

# 高斯光束经局域相位调制后的光强分布和角谱特性

苏倩倩<sup>1</sup> 张国文<sup>2</sup> 陶 华<sup>1</sup> 蒲继雄<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021  
<sup>2</sup>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地存在的“缺陷”会对传输光束产生局域振幅和相位调制。基于菲涅耳衍射积分,建立了高斯光束经局域相位调制后的传输模型,得到了高斯光束经有限多个小尺寸局域相位调制后的光强分布和角谱解析式,详细研究了相位调制尺寸与调制深度对光束光强分布和角谱的影响。结果表明,不同调制尺寸、调制深度对高斯光束在传输过程中的影响相似。且调制深度越大,产生的最大光强越大。相位“缺陷”尺寸越大产生的最大光强的位置离“缺陷”越远,随着调制深度、尺寸的增大和调制位置距光轴距离越近,低频区的角谱越小,中高频区的角谱越大。

**关键词** 激光光学;相位调制;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/CJL201138.1002005

## Properties of the Intensity Distribution and the Angular Spectrum of a Gaussian Beam with Local Phase Modulation

Su Qianqian<sup>1</sup> Zhang Guowen<sup>2</sup> Tao Hua<sup>1</sup> Pu Jixiong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Department of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China  
<sup>2</sup>National 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 exists in the optical component will modulate the phase and the amplitude of the beam propagate in the system. Based on the Fresnel diffraction integral, the propagation mode of the Gaussian beam modulated by the local phase is built and the analytical expressions for the intensity distribution and angular spectrum of a Gaussian beam modulated by finite phase modulated defects has been derived. The impact of the modulation depth and the size of the defects on the intensity distribution and angular spectrum of the beam modulated by phase modulated defects is studied. It shows that in the process of transmission the evolution of the light intensity is the same for different modulation depths and sizes of the defects. The deeper of the modulation depth of defects that modulated the beam, the higher of the intensity produced along the propagation process. The larger of the defect, the nearer of the proposition where produced the highest intensity from the defects location. The angular spectrum in the low frequency area become smaller and the angular spectrum in the high frequency area become greater with the increase of modulation depth and the size of the defect as well as the defect getting closer to the middle of the beam.

**Key words** laser optics; phase modulation; Fresnel diffraction; intensity distribution; angular spectrum

**OCIS codes** 140.3295; 260.1960; 300.6360; 140.3330; 160.5060

## 1 引言

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”会对光束产生调制,从而降低了光束质量,尤其是破坏光束近场均匀性,从而增加了光学元件损伤的风险<sup>[1~15]</sup>。虽然“缺陷”种类繁多,性质各异,但从对光场影响的角度看,可分为局域振幅

**收稿日期**: 2011-04-28; **收到修改稿日期**: 2011-06-15

**基金项目**: 国家自然科学基金(60977068)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

调制和局域相位调制。研究表明,局域相位调制对光束质量和光学元件的破坏比局域振幅调制的大<sup>[3,6,9]</sup>。一般来说,局域振幅调制点数目较多,有研究者采用统计方法进行分析得到了局域振幅调制对传输光束的影响<sup>[1,10]</sup>。在实际光路中,特别是强激光系统,光束能量的逐级放大,微小的局域调制就会在下游区产生很强的光强,从而导致下游光学元件被破坏的可能<sup>[13]</sup>。由于局域相位调制对下游光束质量影响较大,且国内外鲜有相位调制深度及集群调制如何影响光束的光强和角谱的报道。基于此,本文研究了高斯光束经有限多个局域相位调制点后光束的光强分布和角谱变化情况。着重分析局域相位调制深度,调制尺寸大小、集群调制等因素对光束近场强区分布的演化规律及对角谱的影响。

## 2 局域相位调制的模型建立及理论分析

根据参考文献[16],光学元件的划痕、凹坑等“缺陷”对光束主要引起光束相位的局域调制。在一

般情况下,其局域相位调制的透射率函数可表达为

$$t_0(x, y, z) = \exp[i\phi(x, y, z)], \quad (1)$$

式中  $\phi(x, y, z)$  表示局域相位畸变的空分布<sup>[14]</sup>。在这些引起光束局域波前畸变的微小“缺陷”中,微米量级局域相位调制在光学元件中占主体。假设在光束入射面  $z = 0$  上有一相位“缺陷”,其对相位的局域调制可采用矩形基元表示为

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

式中  $\Delta$  为局域相位调制深度,  $\Delta = \frac{(n-1)2\pi h}{\lambda}$ ,  $h$  为“缺陷”深度,且  $0 \leq \Delta \leq 2\pi$ ,  $a, b$  为调制半宽度,  $(x_0, y_0)$  为相位调制横向中心坐标。(2) 式不仅可以表示矩形的局域相位调制,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。根据巴比涅原理及菲涅耳衍射积分公式<sup>[17,18]</sup>,高斯光束经过局域相位调制后的近场分布可表示为

$$\begin{aligned} E(x_2, y_2, z) &= \left(-\frac{i}{\lambda z}\right) \exp(ikz) \iint_S \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{w^2}\right) t(x_1, y_1) \times \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1 = \\ &= \left(-\frac{i}{\lambda z}\right) \exp(ikz) \left\{ \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{w^2}\right) \times \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1 + \right. \\ &\quad \left. [\exp(i\Delta) - 1] \int_{-a+x_0-a+y_0}^{a+x_0} \int_{-a+y_0}^{a+y_0} \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{w^2}\right) \times \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1 \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

式中  $w$  为高斯光束的束腰宽度,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  表示波数,  $\lambda$  为光束的波长。利用积分公式

$$\int_0^a \exp(-x^2) dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \text{erf}(a), \quad (4)$$

(3)式积分为

$$E(x_2, y_2, z) = \left(-\frac{i}{\lambda z}\right) \exp(ikz) \times \left\{ \frac{\pi}{S} \exp\left[(x_2^2 + y_2^2) \left(\beta + \frac{\beta^2}{S}\right)\right] + T(x_2, y_2) \right\}, \quad (5)$$

式中

$$\begin{aligned} T(x_2, y_2) &= \frac{\pi}{4S} \times \exp\left[(x_2^2 + y_2^2) \left(\beta + \frac{\beta^2}{S}\right)\right] \times [\exp(i\Delta) - 1] \times \left\{ \left[ -\text{erf}\left[\frac{S(-a+x_0) + \beta x_2}{\sqrt{S}}\right] + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \text{erf}\left[\frac{S(a+x_0) + \beta x_2}{\sqrt{S}}\right] \right] \times \left[ -\text{erf}\left[\frac{S(-a+y_0) + \beta y_2}{\sqrt{S}}\right] + \text{erf}\left[\frac{S(a+y_0) + \beta y_2}{\sqrt{S}}\right] \right] \right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

$$\beta = \frac{i\pi}{\lambda z}, \quad (7)$$

$$S = \frac{1}{w^2} - \frac{i\pi}{\lambda z}. \quad (8)$$

高斯光束经单一相位调制点之后光场中对应的光强分布为

$$I(x_2, y_2, z) = |E(x_2, y_2, z)|^2, \quad (9)$$

(5)式为高斯光束经单一相位调制点的情况。而在光路中,多个局域相位调制点影响光束的传输更接近真实。因此,光场分布可表达为

$$E'(x_2, y_2, z) = \left(-\frac{i}{\lambda z}\right) \exp(ikz) \times \left\{ \frac{\pi}{S} \exp\left[(x_2^2 + y_2^2) \left(\beta + \frac{\beta^2}{S}\right)\right] + \sum_{i=0}^n T_i(x_2, y_2) \right\}, \quad (10)$$

式中,透射率函数表示为多个相位调制点的叠加关系,每个相位调制点的透射率函数表达为

$$T_m(x_2, y_2) = \frac{\pi}{4S} \times \exp\left[(x_2^2 + y_2^2) \left(\beta + \frac{\beta^2}{S}\right)\right] \times \exp[i\Delta_m] - 1 \times \left\{ \left\{ -\operatorname{erf}\left[\frac{S(-a_m + x_m) + \beta x_2}{\sqrt{S}}\right] + \operatorname{erf}\left[\frac{S(a_m + x_m) + \beta x_2}{\sqrt{S}}\right] \right\} \times \left\{ -\operatorname{erf}\left[\frac{S(-a_m + y_m) + \beta y_2}{\sqrt{S}}\right] + \operatorname{erf}\left[\frac{S(a_m + y_m) + \beta y_2}{\sqrt{S}}\right] \right\} \right\}, \quad (11)$$

这里,第  $m$  个相位调制点的调制深度表示为  $\Delta_m$ ,半宽度为  $a_m$ ,“缺陷”中心坐标为  $(x_m, y_m)$ 。

高斯光束经多个局域相位调制点之后,在  $z$  平面的光场所对应的光强分布为

$$I'(x_2, y_2, z) = |E'(x_2, y_2, z)|^2, \quad (12)$$

下面讨论高斯光束经过相位调制点后光场的角谱变化情况。对高斯光束经过相位调制点后的光场表达式做空间坐标的二维傅里叶变换,即可得到高斯光束经局域相位调制后的角谱<sup>[18]</sup>。

$$E(f_x, f_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{w^2}\right) t(x_1, y_1) \times \exp[-i2\pi(xf_x + yf_y)] dx_1 dy_1, \quad (13)$$

利用(4)式对(13)式进行积分并整理可得

$$E(f_x, f_y) = w^2 \pi \exp[-w^2 \pi^2 (f_x^2 + f_y^2)] + \frac{1}{4} w^2 \pi [\exp(i\Delta) - 1] \exp[-w^2 \pi^2 (f_x^2 + f_y^2)] \\ - \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{(a - x_0)}{w} - i\pi w f_x\right] + \operatorname{erf}\left[\frac{(a + x_0)}{w} + i\pi w f_x\right] \right\} \times \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{(a - y_0)}{w} - i\pi w f_y\right] + \operatorname{erf}\left[\frac{(a + y_0)}{w} + i\pi w f_y\right] \right\}, \quad (14)$$

式中

$$f_x = \frac{\cos \theta}{\lambda}, \quad f_y = \frac{\cos \phi}{\lambda}, \quad (15)$$

$\cos \theta, \cos \phi$  为波矢的方向余弦。

主要采用(9)、(12)、(14)式来研究高斯光束经过单一或多个局域相位调制型“缺陷”之后的光强和角谱的变化规律。

### 3 数值模拟及分析

首先考虑一个局域相位调制点对高斯光束的传输影响。设入射高斯光束的波长为  $1.053 \mu\text{m}$ ,光腰尺寸取  $3 \text{ mm}$ ,一般缺陷尺寸大小为微米量级到毫米量级。图 1 为入射高斯光束中心在不同调制深度和大小局域相位调制下,轴上光强随传输距离变化关系。入射光在不同大小,不同调制深度的局域相位调制后光强分布在传输过程中的演变规律基本是一样的,在离调制点下游产生一个最大光强,继续传输一定的距离之后光强逐渐下降,若有一元件处于产生最大光强的位置,则会造成一定的元件损伤,而产生一个最大光强点是因为局域相位调制点对入射的高斯光束局部引入一个相位,使得受

调制光在传输过程中相互干涉叠加,必会在一定的距离产生一个最大的光强值。因局域相位调制点很小,随着传输距离的增长,局域相位调制型“缺陷”引入的相位对光束的影响越来越小,干涉减弱,光强逐渐降低。其中,图 1(b)为入射高斯光束尺寸为  $40 \mu\text{m}$ ,在不同调制深度的单个相位调制下,轴上光强随传输距离变化的关系。随着调制深度从  $\pi/8$  变化到  $\pi$ ,产生的最大光强也逐渐增大,即局域相位调制深度越大对元件的破坏力就越强。图 1(c)所示为入射高斯光束调制深度相同为  $\pi/2$ ,在大小不同的单个局域相位调制下,轴上光强随传输距离变化的关系,随着局域相位调制的大小由  $40 \mu\text{m}$  增大到  $250 \mu\text{m}$ ,产生的最大光强值不变,但产生最大光强的位置离“缺陷”的距离增远,即沿着光传播的方向,光强受到影响的范围越大。

图 2 是不同位置的局域相位调制对高斯光束轴上光强的影响。在图 2(a)中, $d$  表示局域相位调制中心离光轴的距离。从图 2(b)可知,当“缺陷”调制深度为  $\pi$  而尺寸大小为  $40 \mu\text{m}$  时,随着距离  $d$  的增加,高斯光束轴上光强在传输过程中产生的极值越小。

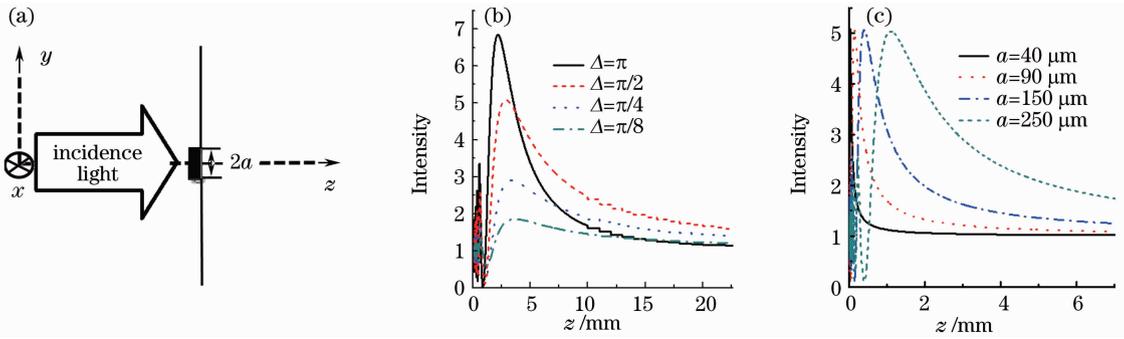


图 1 入射高斯光束在不同调制深度和不同大小的单一局域相位调制下,轴上光强随传输距离变化关系。

(a)模拟物理模型示意图;(b)“缺陷”调制深度不同;(c)“缺陷”尺寸不同。 $x_0=0, y_0=0$

Fig. 1 Evolution of the light intensity on the propagation axial of the Gaussian beam modulated by different modulation depths and sizes of phase modulated defects. (a) Simulation of physics model schemes; (b) the modulation depths of the defects are different; (c) the sizes of the defects are different.  $x_0=0, y_0=0$

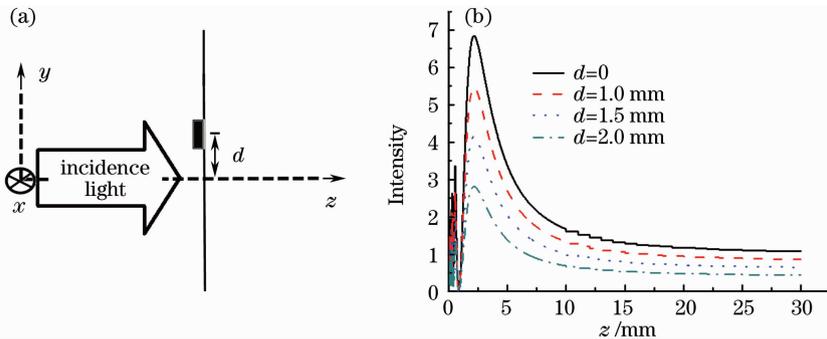


图 2 “缺陷”位置不同时光轴上光强的演变规律。(a)模拟物理模型示意图;(b)“缺陷”位置不同

Fig. 2 Evolution of the light intensity on the propagation axial of the Gaussian beam modulated by the phase modulated defects with different locations. (a) Simulation of physics model schemes; (b) the locations of the defects are different

图 3 和 4 分别表示单一局域相位调制和多个局域相位调制点对高斯光束横向光强分布的影响。图中由于局域相位调制点的尺寸取为微米量级,矩形轮廓差别细微,当光束经过调制之后传输到一段距离,因为衍射原因,传输距离越大,横向光强分布逐渐从方形调制演变为圆形。比较图 3(a)和(b)可知,调制深度越大,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深度不同的单个局域相位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 为高斯光束经多个局域相位调制之后,在传输过程中横向光强分布的演化规律。高斯光束经多个局域相位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,调制深度的大小主要影响光束的横向光强分布高低起伏,而局域相位调制尺寸不仅影

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 为高斯光束在调制深度都为  $\Delta=\pi$  而大小不同的单一相位调制之后的角谱变化情况,由图可知当尺寸较小的局域相位“缺陷”对光束调制时,光束的角谱大小基本不受影响。而当局域调制的尺寸较大时,光束的角谱大小发生变化。当调制尺寸为 500 和 700  $\mu\text{m}$  时,光束的角谱在空间频率为  $-190/\text{mm}$ 到  $190/\text{mm}$  区域减小,而在这个区域之外的角谱变大。图 6 所示为高斯光束在大小都为 700  $\mu\text{m}$  而调制深度不同的单一相位调制之后角谱的变化情况。随着调制深度由  $\pi/6$  增大到  $\pi$ ,空间频率大概在  $-190/\text{mm}\sim 190/\text{mm}$  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 为高斯光束在多个局域相位调制之后的角谱变化情况。当高斯光束受到多个局域相位调制时,由于集群调制效应,局域相位对光束的角谱影响更为明显,特别是中高频区对应的角谱波动起伏变大。高斯光束的角谱发生变化是因为经过局域

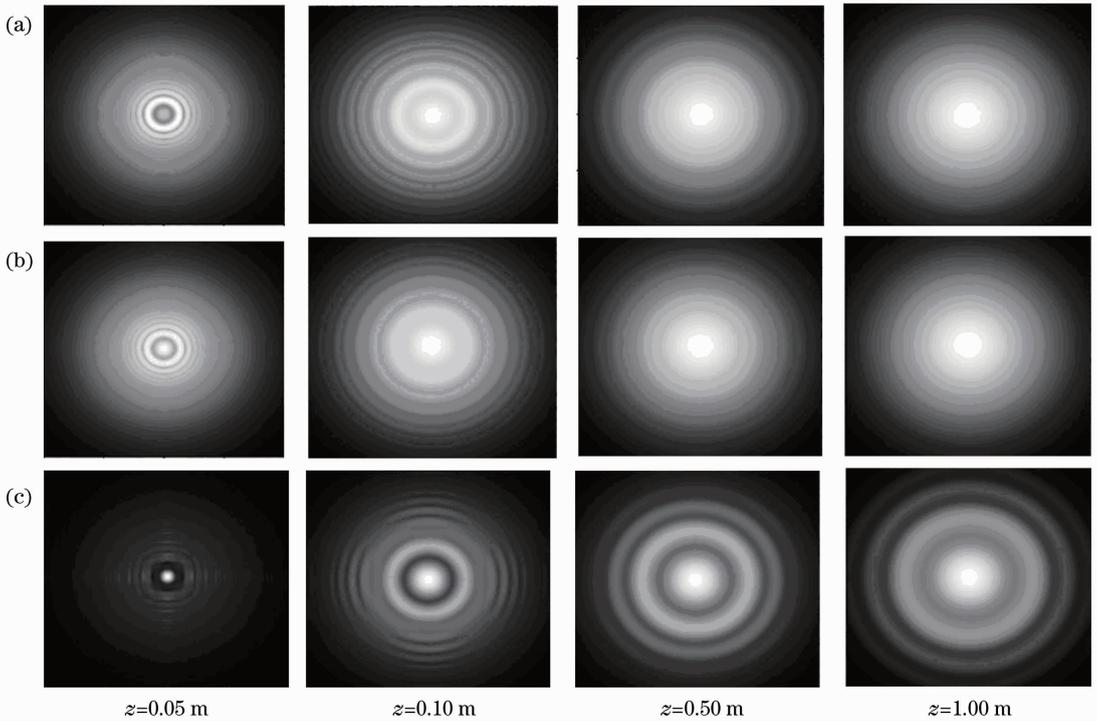


图 3 受不同调制深度和不同大小的局域相位调制之后的光强分布图。(a)  $a=50\ \mu\text{m}, \Delta=\pi$ ;  
 (b)  $a=50\ \mu\text{m}, \Delta=\pi/2$ ; (c)  $a=200\ \mu\text{m}, \Delta=\pi/2$ 。  $x_0=0, y_0=0$

Fig. 3 Evolution of the light intensity distribution in the process of transmission after being modulated by the defects with different modulation depths and sizes. (a)  $a=50\ \mu\text{m}, \Delta=\pi$ ; (b)  $a=50\ \mu\text{m}, \Delta=\pi/2$ ; (c)  $a=200\ \mu\text{m}, \Delta=\pi/2$ .  $x_0=0, y_0=0$

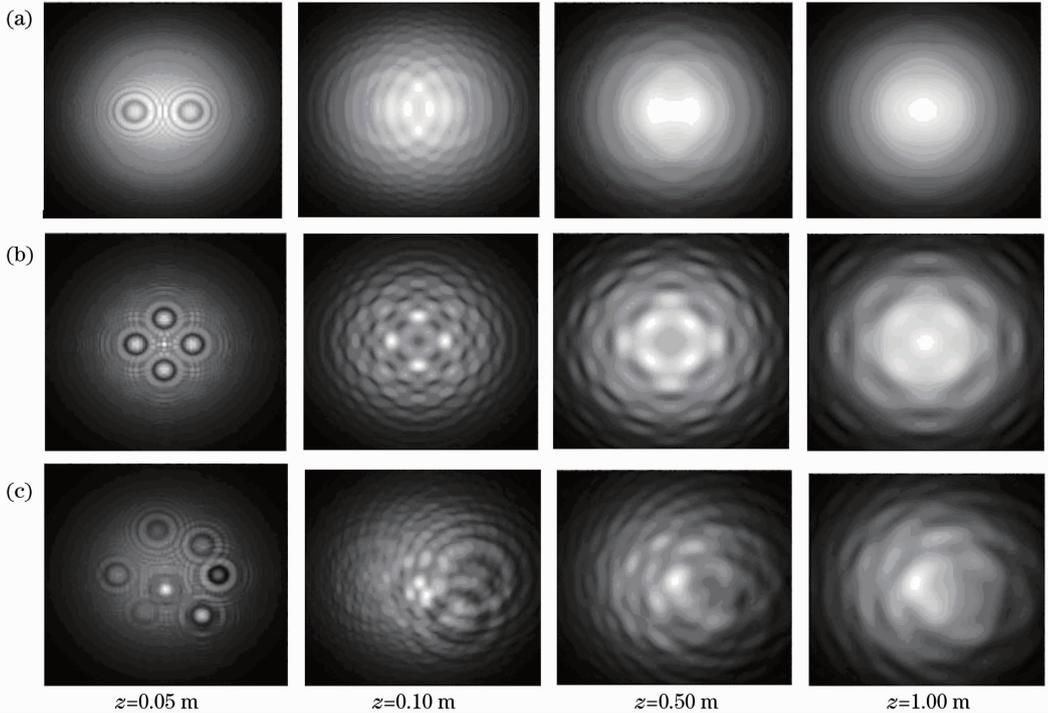


图 4 多个“缺陷”调制之后的光强分布图。(a)两个“缺陷”: $a=50\ \mu\text{m}, \Delta=\pi$ ; (b)四个“缺陷”: $a=100\ \mu\text{m}, \Delta=\pi/2$ ;  
 (c)多个不同“缺陷”随机分布

Fig. 4 Evolution of the light intensity distribution in the process of transmission after the beam being modulated by more than one defects. (a) Two defects:  $a=50\ \mu\text{m}, \Delta=\pi$ ; (b) four defects:  $a=100\ \mu\text{m}, \Delta=\pi/2$ ; (c) some randomly distributed defects

相位调制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 5~7 可知,随着局域相位调制尺寸的增大,调制深度越深,调制的数目越多,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。即局域相位调制尺寸越大,调制深度越深,数量越多,高斯光束经局域相位调制之后发生的衍射就越严重,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。

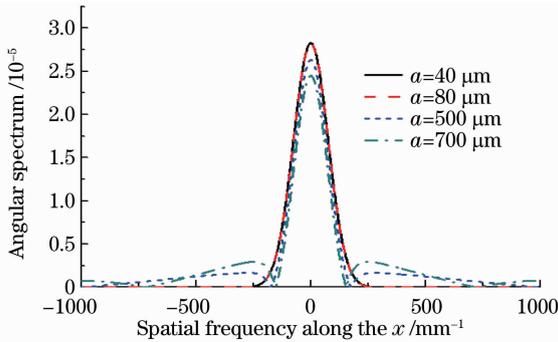


图 5 高斯光束经过不同大小的“缺陷”后的角谱分布图。  
 $x_0 = 0, y_0 = 0$

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

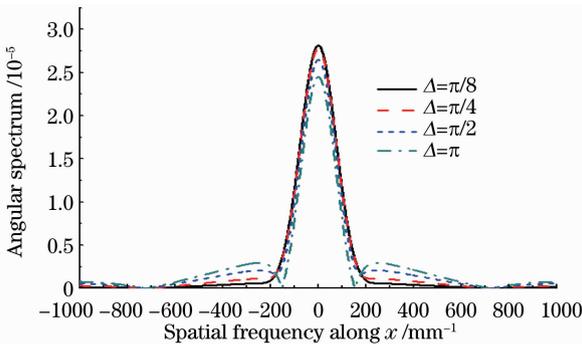


图 6 高斯光束经过不同调制深度的“缺陷”后的角谱分布图。其他参数: $\lambda = 1.053 \mu\text{m}; \omega = 3 \text{ mm}; x_0 = 0, y_0 = 0$

Fig. 6 Angular spectrum distribution of the Gaussian beam modulated by the defects with different modulation depths. The other parameters are chosen as  $\lambda = 1.053 \mu\text{m}; \omega = 3 \text{ mm}; x_0 = 0, y_0 = 0$

## 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局域相位调制点后的光束近场分布及角谱解析式。详细研究了局域相位调制点的

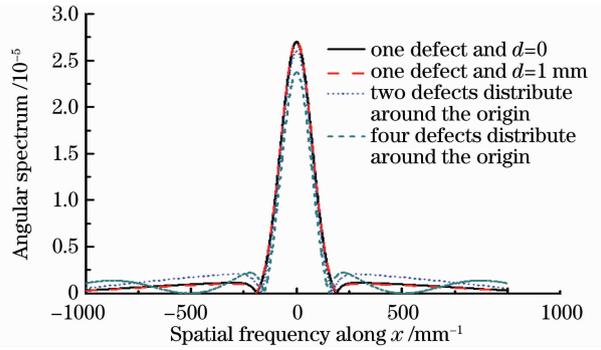


图 7 “缺陷”大小都为  $500 \mu\text{m}$  调制深度都为  $\pi$ ,入射光束受到不同数目的“缺陷”调制之后的角谱分布图

Fig. 7 Angular spectrum distribution after the beam is modulated by more than one defects. The defects are all the same with the size of  $500 \mu\text{m}$  and the modulation depth of  $\pi$

尺寸大小、调制深度及横向中心位置对高斯光束近场的光强和角谱的影响。结果表明,局域相位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。高斯光束经过局域相位调制之后,会在后续光路中产生一轴上光强极值。局域相位调制尺寸越大,轴上光强极值离调制光源越远。局域相位调制深度越大,所产生的轴上光强极值越大。就光束横向空间分布而言,局域相位调制型“缺陷”尺寸越大,调制深度越深,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。当光束经过多个局域相位调制点共同作用时,由于局域相位调制分布不对称、调制尺寸大小不一、调制深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。另外,离光轴中心越近的调制尺寸越大,数目越多,调制深度越深,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。

## 参 考 文 献

- 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 Beams*, 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
- J. Neaupourt, L. Lameignere, 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
- J. T. Hunt, K. R. Mane, P. A. Renard. Hot image from obscurations[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(30): 5973~5982
- 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
- 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, R. Melinda, M. David. Nonlinear holographic imaging of phase error[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(21): 4801~4805
- 7 S. Mainguy, I. Tovenca-Pecault, B. Le. Propagation of LIL/LMJ beams under the interaction with contamination particles [C]. *SPIE*, 2005, **5991**: 59910G
- 8 Tao Hua, Zhang Guowen, Pu Jixiong. Stochastic electromagnetic beams focused by a modulated lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): 100411
- 陶华, 张国文, 蒲继雄. 随机电磁光束经振幅调制透镜的聚焦特性[J]. 光学学报, 2011, **31**(s1): 100411
- 9 Zhao Jianlin, Peng Tao, Ye Zhijuan. Hot-image effects in high-power solid-state laser systems[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1315~1321
- 赵建林, 彭涛, 叶知隽. 高功率固体激光系统中“热像”效应[J]. 中国激光, 2007, **34**(10): 1315~1321
- 10 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, 栗敬钦, 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
- 11 Wang Xiao, Jing Feng, Zhu Qihua *et al.*. Phase perturbation induced "hot image" and its variation [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(6): 540~544
- 王道, 景峰, 朱启华等. 位相扰动下“热像”规律研究[J]. 激光技术, 2003, **27**(6): 540~544
- 12 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 Beams*, 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
- 13 He Shaobo, Chen Yuanbin, Yu Haiwu *et al.*. Energy transmission in high power laser amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(s): 276~279
- 贺少勃, 陈远斌, 于海武等. 高功率激光放大器中的能量传输[J]. 中国激光, 2006, **33**(s): 276~279
- 14 Liu Hongjie, Jing Feng, Hu Dongxia *et al.*. Numerical analysis of 1  $\omega$  far-field in high power laser system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(s): 272~275
- 刘红捷, 景峰, 胡东霞等. 高功率激光装置基频光远场的模拟分析[J]. 中国激光, 2006, **33**(s): 272~275
- 15 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, 栗敬钦, 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
- 16 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
- 17 Lü Baida. Propagation and Control of High-Power Lasers [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 197~219
- 吕百达. 强激光的传输与控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 197~219
- 18 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