects with different modulation amplitudes and sizes. (a) $a=100 \mu\text{m}, A=1$; (b) $a=100 \mu\text{m}, A=0.5$; (c) $a=200 \mu\text{m}, A=1; x_0=0, y_0=0$

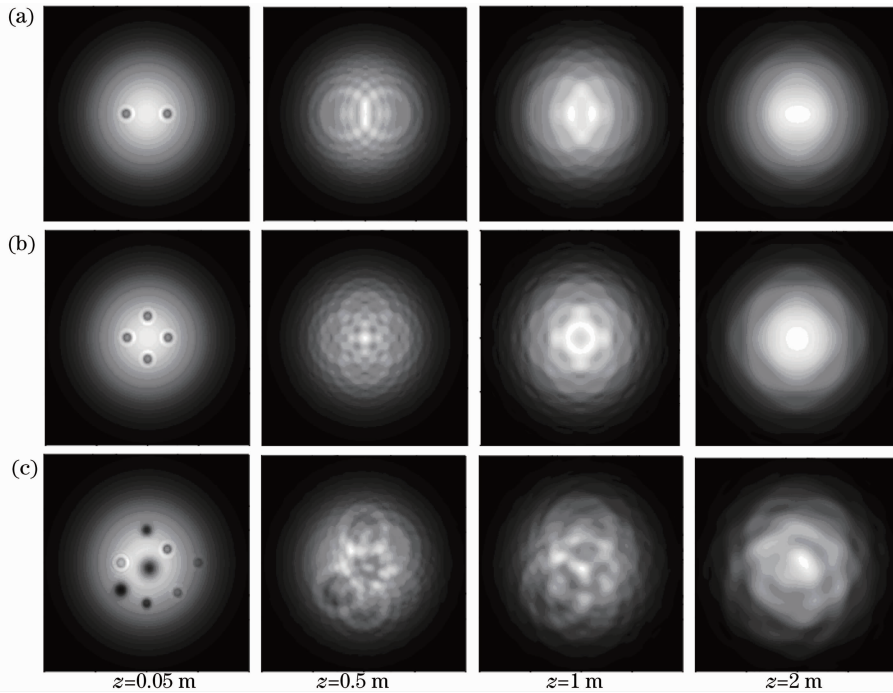


图 4 多个“缺陷”调制之后的光强分布图。(a)两个“缺陷”: $a=100 \mu\text{m}, A=1$;(b)四个“缺陷”: $a=100 \mu\text{m}, A=1$;
(c)多个不同“缺陷”随机分布

Fig. 4 Evolution of the light intensity distribution in the process of transmission after the beam is modulated by more than one defects. (a) Two defects: $a=100 \mu\text{m}, A=1$; (b) four defects: $a=100 \mu\text{m}, A=1$; (c) some randomly distributed defects

间频率在中高频区的基元函数在线性组合中所占权重增大,且对中高频区的角谱波动起伏很大,影响更为明显。即振幅调制尺寸越大,调制幅度越大,数量越多,高斯光束经振幅调制之后发生的衍射就越严

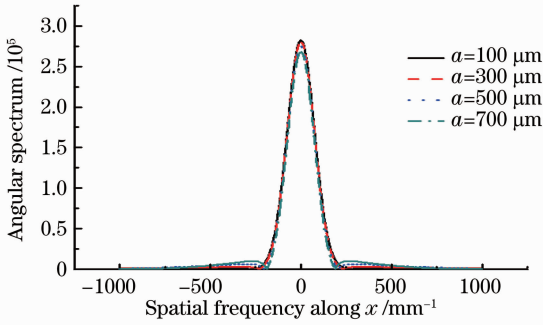


图 5 高斯光束经过不同大小的“缺陷”调制后的角谱分布图。 $x_0=0, y_0=0$

Fig. 5 Angular-spectrum distribution of the Gaussian beam modulated by the defects with different sizes. The location of the defect is $x_0=0, y_0=0$

重,使得光束在空间频率高的成分增强,从而造成光束质量变差。

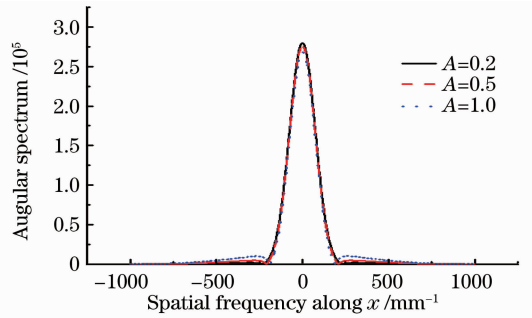


图 6 高斯光束经过不同调制深度的“缺陷”后的角谱分布图。其他参数: $\lambda=1.053 \times 10^{-6}$ m; $w=0.003$ m; $x_0=0, y_0=0$

Fig. 6 Angular-spectrum distribution of the Gaussian beam modulated by the defects with different modulation amplitudes. The other parameters are chosen as $\lambda=1.053 \times 10^{-6}$ m; $w=0.003$ m; $x_0=0, y_0=0$

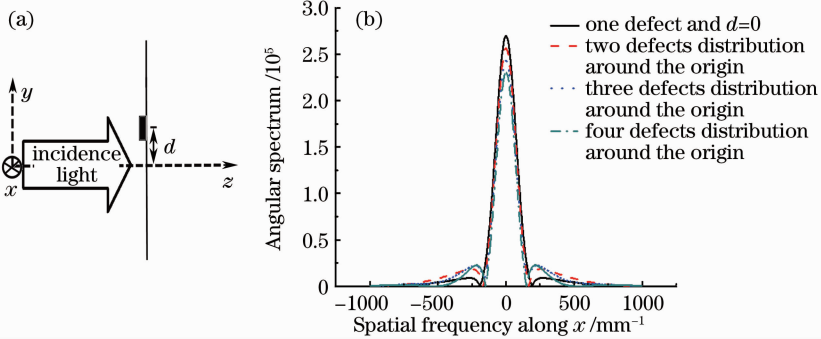


图 7 (a)模拟物理模型示意图;(b)“缺陷”大小都为 $700 \mu\text{m}$ 调制幅度都为 1,入射光束受到不同数目的“缺陷”调制之后的角谱分布图

Fig. 7 (a) Schematic of simulated of physical model; (b) angular spectrum distribution after the beam being modulated by more than one defect. The defects are all the same with the size of $700 \mu\text{m}$ and the modulation amplitude is 1

4 结 论

基于菲涅耳衍射积分公式和角谱的定义,推导了高斯光束经有限个振幅调制点后的光束近场分布及角谱解析式。详细研究了振幅调制点的尺寸大小、调制幅度及调制点数目对高斯光束近场的光强和角谱的影响。研究表明,振幅调制不仅影响高斯光束的光强分布,还影响光束在不同空间频率的角谱分量,尤其对角谱中的中高频段空间频率影响特别明显。高斯光束经过振幅调制“缺陷”之后,受到调制的区域光强明显减小。“缺陷”尺寸越大,入射光强受到影响的范围越大,调制处得光强恢复为原来大小所需的传输距离越远。而“缺陷”调制幅度即挡光率越大,光束受到的调制越明显。就光束

横向空间分布而言,振幅调制型“缺陷”尺寸越大,调制幅度越大,光束横向空间分布越不均匀。光束空间调制的不均匀性越大,则需要更长的传输距离才能让光束在传输过程中自然弥散均匀。当光束经过多个振幅调制“缺陷”共同作用时,由于振幅调制分布不对称、调制尺寸大小不一和调制幅度不同等都造成光束空间分布更加不均匀,这解释为集群调制效应所致。另外,“缺陷”调制尺寸越大,数目越多,调制幅度越大,会导致低频区的角谱越小,中高频区的角谱越大,尤其对中高频段的空间频率分布影响越明显。所得到的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。

参 考 文 献

- 1 Yong Jiang, Xiaodong Yuan, Xia Xiang *et al.*. Scratch types and damage thresholds of fused silica [C]. *Photonics and Optoelectronic (SOPO)*, 2010, **19-20**: 1~4
- 2 J. Neauport, L. Lemaignere, H. Bercegol *et al.*. Polishing-induced contamination of fused silica optics and laser induced damage density at 351 nm[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(25): 10163~10171
- 3 S. Mainguy, I. Toven-Pecault, B. Le Garrec. Propagation of LIL/LMJ beams under the interaction with contamination particles[C]. *SPIE*, 2005. 59910G-1-9
- 4 J. T. Hunt, K. R. Mane, P. A. Renard. Hot image from obscurations[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(30): 5973~5982
- 5 M. D. Feit, A. M. Rubenchik. Influence of subsurface cracks on laser induced surface damage [C]. *SPIE*, 2004. **5273**: 254~271
- 6 C. Clay Widmayer, Melinda R. Nickels, David Milam. Nonlinear holographic imaging of phase error[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(21): 4801~4805
- 7 Zhao Junpu, Hu Dongxia, Dai Wanjun *et al.*. Wavefront characters of high power solid-state lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(S1): 152~156
赵军普, 胡东霞, 代万俊 等. 高功率固体激光系统光束波前畸变特性分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(S1): 152~156
- 8 Tang Shunqiang, Ouyang Xiaoping, Zhu Baoqiang *et al.*. Research on high-power laser induced damage of large aperture fused silica[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 756~760
唐顺强, 欧阳小平, 朱宝强 等. 高功率激光对大口径熔石英玻璃的破坏的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 756~760
- 9 Zhou Lidan, Su Jingqin, Liu Lanqin *et al.*. Effects on beam quality of booster stage induced by "defects" on optics[J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2009, **21**(3): 326~330
周丽丹, 粟敬钦, 刘兰琴 等. 光学元件“缺陷”对助推放大级光束质量的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(3): 326~330
- 10 Wang Youwen, Hu Yonghua, Wen Shuangchun *et al.*. Relationship between nonlinear hot image and dimensions of obscurations in high-power laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1836~1841
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
- 11 Dai Minkui, Xu Deyan. Measuring scratch width by sampling diffracted-light intensity: theory [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **17**(3): 351~356
戴名奎, 徐德衍. 衍射光强取样分析法测定划痕宽度: 理论部分 [J]. *光子学报*, 1997, **17**(3): 351~356
- 12 Zhou Lidan, Su Jingqin, Li Ping *et al.*. Quantitative relation between "defects" distribution on optics and near-field quality in high power solid-state laser system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(9): 6279~6284
周丽丹, 粟敬钦, 李平等. 高功率固体激光装置光学元件“缺陷”分布与功率谱密度方法及等效求法[J]. *物理学报*, 2009, **58**(9): 6279~6284
- 13 Zhou Lidan, Su Jingqin, Li Ping *et al.*. Quantitative relation between "defects" distribution on optics and near-field quality in high power solid-state laser system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(2): 024202
周丽丹, 粟敬钦, 李平等. 高功率固体激光装置光学元件“缺陷”分布与光束近场质量的定量关系研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(2): 024202
- 14 Tian Dongbin, Yuan Xiaodong, Zu Xiaotao *et al.*. Numerical simulation of light intensity distribution in vicinity of defect on fused silica subsurface [J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2008, **20**(2): 319~322
田东斌, 袁晓东, 祖小涛 等. 熔石英亚表面缺陷附近光强分布的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(2): 319~322
- 15 Lü Baida. Propagation and Control of High-Power Lasers [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1999. 197~219
吕百达. 强激光的传播与控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 197~219
- 16 Lü Baida. Laser Optics [M]. Beijing: High Education Press, 2003. 9~13
吕百达. 激光光学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 9~13

栏目编辑: 宋梅梅