

## 光束质量对平顶衍射光学元件输出的影响

戴深宇, 郑昕, 赵帅\*

季华实验室光电科学与技术研究部, 广东 佛山 528200

**摘要** 衍射光学元件(DOE)对入射光束的波长、束宽、光束质量等参数都有很高的要求,其中光束质量的影响无法直接通过相干光场的衍射积分得出。本文利用高斯谢尔模型(GSM)光束分析了光束质量对平顶衍射光学元件输出的影响。采用对称迭代傅里叶变换算法设计了输出平顶光斑的DOE。用模式分解的方法研究了不同光束质量的光束经该DOE后的输出光斑,发现光束质量因子增加会使输出光斑平顶区尺寸减小,导致DOE失效。从交叉谱密度出发,表明DOE的输出光斑是相干部分和非相干部分的卷积,其中非相干部分是导致输出光斑劣化的原因。给出了平顶衍射光学元件适用的最大 $M^2$ 因子与输入和输出光束尺寸之间的关系。给出了一种GSM光束整形DOE的设计方法,该方法有助于在低光束质量激光器中实现DOE的应用。

**关键词** 衍射与光栅; 衍射光学元件; 光束质量; 高斯谢尔模型; 模式分解

**中图分类号** O436 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS222139

## 1 引言

在激光加工、表面烧蚀、医学检验等领域,能量均匀分布的平顶光束比激光器直接输出的高斯光束更有价值<sup>[1-3]</sup>。常见的平顶光束整形方法有非球面透镜组<sup>[4]</sup>、微透镜阵列系统<sup>[5]</sup>、液晶空间光调制器(SLM)<sup>[6]</sup>和衍射光学元件(DOE)<sup>[7]</sup>等,其中,DOE以其结构简单、设计自由度高、易于量产、材料选择范围广等优点,受到广泛关注。不同于传统的折光器件,DOE是一种基于光波衍射理论,利用表面浮雕微结构对波前的振幅或相位进行调控,从而实现入射光束再分布的精密光学器件,可以容易地实现一些传统折光结构难以实现的效果。然而DOE也存在一些限制,对输入光束的波长、束腰宽度、偏心率、光束质量等条件都有很高的要求<sup>[8]</sup>,当这些条件不满足高要求时,输出光斑将会偏离设计结果,影响实际使用。不同于其他的公差限制条件,光束质量对DOE的影响无法直接通过相干光场的衍射传输计算得出,必须考虑输入光束相干性的作用。然而,目前很少有研究讨论光束质量对DOE的影响,实际应用中激光器和DOE的装调人员也缺乏对此问题的清晰认识。

光束质量 $M^2$ 因子是评价激光器输出光束的重要指标,描述了激光器输出光束相对基模高斯光束的偏离程度,定义为实际光束和基模高斯光束空间束的宽积之比,理想单模高斯光束的 $M^2$ 等于1。20世纪90年代,Siegman<sup>[9]</sup>对 $M^2$ 因子的概念进行了完善,目前

$M^2$ 因子已经成为描述低功率激光器光束质量的标准。实际激光器的输出光束由于多模、波前畸变、振幅调制等多种因素影响<sup>[10]</sup>,导致光束质量变差, $M^2$ 因子通常大于1。当输出光束不经过其他光学元件,且忽略激光器内部的非线性效应时,激光器输出的多模激光可近似用高斯谢尔模型(GSM)光束描述<sup>[11]</sup>,其特点是光源的光强和复相干度都是高斯型函数,且复相干度仅与光源上两点间距离有关。作为最常用的部分相干光模型,大量的研究表明,GSM光束是一种有效的多模激光近似模型<sup>[12-14]</sup>。

本文利用GSM光束研究了光束质量对平顶DOE输出光斑的影响。首先通过对称迭代傅里叶变换算法设计了一个平顶DOE,实现基模高斯光束照射下均匀平顶光斑的输出。随后利用相干模式表示和随机模式表示方法,研究了不同光束质量的GSM光束经该DOE后的输出结果,发现光束质量因子增加会导致输出平顶光斑劣化,使DOE失效。指出非相干部分的卷积贡献是导致光斑劣化的根本原因,并给出了平顶DOE适用的最大 $M^2$ 因子与输入、输出光束尺寸之间的关系。提出了一种实现GSM光束整形DOE的设计方法,该方法将有助于DOE在低光束质量激光器中的应用。

## 2 基本原理

## 2.1 相干光DOE设计

1972年,Gerchberg和Saxton为解决电镜成像中

收稿日期: 2022-12-13; 修回日期: 2023-03-05; 录用日期: 2023-03-24; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3602600)

通信作者: \*zs040148@163.com

相位重建的问题,提出了一种简单高效的迭代算法,即 G-S 算法<sup>[15]</sup>。算法的基本思路是:1)根据入射光场和假定的初始相位,通过透镜的傅里叶变换特性得到输出光场分布;2)根据限制条件,修改输出光场的振幅为目标光场的振幅,保留相位;3)将输出光场作傅里叶逆变换得到输入面的光场分布;4)根据输入限制条件,修改输入光场的振幅为入射光场的振幅,保留相位。经过反复迭代,最终可以得到符合要求的 DOE。该迭代过程可用以下递推公式表示:

$$\begin{cases} G_{k-1}(u, v) = \mathcal{F}\{g_{k-1}(x, y)\} = |G_{k-1}| \exp(j\Phi_{k-1}) \\ G'_k(u, v) = |F(u, v)| \exp(j\Phi_{k-1}) \\ g'_k(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{G'_k(u, v)\} = |g'_k| \exp(j\varphi_k) \\ g_k = u_{in} \exp(j\varphi_k) \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $u_{in}$  是输入光场;  $F$  是目标光场;  $G$  是迭代中输出面的光场;  $g$  是迭代中输入面的光场;  $\Phi$  是输出面的相位;  $\varphi$  是输入面的相位; 下标  $k$  代表迭代次数。

在合适的初始相位和约束条件下, G-S 算法可以快速收敛得到稳态解。然而, G-S 算法容易陷入局部最优解, 在光斑整形应用中, 算法给出的衍射相位结构通常只能给出均匀性较差的输出光斑, 使设计的 DOE 无法满足高均匀性的要求。本文采用一种改进 G-S 算法——对称迭代傅里叶变换算法<sup>[16]</sup>设计平顶

DOE, 该算法通过引入信号窗口, 可以在保证输出效率的同时得到高均匀性的输出光斑。其迭代输出限制条件为

$$F_k(u, v) = \begin{cases} 2c \sqrt{I_{out}(u, v)} - |G_{k-1}(u, v)| & \text{if } (u, v) \in \gamma \\ \sqrt{I_{out}(u, v)} & \text{if } (u, v) \notin \gamma \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $\gamma$  表示信号窗口;  $I_{out}$  为目标光强;  $c = \frac{\sum |G(u, v) \in \gamma|}{\sum |\sqrt{I_{out}(u, v)} \in \gamma|}$  为约束参数。

利用对称迭代傅里叶变换算法, 设计了针对高斯光束的方形平顶 DOE, 其输入光束波长为 532 nm, 束腰宽度为 4 mm, DOE 有效孔径为 10 mm, 台阶数为 8, 在焦距为 200 mm 的透镜下输出边长为 100  $\mu\text{m}$  的方形光斑。该 DOE 的相位分布和输出光斑形貌如图 1 所示。输出光斑尺寸  $D$  为 100  $\mu\text{m}$ 。根据常用的光斑均匀度定义  $U = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$ , 光斑平顶区的均匀度为 2.62%, 符合大多数应用要求。定义有效能量利用率为光斑输出 50%  $I_{max}$  以上部分能量占比, 达 84.48%。可以看出, 设计的 DOE 经过相位台阶化之后, 输出的方形光斑仍具有很高的均匀性和有效能量利用率。下文将以此 DOE 为标准, 利用 GSM 讨论光束质量对 DOE 输出的影响。

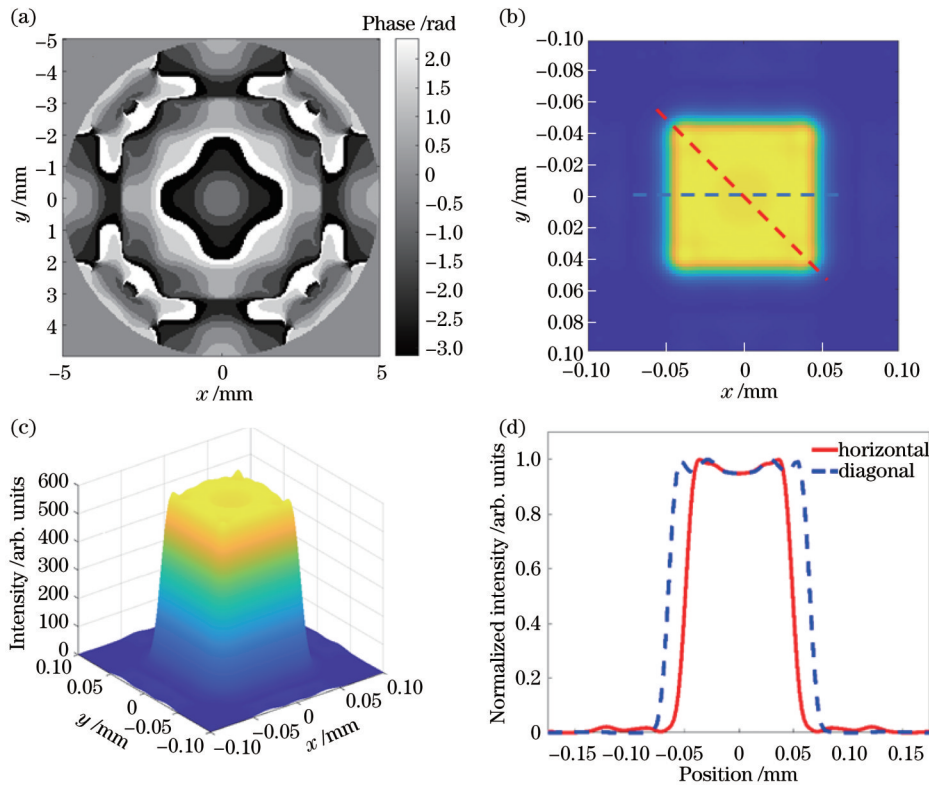


图 1 平顶 DOE 的设计结果。(a) DOE 相位图; (b) 输出光斑的形貌; (c) 光斑三维图; (d) 光斑水平和对角截面图

Fig. 1 Design results of flat-topped DOE. (a) Phase diagram of DOE; (b) profile of output spot; (c) 3D diagram of spot; (d) horizontal and diagonal sections of spot

## 2.2 GSM 光束的传输

实际工作中激光器输出的激光通常不是纯粹的基模高斯光束,常用光束质量  $M^2$  因子描述实际光束偏离基模高斯光束的程度。 $M^2$  定义为

$$M^2 = \frac{\theta_0 \cdot \omega_0}{\theta_{00} \cdot \omega_{00}}, \quad (3)$$

式中:  $\theta_0$  和  $\omega_0$  是实际光束的远场发散角和最小束腰半径;  $\theta_{00}$  和  $\omega_{00}$  是基模高斯光束的远场发散角和最小束腰半径。

多模输出、波前畸变、振幅调制等因素都会导致输出激光的光束质量变差,从而导致  $M^2 > 1$ <sup>[9]</sup>。当激光器输出光束不经过其他光学元件、忽略激光器内部的非线性效应时,可以将输出光视为具有多模特性的部

分相干光。在讨论部分相干光的传输问题时,常用到交叉谱密度函数。在空间-频率域中,交叉谱密度表示空间两点的相关性,定义为

$$W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z, \omega) = \langle E^*(\mathbf{r}_1, z; \omega) E(\mathbf{r}_2, z; \omega) \rangle. \quad (4)$$

在讨论准单色光时,频率  $\omega$  可省略。当  $\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_2$  时,交叉谱密度函数即为该点的光强。由交叉谱密度函数可以定义复相干度为

$$\mu(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \frac{W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)}{\sqrt{W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1)W(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_2)}}. \quad (5)$$

完全相干光复相干度  $\mu = 1$ , 完全非相干光  $\mu = 0$ , 部分相干光  $\mu$  介于 0 和 1 之间。当通过一个近轴 ABCD 光学系统时,交叉谱密度函数的传输公式为

$$W(x_1, y_1, x_2, y_2, z) = \left( \frac{k}{2\pi B} \right)^2 \iiint W(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2, 0) \times \\ \exp \left\{ -\frac{ik}{2B} \left[ A(x_1^2 + y_1^2) - 2(x_1 x'_1 + y_1 y'_1) + D(x_1^2 + y_1^2) \right] - \right. \\ \left. \left[ A(x_2^2 + y_2^2) - 2(x_2 x'_2 + y_2 y'_2) + D(x_2^2 + y_2^2) \right] \right\} dx'_1 dy'_1 dx'_2 dy'_2. \quad (6)$$

GSM 光束是一类最常见的用于描述具有良好方向性但是只有部分空间相干性的光束,在一定条件下可以作为描述多模激光的物理模型,其特点是:1)其源平面上任意两点的复相干度只与两点间距离有关;2)其光强和复相干度都是高斯型函数。GSM 光束在源面  $z = 0$  处的交叉谱密度函数可以表示为

$$W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, 0) = I_0 \exp \left( -\frac{\mathbf{r}_1^2 + \mathbf{r}_2^2}{\omega_0^2} \right) \exp \left( -\frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|^2}{2\sigma_0^2} \right), \quad (7)$$

式中:  $\omega_0$  是束腰半径;  $\sigma_0$  是光束的横向相干宽度。根据光束质量的定义, GSM 光束的  $M^2$  因子可表示为

$$M^2 = \sqrt{1 + \frac{\omega_0^2}{\sigma_0^2}}. \quad (8)$$

GSM 光束经过平顶 DOE 后焦平面光斑可由上述传输公式由光源交叉谱密度  $W_i$  和 DOE 的相位透过率函数  $T_{\text{DOE}}$ , 并利用透镜的傅里叶变换性质得到:

$$I(x, y) = \frac{1}{(\lambda f)^2} \iiint T_{\text{DOE}} T_{\text{DOE}}^* W_i(x'_1, y'_1, x'_2, y'_2) \times \\ \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda f} \left[ x(x'_2 - x'_1) + y(y'_2 - y'_1) \right] \right\} dx'_1 dy'_1 dx'_2 dy'_2, \quad (9)$$

这是一个四重积分,直接计算复杂度很大,常用模式分解的方法简化计算。

## 2.3 GSM 的模式分解方法

### 2.3.1 交叉谱密度函数的相干模式表示

Wolf<sup>[17]</sup>指出,交叉谱密度函数可以表示成彼此正交的本征模式的求和形式:

$$W_0(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_{mn} \phi_{mn}^*(\mathbf{r}_1) \phi_{mn}(\mathbf{r}_2), \quad (10)$$

式中:  $\lambda_{mn}$  是本征值;  $\phi_{mn}$  是相干的本征函数。这种模式分解方法称为交叉谱密度的相干模式(CM)表示。用厄米高斯模式作为本征函数展开交叉谱密度函数,得到本征函数和本征值分别为

$$\phi_{mn}(x, y) = \left( \frac{2c}{\pi} \right)^{1/2} \frac{1}{\sqrt{2^{m+n} m! n!}} \times \\ H_m(x \sqrt{2c}) H_n(y \sqrt{2c}) e^{-c(x^2 + y^2)}, \quad (11)$$

$$\lambda_{mn} = \left( \frac{\pi}{a + b + c} \right) \left( \frac{b}{a + b + c} \right)^{m+n}, \quad (12)$$

式中:  $H_m$  是厄密多项式; 系数  $a = 1/\omega_0^2$ ,  $b = 1/2\sigma_0^2$ ,  $c = (a^2 + 2ab)^{1/2}$ 。

虽然理论展开的求和形式中模的数量是无穷多的,但是高阶模对应的本征值占比单调减小并趋近于零。通过设置合适的截断,可以用有限个相干模式的叠加精确地表示交叉谱密度函数,过程如图 2(a)所示。这样交叉谱密度的传输问题就简化为各个相干模式独立传播过程的叠加,通过菲涅耳-惠更斯原理计算得出:

$$U(x, y, z) = \frac{z}{j\lambda} \iint U(x', y', 0) \exp \frac{jkz}{r^2} dx' dy'. \quad (13)$$

图 2(c)给出了用相干模分解计算的具有相同束腰半径  $\omega_0$ , 不同  $M^2$  的 GSM 光束经焦距为 200 mm 的透镜聚焦后的光斑中心截面,聚焦光斑尺寸与衍射极限公式  $d = \frac{4\lambda M^2}{\pi(2\omega_0)}$  的结果一致,聚焦光斑尺寸随  $M^2$

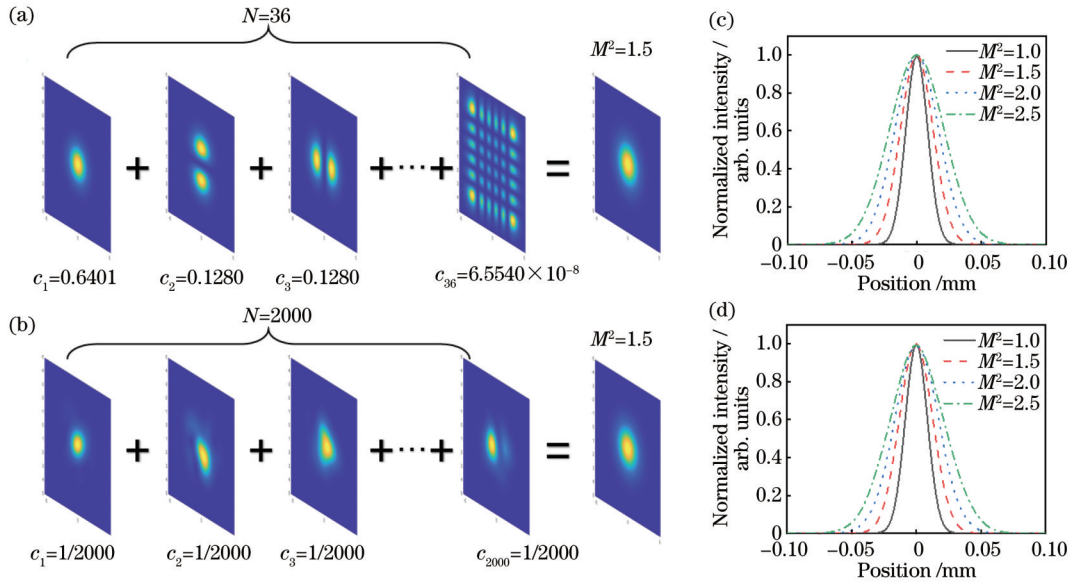


图 2 GSM 光束的模式分解法。(a)相干模式和(b)随机模式叠加得到 GSM 光束;(c)相干模式和(d)随机模式叠加计算的具有相同束腰半径  $w_0$ 、不同  $M^2$  因子的 GSM 光束聚焦后的光斑中心截面图

Fig. 2 Mode decomposition methods for GSM beam. GSM beams obtained by superposition of (a) coherent modes and (b) random modes; calculated focal spot center section of beams with same beam waist  $w_0$  and different  $M^2$  factors by superposition of (c) coherent modes and (d) random modes

增加线性增大。

### 2.3.2 交叉谱密度函数的随机模式表示

实验中常用随机相位板产生 GSM 光束<sup>[18]</sup>, 这种利用随机相位的方法被称为交叉谱密度的随机模式 (RM) 表示。设经过随机相位屏的光场为

$$E(\mathbf{r}_1, t) = \exp\left(-\frac{\mathbf{r}_1^2}{w_0^2}\right) T(\mathbf{r}_1, t), \quad (14)$$

式中,  $T(\mathbf{r}_1, t)$  表示随机相位屏的透过率函数, 则交叉谱密度函数可写为

$$W_0(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \langle E^*(\mathbf{r}_1, t) E(\mathbf{r}_2, t) \rangle = \exp\left(-\frac{\mathbf{r}_1^2 + \mathbf{r}_2^2}{w_0^2}\right) \langle T^*(\mathbf{r}_1, t) T(\mathbf{r}_2, t) \rangle. \quad (15)$$

当  $T$  的自相关也是高斯函数时,

$$\langle T^*(\mathbf{r}_1, t) T(\mathbf{r}_2, t) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_n^*(\mathbf{r}_1) T_n(\mathbf{r}_2) = \exp\left(-\frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|^2}{2\sigma_0^2}\right), \quad (16)$$

得到的交叉谱密度函数与 GSM 光束等价。式(16)中每一个  $T_n$  都是一个由圆复高斯随机数决定的随机模

式, 离散条件下可推导出:

$$T_n(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\left\{L_0 r(m) \sqrt{\pi} \sigma_0 \exp\left[-\pi^2 \sigma_0^2 (f_x^2 + f_y^2)\right]\right\}, \quad (17)$$

式中:  $r(m)$  为圆复高斯随机数;  $L_0$  为计算宽度;  $f$  为频域坐标;  $\mathcal{F}^{-1}$  表示傅里叶逆变换。

随机模式叠加的过程如图 2(b) 所示, 每个单一模式表现出随机分布, 随着总模式数  $N$  的增加, 叠加结果趋近于 GSM 光束。这样交叉谱密度的传输问题可以表示为各个随机模式独立传播过程的叠加。图 2(d) 给出了束腰半径  $w_0$  相同、 $M^2$  不同的 GSM 光束经 200 mm 透镜聚焦后的光斑中心截面。可以看出, 除了随机涨落外, 随机模式表示的结果与相干模式表示相同。增大模式数量会使结果趋近理想 GSM 光束, 但是会增加计算时间。

### 2.4 GSM 光束传输的卷积表示

也可利用变量替换的方法对 GSM 光束传输进行简化。回顾交叉谱密度函数式(9), 令  $\Delta x' = x'_1 - x'_2$ 、 $\Delta y' = y'_1 - y'_2$ 、 $\bar{x}' = (x'_1 + x'_2)/2$ 、 $\bar{y}' = (y'_1 + y'_2)/2$ , 对式(9)进行变形得

$$I(x, y) = \iint \left[ \frac{1}{(\lambda f)^2} \iint G(\bar{x}', \bar{y}') G^*(\bar{x}' - \Delta x', \bar{y}' - \Delta y') d\bar{x}' d\bar{y}' \right] \times \exp\left(-\frac{\Delta x'^2 + \Delta y'^2}{\sigma_0^2}\right) \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda f} (x \Delta x' + y \Delta y')\right] d\Delta x' d\Delta y', \quad (18)$$

式中,  $G(x', y') = T_{\text{DOE}}(x', y') \exp\left[-\frac{(x'^2 + y'^2)}{w_0^2}\right]$ 。式

(18) 是两部分函数乘积的傅里叶变换, 可视为频域中相干和非相干两部分的卷积。根据卷积定理和透镜的傅里叶变换作用, 在焦平面有

$$I(x, y) = I_C \otimes I_{\text{PC}}, \quad (19)$$

式中,

$$I_C = \mathcal{F}\left[G(x', y')\right] \quad (20)$$

是相干光束入射时, DOE 的输出光斑。

$$I_{\text{PC}} = \exp\left[-\frac{2\pi^2 \sigma_0^2}{\lambda^2 f^2}(x^2 + y^2)\right] \quad (21)$$

是非相干部分的卷积核。这样就从交叉谱密度函数出发, 直接将 DOE 后的输出光斑分离成相干部分和非相干部分的卷积。

### 3 仿真结果

利用 2.3 节提到的模式分解方法, 计算了不同光束质量的 GSM 光束经 DOE 后的光斑分布。图 3(a)~3(d) 和 3(i) 给出了利用相干模式表示方法计算的  $M^2$  因子分别为 1.0、1.5、2.0 和 2.5 的 GSM 光束经 DOE 后的光斑形貌和剖面图。计算中系数截断设置为  $10^6$ , 截断后四种不同光束质量的总模式数分别为 1、36、64、100。可以看出, 随着  $M^2$  因子增加, 输出光斑平顶区尺寸逐渐减小, 直至劣化为类似高斯型的光斑, DOE 的平顶整形作用失效。图 3(e)~3(h) 和 3(j) 给出了利用随机模式表示方法计算的结果, 计算中总模式数设置为 2000。可以看出, 随机模式表示方法得到的结果存在随机涨落, 趋近相干模式表示的结果, 表明了两者是 GSM 光束的等价表示。从上述结果可以看

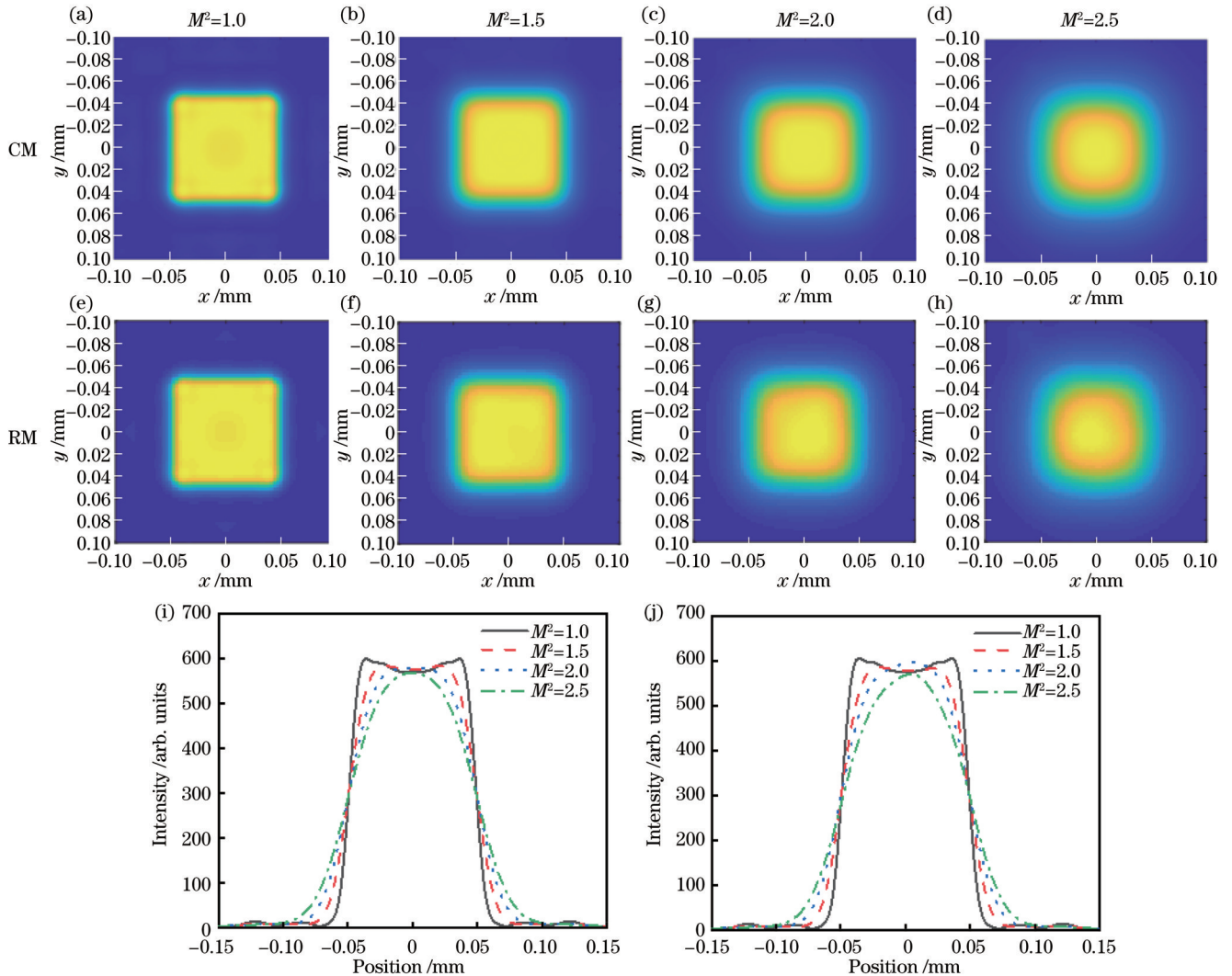


图 3 模式分解法得到 GSM 光束经 DOE 的输出光斑形貌。(a)~(d) 相干模式和 (e)~(h) 随机模式计算的不同  $M^2$  因子的 GSM 光束经 DOE 后的输出光斑形貌; (i) 相干模式和 (j) 随机模式计算的光斑截面图

Fig. 3 Output spot morphology of GSM beam after DOE by mode decomposition methods. Output spot morphology of GSM beams with different  $M^2$  factors after DOE calculated by (a)~(d) coherent modes and (e)~(h) random modes; spot sections calculated by (i) coherent modes and (j) random modes

出,该平顶DOE对光束质量的要求很高,当 $M^2$ 因子增大到1.5时,输出的结果已经存在明显的变形。

利用2.4节GSM光束传输的卷积表示可以得到相同的结论。图4给出了 $M^2$ 分别为1.5和2.5时各自

的 $I_C$ 、 $I_{PC}$ 和它们的卷积即输出光斑。可以看出,利用卷积计算得到的结果与模式分解方法得到的结果相同。卷积方法表明, $M^2$ 增大导致光斑劣化的本质在于非相干部分的卷积贡献。

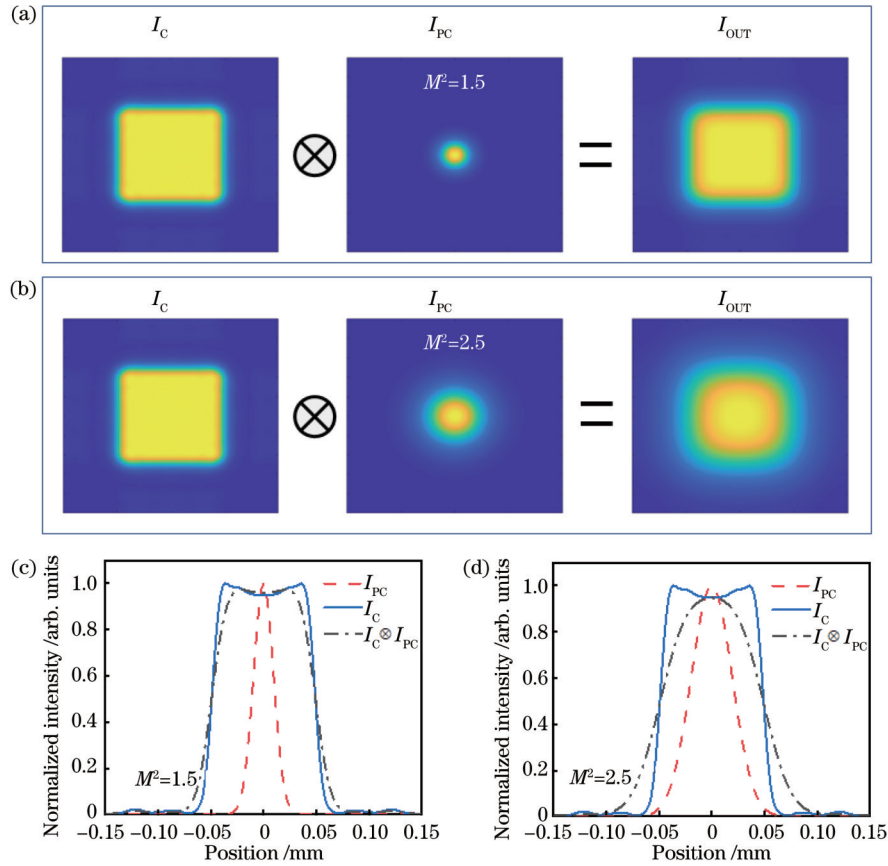


图4 卷积法得到GSM光束经DOE的输出光斑形貌。(a)  $M^2=1.5$ 和(b)  $M^2=2.5$ 时,DOE的相干输出 $I_C$ 、非相干卷积核 $I_{PC}$ 和它们的卷积 $I_{out}$ ; (c)  $M^2=1.5$ 和(d)  $M^2=2.5$ 时 $I_C$ 、 $I_{PC}$ 和 $I_{out}$ 的光斑截面图

Fig. 4 Output spot morphology of GSM beam after DOE by convolution methods. Coherent part  $I_C$ , incoherent convolution core  $I_{PC}$ , and their convolution  $I_{out}$  when (a)  $M^2=1.5$  and (b)  $M^2=2.5$ ; spot sections of  $I_C$ ,  $I_{PC}$ , and  $I_{out}$  when (c)  $M^2=1.5$  and (d)  $M^2=2.5$

对于相同的DOE, $I_C$ 部分是相同的,而卷积核 $I_{PC}$ 的宽度为

$$d_{PC} = \frac{\lambda f}{\pi \sigma_0}. \quad (22)$$

随着 $M^2$ 因子的增大,横向相干宽度 $\sigma_0$ 减小,卷积核宽度 $d_{PC}$ 变大,从而使卷积后的输出光斑“模糊”。只有当卷积核宽度远小于DOE的光斑尺寸 $D$ 时,卷积结果才会接近设计的输出光斑,因此,对于给定的DOE,适用的最大 $M^2$ 因子与输出光斑尺寸 $D$ 和输入光束尺寸 $w_0$ 有如下关系:

$$M^2 = \sqrt{1 + \left( \frac{\pi D w_0}{\alpha \lambda f} \right)^2}, \quad (23)$$

式中, $\alpha = D/d_{PC}$ 是输出光斑尺寸与最大卷积核宽度的比例系数,由实际需求给定。当 $\alpha = 5$ 时,对于该DOE,适用的最大 $M^2 = 1.55$ ;当 $\alpha = 10$ 时,最大 $M^2 = 1.16$ 。特别地,当输出光斑尺寸 $D$ 为输入束腰半径为 $w_0$ 的相干光的衍射极限时,

$$M^2 = \sqrt{1 + \left( \frac{2}{\alpha} \right)^2}, \quad (24)$$

此时所需的最大 $M^2$ 因子仅与 $\alpha$ 有关。

## 4 GSM光束整形DOE的设计方法

基于不同的传输模型,对GSM光束整形的DOE设计有两种思路:一种思路是对GSM光束进行模式分解,然后对各模式分别进行迭代计算,再得到整体DOE相位<sup>[19]</sup>。然而这种方法在低相干光入射时随着模式分解数量的增加会导致巨大的计算量;另一种思路是基于DOE输出的卷积特性,对于给定的非相干卷积核 $I_{PC}$ ,只要合理设计相干输出 $I_C$ ,就可以通过传统的相干算法设计对应GSM光束整形的DOE。

注意到DOE输出的卷积性质与光学成像系统中由点扩展函数(PSF)引起的图像模糊效果类似,因此可以将成像系统中已经发展成熟的方法应用于GSM光束整形DOE的设计。在光刻中,随着图形关键尺寸

的减小,由于成像系统的衍射限制引起的光学邻近效应(OPE)会严重影响光刻图形的质量。光学邻近校正(OPC)通过修改原始掩模图案调整透明区域的分布,成功地补偿并最小化了成像失真,已经成为光刻中必不可少的分辨率增强技术。这里借鉴光刻中的 OPC 方法,直接对原始目标形状添加衬线得到修正的相干输出目标图形,再利用传统相干的算法设计 DOE。这种方法的优点在于既可以使用光刻中成熟的各种 OPC 方法直接处理目标形状,又能利用传统的高效迭代傅里叶变换算法(IFTA)设计 DOE。

图 5 给出了一个用临近校正方法设计对  $M^2=2.5$  的 GSM 光束整形的 DOE 的例子。由原始目标图形设计的 DOE 在该 GSM 光束下的输出光斑具有明显的收缩变形[图 5(a)~5(c)]。而通过在原始目标图形上加方形衬线的方式,所设计的 DOE 在该 GSM 光束下的输出光斑可以很好地与目标图形吻合[图 5(d)~5(f)]。此外,相干 DOE 的输出结果中,在图形外存在许多来源于输入相干光的相干噪声,而 GSM 光束整形 DOE 有效地改善了这种相干噪声现象。

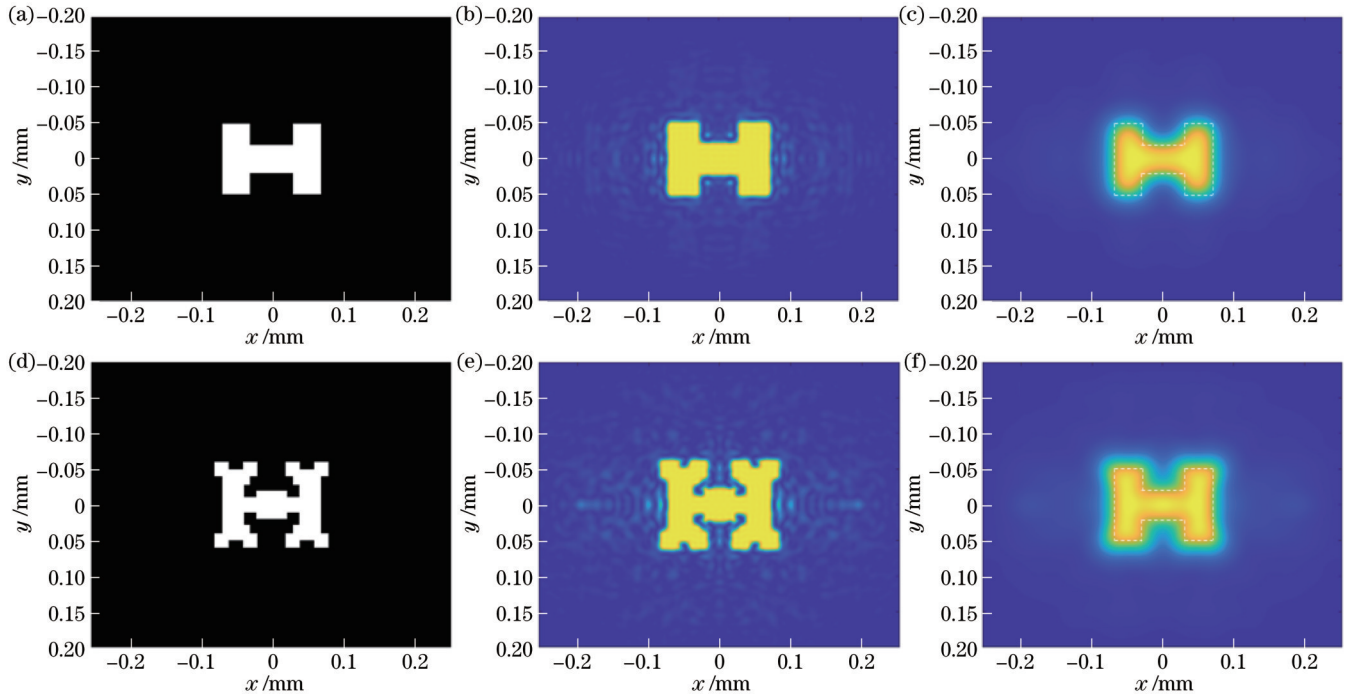


图 5 临近校正法设计部分相干光束整形 DOE。(a)原始目标图形;(b)由原始目标图形所设计的 DOE 的相干输出  $I_c$ ;(c)在  $M^2=2.5$  的 GSM 光束下原始 DOE 的输出;(d)临近校正后的目标图形;(e)临近校正法校正后 DOE 的相干输出  $I_c$ ;(f)在  $M^2=2.5$  的 GSM 光束下校正 DOE 的输出

Fig. 5 Design of partially coherent beam shaping DOE by proximity correction method. (a) Original target; (b)  $I_c$  of DOE designed by original target; (c)  $I_{out}$  of original DOE under a GSM beam with  $M^2=2.5$ ; (d) target with proximity correction; (e)  $I_c$  of DOE designed by proximity correction method; (f)  $I_{out}$  of correction DOE under a GSM beam with  $M^2=2.5$

## 5 结 论

本文首先采用对称迭代傅里叶变换算法设计了一个工作波长为 532 nm、输入束腰宽度为 4 mm、在 200 mm 焦距下输出边长为 100  $\mu\text{m}$  方形光斑的 8 阶平顶 DOE。利用相干模式表示和随机模式表示的方法,研究了不同光束质量的 GSM 光束经该 DOE 后的输出结果,发现光束质量增加会导致输出光斑平顶区尺寸减小,逐渐劣化为类高斯型的光斑,使 DOE 失效。从交叉谱密度出发,表明输出光斑是相干部分和非相干部分的卷积,非相干部分的卷积贡献是导致光斑劣化的原因。给出了平顶 DOE 适用的最大  $M^2$  因子与输出和输入光束尺寸之间的关系,为实际应用中激光器的选择提供依据。给出了一种 GSM 光束整形 DOE 的设

计方法,该方法有望实现低光束质量激光器中 DOE 的应用。

## 参 考 文 献

- [1] Račiukaitis G, Stankevičius E, Gečys P, et al. Laser processing by using diffractive optical laser beam shaping technique[J]. Journal of Laser Micro, 2011, 6(1): 37-43.
- [2] Chen Y, Guo Y B, Xu M J, et al. Study on the element segregation and Laves phase formation in the laser metal deposited IN718 superalloy by flat top laser and Gaussian distribution laser[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 754: 339-347.
- [3] Kim H Y, Choi W S, Ji S Y, et al. Morphologies of femtosecond laser ablation of ITO thin films using Gaussian or quasi-flat top beams for OLED repair[J]. Applied Physics A, 2018, 124(2): 123.
- [4] Oliker V, Doskolovich L L, Bykov D A. Beam shaping with a

- Plano-freeform lens pair[J]. Optics Express, 2018, 26(15): 19406-19419.
- [5] Liu X Q, Yu L, Chen Q D, et al. Sapphire concave microlens arrays for high-fluence pulsed laser homogenization[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(20): 1615-1618.
- [6] Metel A S, Stebulyanin M M, Fedorov S V, et al. Power density distribution for laser additive manufacturing (SLM): potential, fundamentals and advanced applications[J]. Technologies, 2018, 7(1): 5.
- [7] Katz S, Kaplan N, Grossinger I. Using diffractive optical elements: DOEs for beam shaping-fundamentals and applications [J]. Optik & Photonik, 2018, 13(4): 83-86.
- [8] Banerji S, Sensale-Rodriguez B. A computational design framework for efficient, fabrication error-tolerant, planar THz diffractive optical elements[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1-9.
- [9] Siegman A E. Defining, measuring, and optimizing laser beam quality[J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1868: 2-12.
- [10] Neubert B J, Eppich B. Influences on the beam propagation ratio  $M^2$ [J]. Optics Communications, 2005, 250(4/5/6): 241-251.
- [11] Friberg A T, Sudol R J. Propagation parameters of Gaussian Schell-model beams[J]. Optics Communications, 1982, 41(6): 383-387.
- [12] Gase R. The multimode laser radiation as a Gaussian Schell model beam[J]. Journal of Modern Optics, 1991, 38(6): 1107-1115.
- [13] Turunen J, Pääkkönen P, Kuittinen M, et al. Diffractive shaping of excimer laser beams[J]. Journal of Modern Optics, 2000, 47(13): 2467-2475.
- [14] Liu Y X, Pu J X, Qi H Q. Investigation on  $z$ -scan experiment by use of partially coherent beams[J]. Optics Communications, 2008, 281(2): 326-330.
- [15] Gerchberg R. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. Optik, 1972, 35: 237-246.
- [16] Liu J S, Caley A J, Taghizadeh M R. Symmetrical iterative Fourier-transform algorithm using both phase and amplitude freedoms[J]. Optics Communications, 2006, 267(2): 347-355.
- [17] Starikov A, Wolf E. Coherent-mode representation of Gaussian Schell-model sources and of their radiation fields[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1982, 72(7): 923-928.
- [18] Basu S, Hyde M W, Xiao X F, et al. Computational approaches for generating electromagnetic Gaussian Schell-model sources[J]. Optics Express, 2014, 22(26): 31691-31707.
- [19] Barré N, Jesacher A. Holographic beam shaping of partially coherent light[J]. Optics Letters, 2022, 47(2): 425-428.

## Influence of Beam Quality on Output of Flat-Topped Diffractive Optical Elements

Dai Shenyu, Zheng Xin, Zhao Shuai\*

*Department of Photoelectric Science and Technology, Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, Guangdong, China*

### Abstract

**Objective** In fields such as laser processing, surface ablation, and medical testing, flat-topped beams with uniform energy distribution are more valuable than Gaussian beams directly output by lasers. Diffractive optical elements (DOEs) are widely used as beam-shaping devices with the advantages of simple structure, high design degree of freedom, accessible mass production, and wide range of material selection. Differing from traditional refractive devices, DOEs use surface relief microstructures to adjust the amplitude or phase of the wavefront, thereby tuning the distribution of the output beam. DOEs have high requirements for the wavelength, waist width, eccentricity, beam quality, and other conditions of the input beam. When these requirements are not met, the output light spot will deviate from the design results, which affects actual use. Unlike other tolerance constraints, the effect of beam quality on DOEs cannot be directly calculated from the diffraction propagation of coherent light fields, and the effect of input beam coherence must be considered. However, few studies have discussed the influence of beam quality on DOEs. In this work, we study the output results of Gaussian shell-model (GSM) beams with different beam qualities passing through the DOE and propose a new method for designing DOEs with GSM beam shaping.

**Methods** In this work, an improved G-S algorithm, namely, the symmetric iterative Fourier transform algorithm (SIFTA), is used to design flat-topped DOEs. By introducing a signal window, this algorithm can obtain a highly uniform output light spot while ensuring output efficiency. With the DOE designed by SIFTA as a standard, the influence of beam quality is studied. The multimode laser can be approximately described by a GSM beam. The transmission of the GSM beam through a DOE is typically described by using a cross-spectral density (CSD) function, which involves a 4-order Fourier transform and results in significant computational complexity. In order to simplify the calculation, the mode decomposition of CSD is used to study the output light spot of the DOE under GSM beams. The coherent-mode representation uses coherent Hermite-Gaussian modes to express the CSD and requires only a limited number of modes to obtain accurate solutions. Similarly, the random-mode representation uses random modes that conform to statistical relationships to represent the CSD and reduce computational complexity. We also use variable substitution to simplify



CSD transmission and find that the DOE output can be directly separated into a convolution of coherent and noncoherent parts.

**Results and Discussions** By using the mode decomposition method, the output light spot distributions of GSM beams with different beam qualities passing through the DOE are calculated (Fig. 3). It can be seen that as the  $M^2$  factor increases, the size of the flat-topped area of the output light spot gradually decreases until it deteriorates to a Gaussian-type light spot, and the flat-topped shaping effect of the DOE fails. The flat-topped DOE has a high requirement for beam quality. When the  $M^2$  factor increases to 1.5, the output result already has significant deformation. The same conclusion can be obtained using the convolutional representation of the GSM beams (Fig. 4). Only when the width of the convolution kernel is much smaller than the spot size  $D$  of the DOE will the convolution result approach the designed output light spot. Therefore, for a given DOE, the applicable maximum  $M^2$  factor is related to the output spot size  $D$  and the input beam size  $w_0$ , and they can be expressed as  $M^2 = \left[ 1 + (\pi D w_0 / \alpha \lambda f)^2 \right]^{1/2}$ . Specifically,  $\alpha$  is the proportional coefficient between the output spot size and the maximum convolution kernel width;  $\lambda$  is the wavelength;  $f$  is the focal length. In addition, the convolution property of DOE output is similar to the image blurring effect caused by the point spread function (PSF) in optical imaging systems. Therefore, methods in photolithography systems can be applied to the design of DOEs with GSM beam shaping. A modified coherent output target pattern is obtained by directly adding serifs to the original target shape, and then a DOE is designed using traditional coherent algorithms. Figure 5 shows an example of designing a DOE with GSM beam shaping using the proximity correction method. The output light spot of the designed DOE under the GSM beam can well match the target pattern. Moreover, the DOE with GSM beam shaping effectively improves the coherent noise phenomenon.

**Conclusions** In this work, the SIFTA is used to design an 8-order flat-topped DOE with a square light spot. Using the methods of coherent-mode representation and random-mode representation, the output results of GSM beams with different beam qualities passing through the DOE are studied. It is found that increasing beam quality will lead to a reduction in the size of the flat-topped area of the output light spot and make the DOE ineffective. It is shown that the output light spot is a convolution of coherent and noncoherent parts, and the convolution contribution of noncoherent parts is the cause of light spot degradation. The relationship among the applicable maximum  $M^2$  factor of flat-topped DOEs, output spot size, and input beam size is given, which provides a basis for laser selection in practical application. A design method of DOEs with GSM beam shaping is presented, which is expected to achieve the application of DOEs in lasers with low beam quality.

**Key words** diffraction and grating; diffractive optical elements; beam quality; Gaussian-Schell model; mode decomposition