

文章编号: 0258-7025(2009)06-1371-07

# 衍射光学元件表面反射对高功率激光系统的影响

李珂<sup>1</sup> 刘强<sup>1</sup> 李永平<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学技术大学物理系, 安徽 合肥 230026; <sup>2</sup> 中国科学院量子信息重点实验室, 安徽 合肥 230026)

**摘要** 对高功率激光系统中使用的衍射光学元件(DOE)在束匀滑时产生的表面反射光场进行了模拟计算。计算表明,随着传输距离的增大,反射光由于干涉叠加会产生一定数量的光强极值点,有可能会对前端元件造成损伤。因此,在高功率激光系统应用中,有必要对元件进行一定角度的倾斜放置,从而使反射光偏离前端元件。通过模拟计算分析了衍射元件放置时,倾斜角度对各项束匀滑指标的影响,发现匀滑性急剧变差,并在实验上观察到了相应的定性结果。设计了相位补偿方法,以保证倾斜放置下衍射光学元件的束匀滑能力,并给出了相位补偿的数值模拟结果。

**关键词** 光学器件; 衍射光学元件; 束匀滑; 表面反射; 相位补偿

中图分类号 TL632 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093606.1371

## Influence of Reflection of Diffractive Optical Elements on High-Power Laser System

Li Ke<sup>1</sup> Liu Qiang<sup>1</sup> Li Yongping<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, University of Science & Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)  
(<sup>2</sup> Key Laboratory of Quantum Information, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230026, China)

**Abstract** In high power laser system the light intensity distribution of surface reflection produced by diffractive optical element (DOE) used in beam smoothing was calculated. Calculation showed that with the increasing of transmission distance, the reflected light due to interference would produce a certain number of extreme points, which could be harm to the front element. As a result, in the high-power laser system, it is necessary to place DOE with a tilt angle, so that the reflection light can deviate from the front element. The impact on beam smoothing with changing angle was calculated, and the sharp deterioration of smoothing was found and the corresponding qualitative results were observed in experiment. Phase compensation method was presented, to maintain the ability of the beam smoothing with DOE tilted, and the numerical simulation of phase compensation was given.

**Key words** optical devices; diffractive optical element; uniformity of beam shaping; reflection; phase compensation

## 1 引言

激光惯性约束核聚变(ICF)的靶场均匀照明需要非常高的靶场光强分布均匀性及能量利用率。由于衍射光学元件(DOE)具有良好的束匀滑效果以及对目标场光强分布形状易控制等特点,近年来一直是研究的热点<sup>[1]</sup>。复杂的 ICF 系统包含大量的光学元件,激光在传输的过程中会发生许多效应,如由于反射和折射所产生的鬼像<sup>[2,3]</sup>、非线性自聚

焦<sup>[4,5]</sup>等,有可能对元件造成损害<sup>[6]</sup>。

对于光学介质表面,如果没有进行增透处理,总会存在一定比例的能量反射。ICF 激光系统具有很高的输出功率密度,当受到 DOE 相位调制后的表面反射光会产生干涉,回到前端系统如倍频晶体等元件中,所反射的能量可能会产生不可预知的后果,甚至损坏前端元件。在工程上,光学元件表面增透处理<sup>[7]</sup>和小角度倾斜放置<sup>[8]</sup>是经常采用的两种方法,但对于 DOE 的刻蚀表面增透,目前还没有合适的工艺。

收稿日期: 2008-08-04; 收到修改稿日期: 2008-11-17

基金项目: 国家 863 计划(863-804)资助课题。

作者简介: 李珂(1983-),女,博士研究生,主要从事衍射光学元件的计算设计研究。E-mail: like06@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 李永平(1945-),男,教授,博士生导师,主要从事衍射光学方面的研究。E-mail: liyp@ustc.edu.cn

本文以  $\phi 320$  mm 的大口径多台阶离散相位结构的 DOE 为例,重点研究了该元件表面反射所产生的能量分布,以及 DOE 倾斜放置的角度对于束匀滑效果的影响,并进行了实验验证。提出了对 DOE 进行相位补偿的方法,以抵消由于倾斜放置引起的附加相位对于束匀滑效果的破坏。

## 2 DOE 表面反射的近、远场特性

多台阶离散相位结构 DOE 的工艺是通过离子束掩模套刻技术来实现的,其过程如图 1(a) 所示。

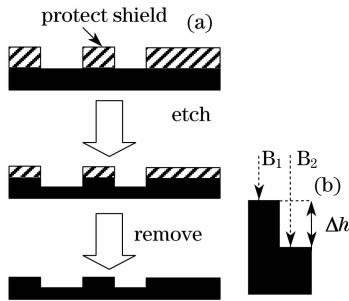


图 1 相位台阶蚀蚀过程

Fig. 1 Etching process of phase step

经过掩模图形转移、离子束溅射刻蚀、去保护层三道工艺后,在材料基片表面就形成了一套深度台阶分布。在同一块基片上进行多次工艺重复就可以制作出具有多台阶分布的束匀滑器件。当在光学介质表面形成高度为  $\Delta h$  的台阶分布时,由于介质与空气的折射率不同,在这两个不同的区域  $B_1, B_2$  内就产生

了相对相位延迟  $\Delta\varphi$ 。从图 1(b) 可以清楚地看到,二者之间存在如下的变换关系

$$\Delta\varphi = 2\pi\Delta h(n - n_0)/\lambda, \quad (1)$$

其中  $n$  为 DOE 材料的折射率,  $n_0$  为空气的折射率。

入射光束在 DOE 表面被反射,由于表面的台阶分布,使 DOE 子单元反射的光产生相应的相位差,由此发生干涉。由于没有透镜的汇聚作用,而是光束直接反射回上一级光学元件,所以,反射光束在元件表面的振幅分布不仅仅由 DOE 引起的光程差决定,还与传输距离有关,是非涅耳衍射的结果。

设入射光场的振幅分布为 8 阶超高斯,如图 2(a), (b) 所示。而相位为常数分布,在计算中将反射光的能量设为入射光能量的 4%,即振幅为入射光振幅的 0.2 倍。采用角谱传输的方法来进行计算模拟:由衍射的角谱理论,给定的场分布  $U(x, y, z)$  与相应的角谱  $A_z(f_x, f_y)$  之间的关系是傅里叶变换和逆变换的关系

$$A_z(f_x, f_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y, z) \times e^{-i2\pi\langle xf_x + yf_y \rangle} dx dy, \quad (2)$$

$$U(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_z(f_x, f_y) \times e^{i2\pi\langle xf_x + yf_y \rangle} df_x df_y. \quad (3)$$

角谱在两平面间的传输为

$$A_z(f_x, f_y, z) = A_0(f_x, f_y, 0) \times e\left[i\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)z \sqrt{1 - \langle \lambda f_x \rangle^2 - \langle \lambda f_y \rangle^2}\right], \quad (4)$$

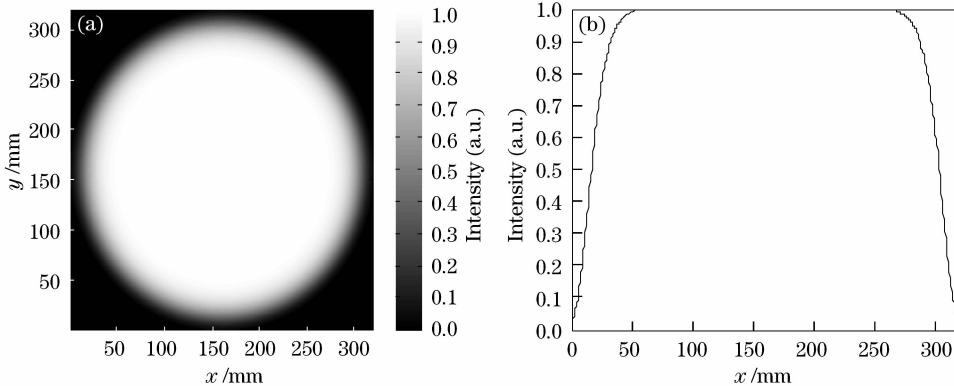


图 2 入射光强分布图

Fig. 2 Intensity distribution of incident beam

(4)式即为角谱传递关系式。由于角谱传播规律的基础仍是标量波动方程,是对亥姆霍兹方程求解得到的,所以(4)式与菲涅耳-基尔霍夫衍射公式具有同等的价值<sup>[9]</sup>。

根据以上理论计算了 DOE 与它前端元件相距

20 cm 到 20 m 时,反射光干涉后最大光强值的变化。由图 3 所示可以看出光强最大值随着距离的增大而增大,20 cm 处的最大值约为 0.044,在 20 m 处时,最大光强增大到约 0.446。

图 4 所示为光强的一维分布图,分别表示反射光

强在 20 cm, 50 cm, 1 m 和 10 m 处的分布情况。可以看出能量逐渐集中在一些点上。为了避免对元件造成损害, 一般将 DOE 倾斜, 使反射光线偏离元件。

### 3 DOE 倾斜放置的数值模拟

DOE 倾斜时, 入射光受到的相位调制会受到影响, 焦斑的匀滑性会受到一定的破坏。

当 DOE 倾斜放置时, 其光轴与入射光波矢之间存在一个夹角  $\theta$ , 如图 5 所示。在参考平面  $S_1, S_2$  上计算 DOE 的相位调制, 从  $S_1$  传输到  $S_2$ , 不同台阶间光束的光程差  $\Delta L$  可以写为

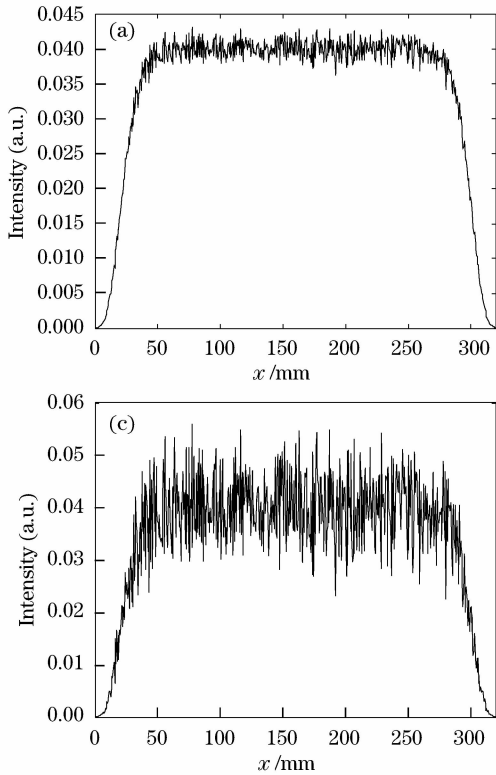


图 4 反射光强在距离 DOE 为 20 cm (a), 50 cm (b), 1 m (c) 和 10 m (d) 处的分布

Fig. 4 Intensity distribution of light reflection from the DOE. (a) 20 cm; (b) 50 cm; (c) 1 m; (d) 10 m

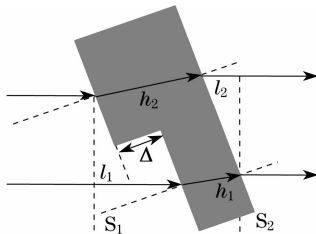


图 5 附加相位示意图

Fig. 5 Schematic of the addition phase

$$\Delta L = \left( n_0 l_2 + \frac{n \Delta h}{\cos \theta_1} \right) - \left( n_0 l_1 + \frac{n_0 \Delta h}{\cos \theta} + \frac{nh_1}{\cos \theta_1} \right), \quad (5)$$

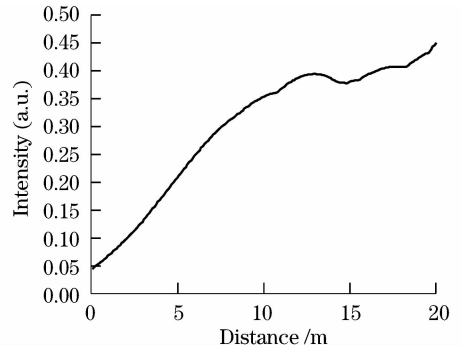
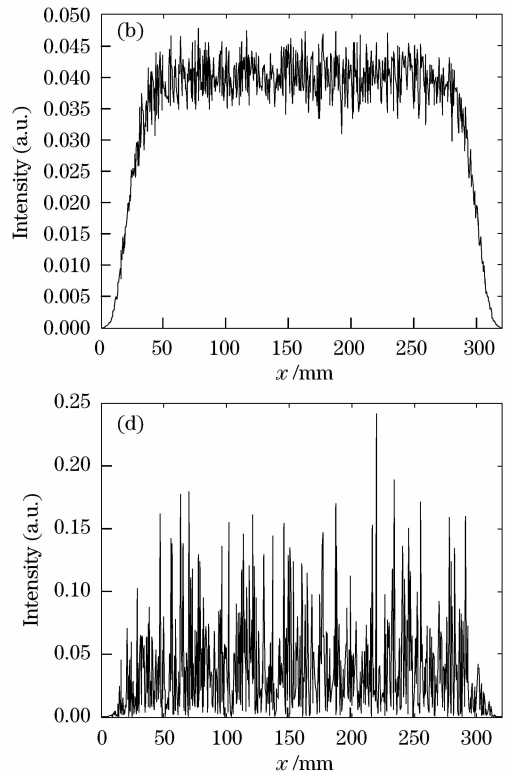


图 3 反射光强的最大值随距离变化

Fig. 3 Maximum reflection light intensity changing with distance



其中  $\theta_1$  是光束从空气斜入射介质  $n_1$  后的折射角。由几何相似性可知  $l_1 = l_2$ ; 由折射定理可得到  $\sin \theta_1 = n_0 \sin \theta / n_1$ ;  $\Delta h = h_1 - h_2$ 。代入(4)式可得到倾斜放置后的相位台阶深度为

$$\Delta \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta h \left[ \frac{n}{\sqrt{1 - \frac{n_0^2 \sin^2 \theta}{n^2}}} - \frac{n_0}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta}} \right]. \quad (6)$$

从(6)式可以看出, 当  $\theta = 0$  时, (6)式就简化成了(1)式, 但当  $\theta \neq 0$  时, 相当于给 DOE 带来了一个整体的附加相位误差。这种整体的附加相位对束匀滑的影响相当大。下面以一套给定的 DOE 相位分布为例, 计算不同倾斜角  $\theta$  下的束匀滑效果。模拟

时的主要参数为:入射光为  $\phi 320$  mm 的 8 阶超高斯圆形光束,主透镜焦距  $f=1575$  mm,激光波长  $\lambda=526.5$  nm。

在评价束匀滑效果时,常用的 3 个评价参数分别为衍射效率(DE)、顶部光强均方差(RMS)与顶部光强极值比(PV),它们的定义为

$$D_E = \frac{\sum_{\text{top}} I_{\text{real}}}{\sum_{\text{total}} I_{\text{real}}},$$

$$R_{\text{MS}} = \sqrt{\frac{\sum_{\text{top}} |I_{\text{real}} - \bar{I}|^2 / \bar{I}^2}{(N-1)}},$$

$$P_V = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) / (I_{\text{max}} + I_{\text{min}}), \quad (7)$$

式中  $I_{\text{real}}$  表示实际光束采样点的光强,  $\bar{I}$  表示顶部平均光强,  $I_{\text{max}}$  与  $I_{\text{min}}$  分别表示顶部光强的极大与极小值。从(7)式可以看到,  $D_E$  表示的是实际输出光束中焦斑能量占全能量的百分比;  $R_{\text{MS}}$  表示实际输

出光束顶部的调制度;  $P_V$  则表示实际输出光束顶部光强峰谷值的悬殊程度。评价束匀滑的均匀性,主要看  $R_{\text{MS}}$  与  $P_V$  这两个参数,这两个值越大,表明均匀性越差。

图 6(a) 为  $\theta=0$  时的传输结果。在 DOE 的设计时,并未考虑过斜入射,此结果也就是 DOE 的设计结果。通过计算得到其主要均匀性指标为:  $D_E=78.12\%$ ,  $R_{\text{MS}}=11.61\%$ ,  $P_V=42.49\%$ 。

图 6(b) 为  $\theta=0.07$  rad 的传输结果。从一维分布图上可以清楚地看到,在焦斑中心的位置上出现了一对强度值明显偏离顶部平均值的极大-极小点,这会使  $P_V$  指标迅速上升,严重破坏了束匀滑的均匀性。

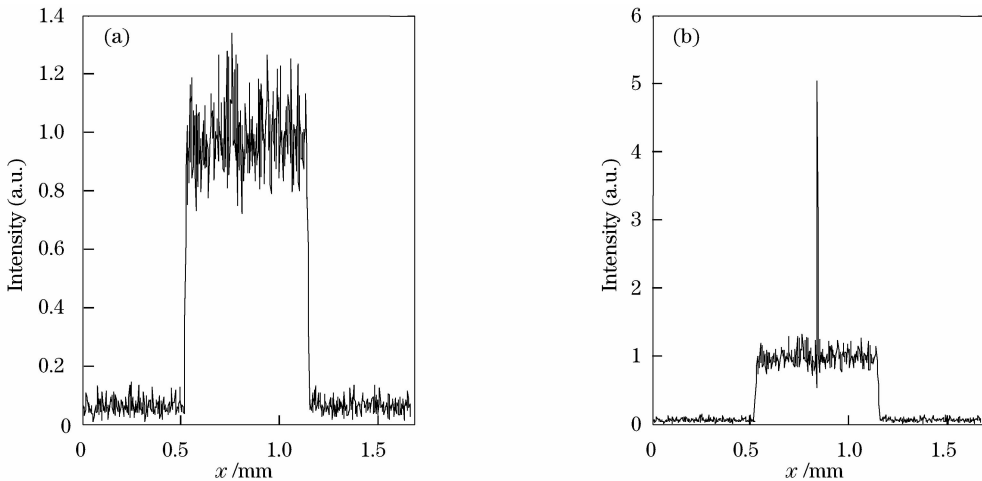


图 6 DOE 正放置(a)和倾斜 0.07 rad 放置(b)时焦斑形态的一维分布

Fig. 6 Intensity distribution of focal spot with DOE vertically placed (a), and tilted at 0.07 rad

表 1 给出了几个不同倾斜角下的束匀滑均匀性指标。通过对比发现,  $P_V$  随倾斜角加大迅速地呈线性态势增长,而  $R_{\text{MS}}$  的增长速度则较慢。  $D_E$  在此倾斜角变化范围内并无太明显变化。

表 1 各评价函数  $D_E$ ,  $R_{\text{MS}}$  和  $P_V$  随倾角的变化值

Table 1 Value of  $D_E$ ,  $R_{\text{MS}}$  and  $P_V$  changing with tilted angle

$\theta$ / rad	$D_E$ / %	$R_{\text{MS}}$ / %	$P_V$ / %
0	78.22	11.613	42.491
0.03	78.21	11.643	78.860
0.05	78.20	11.716	68.312
0.07	78.179	11.966	97.857
0.10	78.114	16.133	98.37

为了了解各评价函数随倾角增大的变化趋势,从 0 开始,每次增加 0.01 rad,到 0.6 rad 为止。计算并记录了各均匀性指标,如图 7 所示。在这个变

化范围之内,  $P_V$  值变坏得最为剧烈。这是由于随着倾角的增大,焦斑顶部中间会出现一对极值点,且极大值点的强度会随着倾斜角的增加迅速地增大。

#### 4 DOE 倾斜放置的实验结果

为了观察倾斜放置 DOE 对于束匀滑影响的实际效果,用  $\phi 70$  mm 的 DOE 样品做了一次离线测试。主要设计参数:入射光为扩束成  $\phi 68$  mm 的圆形平面波光束,主透镜焦距  $f=450$  mm,氦氖连续激光器的波长为  $\lambda=1053$  nm。在 CCD 采集时,比较直观的量是焦斑顶部光强的极大值,即中心亮点的强度,在做理论模拟比较时主要以这一个量来进行。图 7 给出了此相位分布下的 DOE 在束匀滑后焦斑顶部光强极大值随倾斜角变化的曲线。

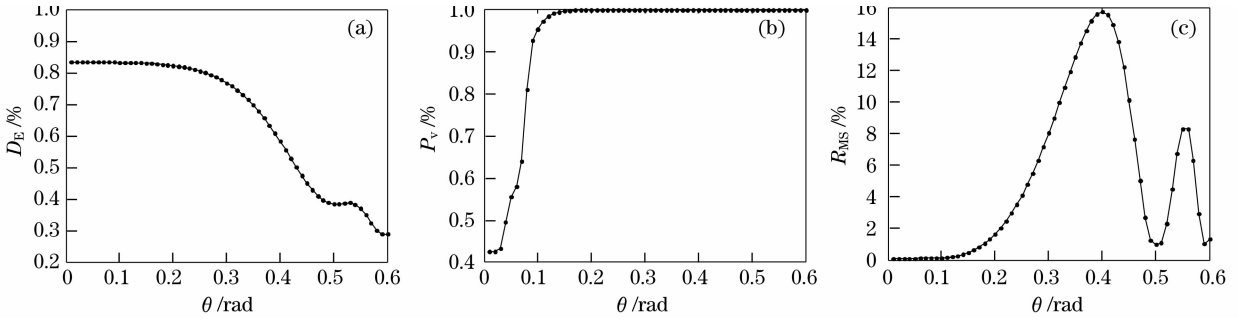


图 7 DOE 的倾角从 0~0.6 rad 之间变化时  $D_E$  (a),  $P_V$  (b) 和  $R_{MS}$  (c) 值的变化趋势

Fig.7 Value of  $D_E$  (a),  $P_V$  (b) and  $R_{MS}$  (c) changing with tilted angle of DOE from 0~0.6 rad

图 8(a)为 CCD 采集的 DOE 放置倾斜角  $\theta=0$  时的焦面光强分布情况。此时焦斑中心有一个较明显的亮点,这个亮点主要是由于刻蚀工艺误差造成的,在文献[10]中有比较详细的讨论。保持其他光路参数不变,使 DOE 放置倾斜角  $\theta$  增大,从 CCD 采集的实验结果来看,中心亮点的强度随着倾斜角的变大而不断增大。图 8 (b) 与 (c) 分别是  $\theta \approx$

0.087 rad 与  $\theta \approx 0.17$  rad 的结果。实验结果与理论计算在变化趋势上比较符合。但由于实验所用 CCD 的灰度台阶仅有  $2^8$  级,精度较低,很难进行准确的定量计算。图 9(a)~(c)是将图 8 各图亮斑中心局部进行进一步的光强衰减得到的结果,从这三个结果可以更清楚地看到中心亮点强度增强的变化趋势。

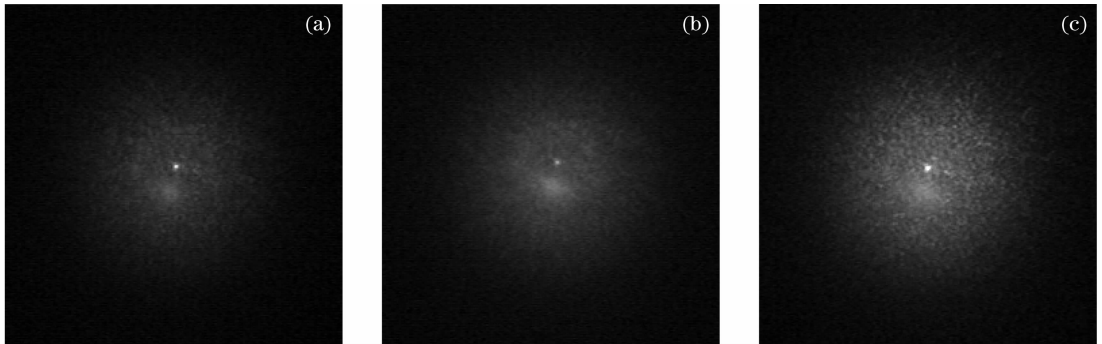


图 8 DOE 正放置(a),倾斜 5°(b)和倾斜 10°(c)时 CCD 采集到的焦斑形态照片

Fig. 8 Photos of focal spot by CCD with DOE vertically placed (a), tilted at 5° (b) and 10°(c)

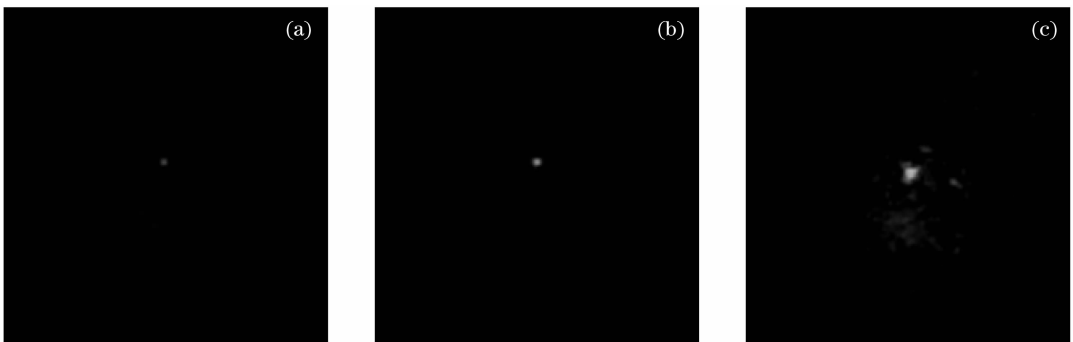


图 9 DOE 正放置(a),倾斜 5°(b)和倾斜 10°(c)时将光强衰减后 CCD 采集到的焦斑形态照片

Fig. 9 Photos of focal spot by CCD after attenuation with DOE vertically placed (a), tilted at 5° (b) and 10°(c)

### 5 相位补偿原理和模拟结果

从上述的分析可以看到,DOE 本身是一个纯相位调制元件,对于相位的变化非常敏感,在工程应用

时应当尽量避免斜入射照明方式。如果由于工程需要,必须采用斜入射,在设计 DOE 时就有必要考虑加入相位补偿的环节。

设未倾斜放置时产生的相位分布为  $\Delta\varphi$ , 它和台阶分布  $\Delta h$  的关系如(1)式所示。要想倾斜放置  $\theta$  角度后得到  $\Delta\varphi$  的相位分布, 则需要相应的台阶分布  $\Delta h'$ , 由(6)式可知

$$\Delta h' = \frac{\Delta\varphi}{\frac{2\pi}{\lambda} \left[ \frac{n}{\sqrt{1 - n_0^2 \sin^2 \theta / n^2}} - \frac{n_0}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta}} \right]}, \quad (8)$$

$$\Delta h' = \frac{(n - n_0)\Delta h}{\left[ \frac{n}{\sqrt{1 - n_0^2 \sin^2 \theta / n^2}} - \frac{n_0}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta}} \right]}, \quad (9)$$

设

$$\eta(\theta) = \frac{(n - n_0)}{\left( \frac{n}{\sqrt{1 - n_0^2 \sin^2 \theta / n^2}} - \frac{n_0}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta}} \right)}, \quad (10)$$

此时的台阶分布  $\Delta h'$  与  $\Delta h$  的差值为

$$\Delta h' - \Delta h = \Delta h [\eta(\theta) - 1]. \quad (11)$$

由这样的台阶差值产生的相位改变称之为相位补偿, 这样就与原始设计保持一致, 才能保证束匀滑

效果不会变差。

在倾斜了  $\theta$  角之后, 由于进行了相位补偿, 所以出射光仍然可以得到未倾斜时的均匀分布, 图 10 所示即为计算机模拟的 DOE 未倾斜时的光斑形态和倾斜时加上相位补偿后的光斑形态, 可以看出二者是一致的。

进行相位补偿是为了将倾斜后的 DOE 对光束的相位束匀滑效果恢复到垂直放置下的设计水平。通过物理原理和公式推导, 可以得出任意角度倾斜后 DOE 相位分布的改变, 从而有针对性地进行相位补偿。在实际应用中, 为了避免反射光对系统产生不良影响, 而对 DOE 进行倾斜放置时, 在设计中引入相位补偿, 保证束匀滑质量的方法是比较简单有效的。此方法不需要对制作工艺进行任何改变, 只要给出使用中的放置倾斜角度, 就可以很好地保证元件束匀滑的效果。

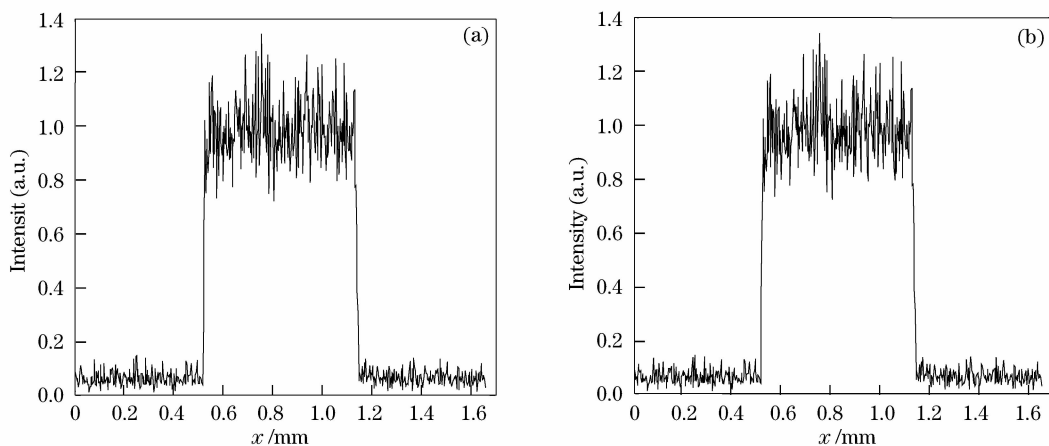


图 10 DOE 正放置(a)和倾斜放置经过相位补偿后(b)的焦斑形态一维分布图

Fig. 10 Intensity distribution of focal spot with DOE vertically placed and tilted after phase compensation

## 6 结 论

分析了 DOE 在高功率束匀滑系统中表面反射光分布随传播距离的变化。从模拟计算中发现, 当传输距离增大时, 反射光由于受到 DOE 的相位调制, 会产生一些强度比较大的光强极值点。这些点所集中的能量不可忽视, 有可能对系统的前端元件造成一定的影响和损害。在实际的工程应用中, 为了避免反射光的影响, 对元件的入射面实施增透处理, 也有可能采用 DOE 的倾斜放置方式。为了保证倾斜后 DOE 的束匀滑效果, 模拟分析了束匀滑指标随倾斜角度的变化情况, 并给出了定性的实验

结果。模拟计算和实验均表明, 在较大角度的倾斜放置下, DOE 会在光斑中心产生亮点, 同时束匀滑指标有较大的下降。为了保证 DOE 在实际应用中的效果, 给出了理论设计上的相位补偿方法。通过模拟计算验证, 此补偿方法可以有效地保证 DOE 在倾斜放置下的束匀滑质量。在倾斜角度给出的情况下, 通过一定的计算公式, 可以完全给出补偿后的设计相位, 而不需在工艺方法上做任何改变, 具有较高的可行性及可重复性。

**致谢** 感谢中国科学院上海光学精密机械研究所林尊琪院士的指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Y. Lin, T. J. Kessler, G. N. Lawrence. Distributed phase plates for super-Gaussian focal plane irradiance profiles[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7):764~771
- 2 R. E. English, J. I. Miller, J. Schweync. Ghost reflection analysis for the main laser of the national ignition facility[C]. *Optical Society of America 1998 Summer Topical Meetings U. S. A. Lawrence Livermore National Lab.* 1998,748~753
- 3 J. L. Hendrix, J. Schweync, J. Rowe. Ghost analysis visualization techniques for complex systems; examples from the NIF final optical assembly[C]. *The Third Annual International Conference on Solid State for Application to Inertial Confinement Fusion (ICF) U. S. A. Lawrence Livermore National Lab.* 1998,306~320
- 4 P. L. Kelly. Self focusing of optical beams [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1965, **15**(26):1005~1008
- 5 A. J. Campillo, S. L. Shapiro, B. R. Suydam. Periodic breakup of optical beams due to self-focusing [J]. *App. Phys. Lett.*, 1973, **23**(11):628~630
- 6 Deng Shitao, Li Xiaotong, Cen Zhaofeng *et al.*. Mitigating damage of the ghost in high power laser facilities by real-ray trace [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5):585~588
- 7 Wang Congjuan, Jin Yunxia, Wang Yingjian *et al.*. High laser-induced damage threshold antireflection coatings of 1053 nm deposited by ion assisted deposition [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):683~686  
王聪娟, 晋云霞, 王英剑等. 离子束辅助技术获得高激光损伤阈值的增透膜[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):683~686
- 8 Liu Hongjie, Liu Lanqin, Su Jingqin *et al.*. Lens design based on ghost image and aberration analysis in high-power laser facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5):976~980  
刘红婕, 刘兰琴, 粟敬钦等. 基于鬼像和像差分析的高功率激光装置透镜设计[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5):976~980
- 9 Su Xianyu, Li Jitao. *Information Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1999. 39~41  
苏显渝, 李继陶. *信息光学* [M]. 北京: 科学出版社, 1999. 39~41
- 10 Liu Qiang, Zhang Xiaobo, Wu Rong *et al.*. Influence of fabrication error in ion beam etching on diffractive optical element [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(11):50~54  
刘 强, 张晓波, 邬 融等. 离子束刻蚀工艺误差对 DOE 器件的影响[J]. *光电工程*, 2007, **34**(11):50~54