

## 光学学报

## 基于微透镜阵列的大功率紫外激光匀化技术

郑昕, 戴深宇, 张玉莹, 赵帅\*

季华实验室光电科学与技术研究部, 广东 佛山 528200

**摘要** 应用于激光剥离、激光退火、激光转移等领域的大功率纳秒紫外激光器的输出激光通常是强度分布不均匀的部分相干光,为满足精密加工的高均匀度要求,开展了基于成像型微透镜阵列的紫外激光匀化技术研究。利用伪模分解理论和角谱衍射传输算法,建立了快速计算部分相干光通过微透镜阵列匀化系统的数值模型,并以准分子激光为仿真光源,通过对离焦量、阵列间距等参数的分析,确定了最佳设计参数,实现了边缘锐利的高均匀度方形光束输出。此外,详细讨论了微透镜阵列失调对光束形貌和均匀度的影响,并通过实验说明了理论设计的可靠性和参数影响分析的准确性。

**关键词** 激光光学; 紫外激光; 部分相干光; 激光匀化; 微透镜阵列; 失调

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222091

## 1 引言

在半导体加工和显示面板制造领域,大功率紫外激光器被广泛应用于大尺寸柔性有机发光二极管(OLED)剥离<sup>[1-3]</sup>、晶圆退火<sup>[4]</sup>、micro-LED 转移和修复<sup>[5-6]</sup>等。常用的激光器主要有固体碟片激光器和准分子激光器<sup>[7-8]</sup>,输出激光均是脉宽为 ns 量级且具有复杂多横模结构的部分相干光,光束强度通常呈高斯或近平顶分布,直接应用时无法满足精密加工的高均匀度要求,需要对其进一步匀化整形。激光匀化方法可分为滤波法、光场映射法和光束积分法<sup>[9-13]</sup>,其中:滤波法对光能的利用率低且匀化效果较差,光场映射法对波长敏感且多用于单模激光,两者都不适用于大功率紫外激光匀化;光束积分法基于分割、叠加原理,具有能量利用率高、对波长不敏感、对非稳定的多模激光匀化效果好等特点,是目前实现大功率紫外激光匀化的重要方法<sup>[13]</sup>。

光束积分法可采用微透镜阵列、光楔阵列、反射镜阵列等元件实现<sup>[11-13]</sup>,微透镜阵列因抗损伤阈值高、制作工艺成熟且使用范围最广<sup>[3-4]</sup>。基于微透镜阵列的激光匀化技术分为衍射型和成像型<sup>[12-14]</sup>,利用成像型技术可以得到均匀度更高、边缘更锐利的匀化光束,在高精微密加工方面的应用潜力更大。但是,当前针对大功率紫外激光的微透镜阵列匀化技术研究多集中于几何光学范畴<sup>[15-18]</sup>,采用光线追迹的方法无法考虑部分相干光衍射和干涉效应的影响,如:多光束干涉时会生成散斑,使得光束均匀度下降<sup>[19]</sup>;有限孔径限制导致

衍射振荡<sup>[13]</sup>等。

利用交叉谱密度函数(CSD)可得到部分相干光通过复杂光学系统的衍射传输,但由于涉及四重积分,存在计算量大、耗时长的问题<sup>[20-21]</sup>。本文基于部分相干光的伪模分解理论<sup>[22-23]</sup>和相干光的衍射传输算法,建立了快速计算部分相干光通过成像型微透镜阵列匀化系统的数值模型;通过系统参数设计,获得边缘锐利、高度均匀的方形光束,并针对微透镜阵列实际装调过程中存在的偏心、倾斜现象,系统研究了其对光束匀化效果的影响,确定了装调公差范围,并通过实验对失调状态下匀化光束的分裂现象进行验证。

## 2 基本原理

## 2.1 大功率纳秒紫外激光光源

纳秒紫外多模激光可用准单色近似下的部分相干光表示,其交叉谱密度函数<sup>[20]</sup>为

$$W(r_1, r_2) = \sqrt{I(r_1) \cdot I(r_2)} \cdot \mu(r_1, r_2), \quad (1)$$

式中: $\mu(r_1, r_2)$ 为复空间相干度,常用各向同性的高斯-谢尔模型表示; $\sqrt{I(r_1) \cdot I(r_2)}$ 为部分相干光的空间强度分布。若采用准分子激光作为光源,其输出激光在短轴和长轴方向上的光束强度分别呈高斯和近平顶分布,且短轴的空间相干性较强。利用分离变量方法,准分子激光的交叉谱密度在短轴方向上用  $W(x_1, x_2) = \exp\left[-\frac{x_1^2 + x_2^2}{\omega_x^2}\right] \cdot \exp\left[\frac{(x_1 - x_2)^2}{2\sigma_x^2}\right]$  表示,在长轴方

收稿日期: 2022-12-05; 修回日期: 2023-01-04; 录用日期: 2023-02-03; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3602600)

通信作者: \*zs040148@163.com

向上用  $W(y_1, y_2) = \exp\left[-\frac{(y_1^2)^{N_s} + (y_2^2)^{N_s}}{(\omega_y^2)^{N_s}}\right]$  表示, 其中  $\sigma_x, \sigma_y$  和  $\omega_x, \omega_y$  分别为空间相干长度和束腰宽度,  $N_s \geq 2$  为超高斯函数的阶数。

基于伪模分解理论<sup>[22-23]</sup>, 部分相干光的交叉谱密度函数可用多个相互独立的完全相干模的叠加表示, 模式的振幅和相位随机波动, 各模式间没有确定的关系, 此时交叉谱密度函数可表示为

$$W(r_1, r_2) = \int \rho(\nu) H^*(r_1, \nu) H(r_2, \nu) d^2\nu, \quad (2)$$

式中:  $\rho(\nu)$  为非负函数, 表示各模权重;  $H(r_j, \nu)$  为任意函数, 表示分解的相干模;  $r_j$  为空间坐标;  $\nu$  为倒易空间坐标。对于复空间相干度  $\mu$  呈高斯分布的部分相干光, 交叉谱密度函数可用平面波展开<sup>[20]</sup>。对于准分子激光, 其短轴和长轴分别表示为

$$\begin{cases} \rho(k_x) = 2\pi\sigma_x^2 \exp(-2\pi^2\sigma_x^2 k_x^2) \\ H(x, k_x) = \exp\left[-\frac{x^2}{\omega_x^2}\right] \cdot \exp[-i2\pi x \cdot k_x] \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} \rho(k_y) = 2\pi\sigma_y^2 \exp(-2\pi^2\sigma_y^2 k_y^2) \\ H(y, k_y) = \exp\left[-\left(\frac{y^2}{\omega_y^2}\right)^{N_s}\right] \cdot \exp[-i2\pi y \cdot k_y] \end{cases}, \quad (4)$$

式中:  $k_x$  为  $x$  方向的平面波数;  $k_y$  为  $y$  方向的平面波数。为进行数值运算, 将式(3)和式(4)代入式(2)并写为离散形式, 则短轴和长轴方向光束的交叉谱密度函数为

$$W(x_1, x_2) = \sum_{m=1}^M \kappa_m H^*(x_1, \nu_m) H(x_2, \nu_m), \quad (5)$$

$$W(y_1, y_2) = \sum_{n=1}^N \kappa_n H^*(y_1, \nu_n) H(y_2, \nu_n), \quad (6)$$

式中:  $\kappa_m = \rho(\nu_{mx}) \Delta\nu_x$  和  $\kappa_n = \rho(\nu_{ny}) \Delta\nu_y$  为权重系数;  $\Delta\nu_x$  ( $\Delta\nu_y$ ) 为沿不同方向传播的平面波在  $x$  ( $y$ ) 方向上的离散间隔;  $M, N$  为分解的模式数。伪模表示的强度分布始终与原始的交叉谱密度函数相同, 但复空间相干度  $\mu(r_1, r_2)$  的重建与模式数有关。为得到正确的复空间相干度, 对于高斯-谢尔模光源<sup>[20]</sup>, 要求模式数  $N_{\min} \geq 10 \left[ 2.5\sqrt{2} + L/(2\sigma) \right] / (\sqrt{2}\pi)$ , 其中  $L$  为光束所在平面尺寸,  $\sigma$  为空间相干长度。表 1 展示了准分子激光 ( $\omega_x = 4 \text{ mm}$ 、 $\omega_y = 12 \text{ mm}$ 、 $N_s = 2$ ) 不同空间相干长度与最小模式数的关系, 其中计算平面尺寸为  $15 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ 。可以看到: 无论长轴还是短轴, 当空间相干长度较大时, 合成光束所需的模式数较少, 其光束特性接近完全相干光; 当空间相干长度较小时, 所需模式数增加, 其光束特性接近非相干光。图 1 给出了  $\sigma_x = 4 \text{ mm}$  和  $\sigma_y = 2 \text{ mm}$  时准分子激光的强度分布和伪模分解情况, 其中彩色曲线(虚线)表示各伪模强度, 黑色曲线(实线)表示伪模叠加的总强度。可以看到: 短轴光束中仅两个伪模占比较大, 模式成分简单, 空间相干度较高; 而长轴光束中各模均占一定比例, 模式成分复杂, 空间相干度较低。

表 1 空间相干长度与模式数的关系

Table 1 Relationship between spatial coherence length and mode number

$\sigma_x / \text{mm}$	$M$	$\sigma_y / \text{mm}$	$N$
4	12	2	28
0.4	50	0.2	205

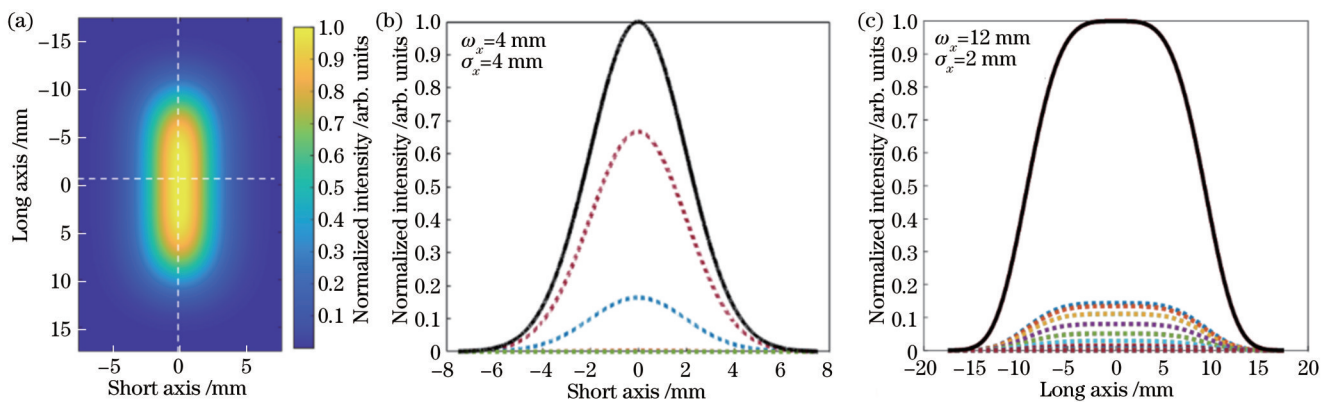


图 1 准分子激光强度分布及其伪模。(a) 截面图; (b) 短轴方向; (c) 长轴方向

Fig. 1 Excimer laser intensity distribution and its pseudo-mode representation. (a) Cross-sectional view; (b) short axis direction; (c) long axis direction

## 2.2 成像型微透镜阵列匀化技术原理

成像型微透镜阵列匀化系统由两个微透镜阵列和一个傅里叶透镜组成, 其匀化原理如图 2 所示。微透镜阵列 1 (MLA1) 将入射光束分割为多个细光束, 微透

镜阵列 2 (MLA2) 是系统的光瞳阵列, 细光束通过阵列 2 后经傅里叶透镜 (FL) 成像在焦面处并相互叠加, 每个细光束范围内的不均匀性被抹平, 从而得到均匀光束<sup>[12-16]</sup>。衍射型匀化系统仅有一个微透镜阵列, 输入

光束经 MLA1 分割后直接经 FL 叠加。相较于成像型系统,衍射型系统匀化光斑的均匀度更低,边缘陡度更小。在成像型匀化系统中,可通过调节两阵列的间距  $d_{12}$  在匀化面形成 MLA1 子孔径的实像,获得边缘非常

陡峭的均匀光束。常用单个子透镜的非涅耳数表征微透镜阵列匀化系统的衍射特性,衍射型系统仅适用于大非涅耳数系统的匀化,成像型系统则对非涅耳数变化不敏感,适用范围更广<sup>[12]</sup>。

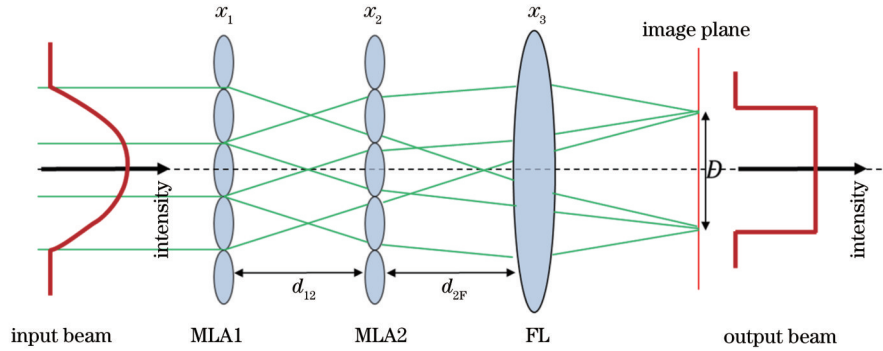


图 2 微透镜阵列匀化原理示意图

Fig. 2 Schematic of microlens array homogenization principle

为了分析微透镜阵列匀化过程中衍射和干涉效应对光束均匀性的影响,基于衍射传输角谱理论,推导成像型微透镜阵列的匀化过程。设入射光场的复振幅为  $E_0$ ,微透镜阵列 1 和 2 均由  $N$  个节距为  $p$  的子透镜组成,子透镜的焦距分别为  $f_{LA1}$  和  $f_{LA2}$ ,阵列间距为  $d_{12}$ ,阵列 2 与傅里叶透镜的间距为  $d_{2F}$ ,傅里叶透镜的焦距为  $f_{FL}$ 。以一维计算为例,入射光通过微透镜阵列 1 后的复振幅可表示为

$$E_1^+(x_1, z_1^+) = E_0(x_1, z_1^-) T_1(x_1), \quad (7)$$

式中:  $T_1(x_1) = \sum_{n=1}^N \delta(x_1 - np) \otimes \text{rect}(x_1, p) \times \exp[-ikx_1^2/(2f_{LA1})]$  为微透镜阵列 1 的透过率函数,其中  $\otimes$  为卷积符号,  $k$  为波数,  $\delta$  为均匀度。根据自由空间的角谱衍射公式,从微透镜阵列 1 后表面传输至阵列 2 前表面的光场可用傅里叶变换形式表示为

$$\mathcal{F}[E_2^-(x_2, z_2^-)] = \mathcal{F}[E_1^+(x_1, z_1^+)] H_1(f_x), \quad (8)$$

式中:  $\mathcal{F}$  表示傅里叶变换;  $H_1(f_x) = \exp(-i\pi\lambda d f_x^2)$  表示从阵列 1 到阵列 2 的传递函数,其中  $f_x$  为空间频率,  $d$  为传输距离。微透镜阵列 2 后表面的光场复振幅可表示为

$$E_2^+(x_2, z_2^+) = E_2^-(x_2, z_2^-) T_2(x_2), \quad (9)$$

式中:  $T_2(x_2) = \sum_{n=1}^N \delta(x_2 - np) \otimes \text{rect}(x_2, p) \times \exp[-ikx_2^2/(2f_{LA2})]$  表示微透镜阵列 2 的透过率函数。观察面位于傅里叶透镜后焦面,其复振幅分布正比于阵列 2 后表面光场的频谱,因为微透镜阵列 2 与傅里叶透镜的相对位置不影响后焦面复振幅分布,二者的间距可忽略,匀化光束的复振幅表示为

$$E_3(x_3, z_3) \propto \mathcal{F}[E_2^+(x_2, z_2^+)]. \quad (10)$$

根据几何光学传输矩阵计算得到匀化光束尺寸:

$$D = p \frac{f_{FL}(f_{LA1} + f_{LA2} - d_{12})}{f_{LA1} f_{LA2}}. \quad (11)$$

采用均方根(RMS)误差评价光束的均匀度,其计算公式为

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{(I_k - \bar{I})^2}{\bar{I}^2}}, \quad (12)$$

式中:  $I_k$  为匀化光束平顶部分的强度分布;  $K$  为采样数;  $\bar{I} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K I_k$  为平均光强。

采用归一化边缘强度从 90% 下降到 10% 相对于光束尺寸的变化率来评价光束的陡度,即

$$E_{TR} = \left| \frac{I_{up} - I_{down}}{r_{up} - r_{down}} \right|, \quad (13)$$

式中:  $I_{up}$  和  $I_{down}$  表示 90% 和 10% 的边缘强度;  $r_{up}$  和  $r_{down}$  为对应光束的尺寸。  $E_{TR}$  值越大,光束边缘强度衰减越快,轮廓越锐利。

## 3 仿真分析与实验

### 3.1 匀化系统参数研究

仿真分析 KrF 准分子激光匀化过程,激光波长  $\lambda = 248 \text{ nm}$ ,光束尺寸为  $8 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ ,对应的短轴束腰宽度  $\omega_x = 4 \text{ mm}$ ,长轴束腰宽度  $\omega_y = 12 \text{ mm}$ 。设短轴和长轴的全发散角分别为  $2\theta_x = 1 \text{ mrad}$  和  $2\theta_y = 3 \text{ mrad}$ ,根据文献<sup>[24]</sup>的理论近似公式,空间相干长度分别为  $\sigma_x = 0.3844 \text{ mm}$  和  $\sigma_y = 0.1281 \text{ mm}$ ,更精确的数值可通过实验方法测得<sup>[25]</sup>,本文取近似值  $\sigma_x = 0.4 \text{ mm}$  和  $\sigma_y = 0.2 \text{ mm}$ 。匀化系统的微透镜阵列一般采用熔融石英材料制作,熔融石英具有高透过率( $>90\%$ )、较高损伤阈值的特点,是目前大功率紫外激光应用的主要材料,如 Corning HPFS 7980 在 248 nm



波长的透过率高达 99.5%，Heraeus Suprasil-1 对 10 ns KrF 激光脉冲的损伤阈值约为 10 J/cm<sup>2</sup>。微透镜阵列 1 和 2 尺寸相同，长轴和短轴方向的子透镜数量分别为 15 和 35，节距  $p = 1$  mm，阵列 1 的子透镜焦距  $f_{LA1} = 15$  mm，阵列 2 的子透镜焦距  $f_{LA2} = 20$  mm，两阵列间距离  $d_{12} = 20$  mm，傅里叶透镜与阵列 2 的间距  $d_{2F}$  可任意设置而不影响光束分布，本实验令  $d_{2F} = 10$  mm，傅里叶透镜焦距  $f_{FL} = 100$  mm，匀化光斑尺寸

$D = 5$  mm。

图 3 所示为在焦面处得到的匀化光束结果，其在短轴和长轴方向上的均匀度分别为  $\delta_x = 5.63\%$  和  $\delta_y = 0.47\%$ ，边缘陡度为  $E_{TR-x} = 34.80$  mm<sup>-1</sup> 和  $E_{TR-y} = 12.95$  mm<sup>-1</sup>。对于空间相干度较高的短轴光束，多光束干涉效应更强，在匀化光束内形成了明显的干涉条纹，破坏光束的均匀分布；对于空间相干度较低的长轴光束，干涉效应可忽略，光束的均匀度更高，但陡度更小，不如短轴光束的边缘锐利。

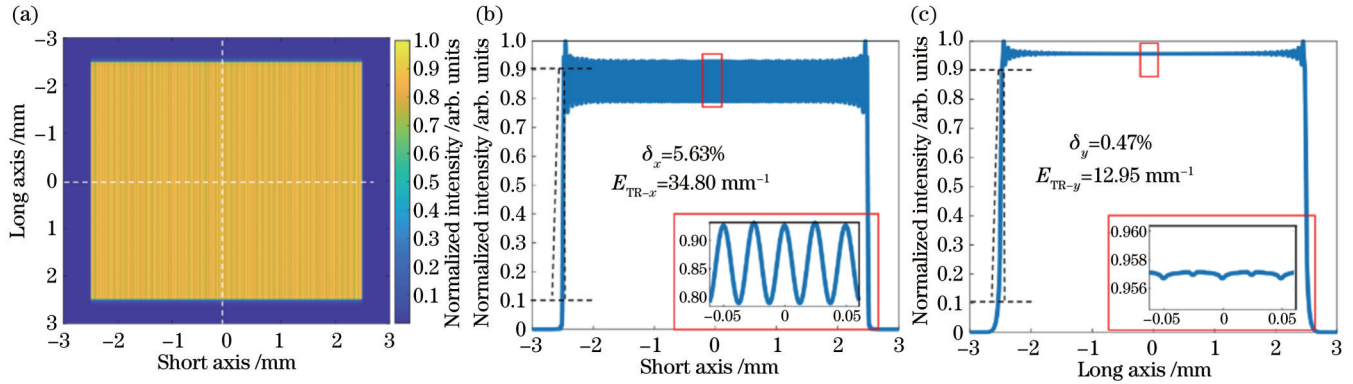


图 3 匀化光束的强度分布。(a)截面图；(b)短轴方向；(c)长轴方向

Fig. 3 Intensity distribution of the homogenized beam. (a) Cross-sectional view; (b) short axis direction; (c) long axis direction

为满足激光剥离、转移等实际加工需求，要求激光光束的设计均匀度小于 1.5%<sup>[17]</sup>，因此，考虑将匀化光束略微偏离焦点位置以降低多光束干涉效应的影响。由于离焦，干涉形成的离散小光斑将扩展成大光斑，这些大光斑相互交叠能够抹平光束的不均匀性。表 2 给出了离焦对匀化光束均匀度和陡度的影响，离焦量  $Z_{defocus}$  定义为沿着传输方向偏离焦点的距离，随着  $Z_{defocus}$  增加，短轴和长轴光束的均匀度表现不同：对于短轴，由于离散衍射光斑周期性交叠， $\delta_x$  呈非线性变化；对于长轴，光束均匀度几乎不受离焦量的影响。光束边缘陡度均随着离焦量的增加单调减小。因为实际加工时在均匀度达标的情况下希望光束陡度尽可能大，所以可将离焦量限制在 4 mm 的范围内。图 4 比较了  $Z_{defocus} = 1$  mm 和  $Z_{defocus} = 3$  mm 的匀化光束分布，可以看到，大离焦量下匀化光束边缘变得模糊，平顶部分尺寸减小。

进一步仿真发现，对于成像型微透镜阵列匀化装置，仅在特定阵列间距即  $d_{12} = f_{LA2}$  时可以获得边缘锐利的高均匀度光束，该结论不随子透镜焦距、节距的变化而改变，具有普适性。此时，匀化面形成 MLA1 子孔径的实像，MLA2 的子透镜起到类似场镜的作用，可将离轴主光线重新调整为沿光轴传播的光线。图 5 所示为在 15~25 mm 的阵列间距 ( $d_{12}$ ) 变化范围内得到的方形均匀光束，固定离焦量  $Z_{defocus} = 1$  mm，根据式 (11)，为保持光斑尺寸不变，在改变微透镜阵列间距时，需要相应调整傅里叶透镜焦距。将上述结果与

表 2 离焦对光束均匀度和陡度的影响

Table 2 Influence of defocus on uniformity and steepness of beam

$Z_{defocus} / \text{mm}$	$\delta_x / \%$	$E_{TR-x} / \text{mm}^{-1}$	$\delta_y / \%$	$E_{TR-y} / \text{mm}^{-1}$
1	0.17	13.22	0.05	3.76
2	0.52	6.99	0.05	2.19
3	0.58	4.72	0.05	1.54
4	0.42	3.81	0.08	1.17
5	5.58	3.00	0.03	0.95
6	0.20	2.51	0.06	0.80
7	0.28	2.11	0.04	0.69
8	5.53	1.91	0.04	0.63
9	0.23	1.71	0.05	0.54
10	0.20	1.56	0.05	0.50

图 4(a) 所示的  $d_{12} = f_{LA2} = 20$  mm 的结果进行比较，可以看到，当阵列间距  $d_{12} \neq f_{LA2}$  时，长轴和短轴匀化光束的均匀度和陡度显著降低，呈现边缘振荡且模糊的光束分布。

### 3.2 微透镜阵列失调影响

3.1 节对微透镜阵列匀化系统处于理想情况下的输出光束分布进行了讨论，但在实际装调过程中，光学系统内始终伴随着元件倾斜、非中心对准等失调情况。对于成像型微透镜阵列匀化装置，主要考虑微透镜阵列间的相对失调，如图 6 所示，微透镜阵列 1 发生倾斜和偏心，倾斜量用相对理想位置旋转的角度  $\Delta\theta$  表示，偏心量用相对中心光轴平移的距离  $\Delta d$  表示，失调将导

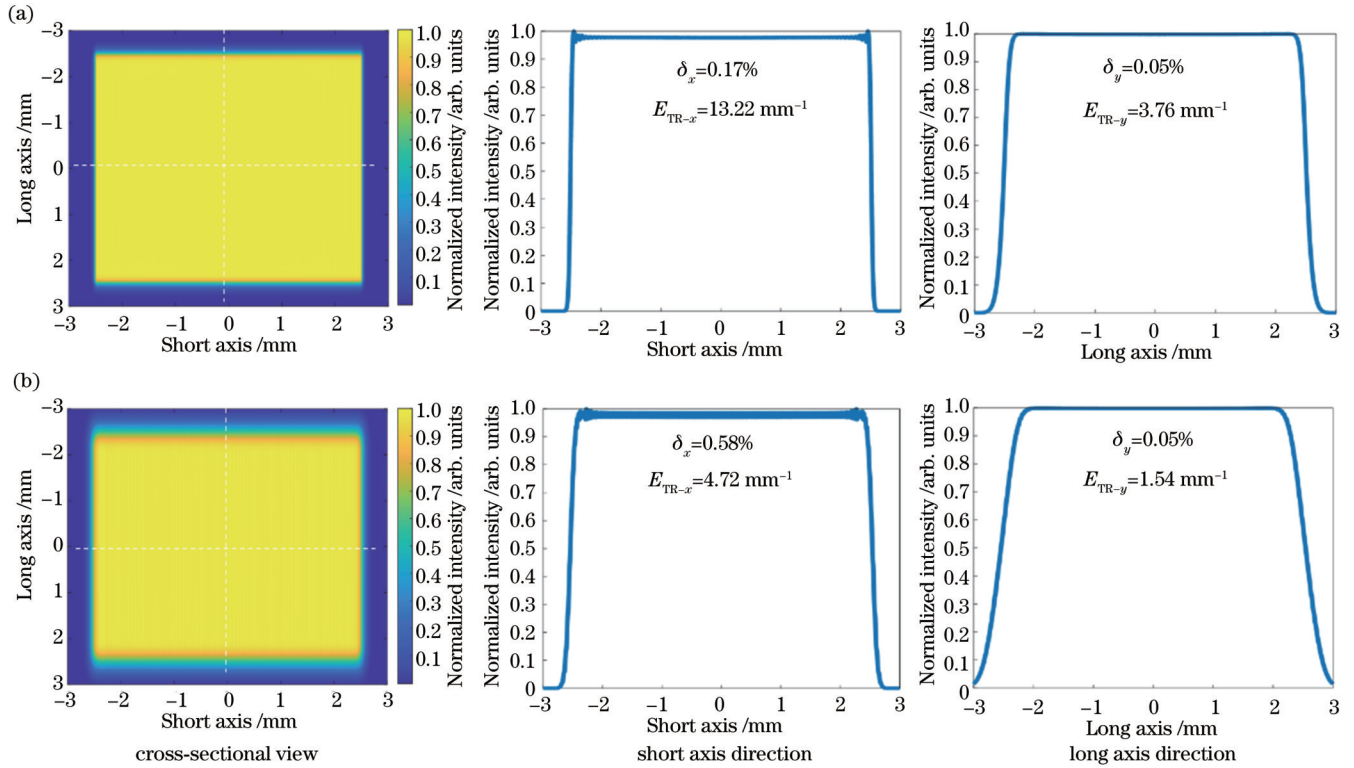


图 4 不同离焦下匀化光束的强度分布。(a)  $Z_{\text{defocus}} = 1 \text{ mm}$ ; (b)  $Z_{\text{defocus}} = 3 \text{ mm}$   
 Fig. 4 Intensity distribution of the homogenized beam at different defocus. (a)  $Z_{\text{defocus}} = 1 \text{ mm}$ ; (b)  $Z_{\text{defocus}} = 3 \text{ mm}$

致阵列 2 和 1 的子透镜不再一一对应, 从而影响子光束叠加, 降低光束的均匀性。

针对图 4(a) 所示的方形高均匀性光束产生装置, 研究不同偏心和倾斜情况下匀化光束的变化。假设长轴和短轴方向的失调量相同, 即  $\Delta d_x = \Delta d_y = \Delta d$ ,  $\Delta \theta_x = \Delta \theta_y = \Delta \theta$ , 仿真结果如图 7 所示, 其中虚线框表示无失调时匀化光束的位置。从图 7(a) 可以看到: 仅存在偏心时, 随着偏移距离  $\Delta d$  增加, 匀化光束的位置相较于原始光束向左上方移动, 边缘振荡效应逐渐增强并向内部扩展, 分析认为其来源于子光束的不完全叠加; 当  $\Delta d = 0.4 \text{ mm}$  时, 匀化光束分裂为多个光斑, 这是因为阵列 1 子透镜分割的子光束没有完全进入阵列 2 对应的子孔径内, 而是泄漏一部分能量到相邻子孔径并形成多个衍射光斑。当单独存在倾斜时, 在  $\Delta \theta \leq 1^\circ$  的小角度范围内, 随着倾斜角度增大, 匀化光束边缘振荡增强并伴有分裂趋势, 但光束位置不发生改变。在倾斜和偏心共同存在的情况下, 失调影响成倍增加, 即使偏移量和角度较小, 如  $\Delta d = 0.2 \text{ mm}$ ,  $\Delta \theta = 0.5^\circ$ , 光束也已发生分裂; 当失调量增加至  $\Delta d = 0.4 \text{ mm}$ ,  $\Delta \theta = 1^\circ$  时, 光束从分裂状态恢复为一个均匀光束, 且位于原始光束的右下方, 这是由微透镜阵列的周期结构造成的, 因为此时源自阵列 1 的子光束几乎完全进入阵列 2 对应子孔径的相邻孔径内, 每个子光束错开一个周期叠加而不影响匀化效果。需要注意的是, 实际装调过程并

不允许此种特殊情况出现, 因此, 失调量应控制在一个合理的范围内。

表 3 给出了匀化光束不发生分裂的小失调量情况下偏心和倾斜对光束均匀度的影响。可以看到, 在  $\Delta d \leq 0.2 \text{ mm}$  且  $\Delta \theta \leq 0.2^\circ$  的范围内, 无论长轴还是短轴光束, 均匀度都满足小于 1.5% 的精密加工要求。因此, 对于所采用的双微透镜阵列, 总的装调公差应限制在  $\Delta d \leq 0.2 \text{ mm}$  且  $\Delta \theta \leq 0.2^\circ$ 。

表 3 偏心和倾斜对光束均匀度的影响  
 Table 3 Influence of decenter and tilt on beam uniformity

$\Delta d / \text{mm}$	$\Delta \theta / (^\circ)$	$\delta_x / \%$	$\delta_y / \%$
0.1	0.1	0.38	0.05
	0.2	0.47	0.06
	0.3	0.65	0.07
	0.4	0.86	0.10
	0.5	1.21	0.36
	0.6	1.97	1.05
0.2	0.1	0.85	0.09
	0.2	1.14	0.29
0.3	0.3	1.79	0.94
	0.1	3.64	2.24

### 3.3 实验验证

实验搭建了上述匀化系统, 其输入激光参数和微透镜阵列参数与前文相同, 微透镜阵列采用透过率大

于 90% 的熔融石英制造, 通过光敏纸记录匀化光斑的强度分布。图 8 给出了不同离焦情况下微透镜阵列未严格对准时匀化光斑照射光敏纸后留下的图案, 可以看到, 在匀化光斑右侧和上侧均出现分裂光束, 分别距右边缘和上边缘约一个匀化光斑尺寸的距离,

这是由于子光束进入相邻子孔径所致。此外, 随着离焦量增加, 匀化光束的尺寸逐渐增大, 锐利的正方形轮廓边缘逐渐模糊, 四角逐渐圆化, 这是由离焦量增加导致边缘陡度下降所致, 分裂光束的强度也随着光束尺寸增大而逐渐减小, 在离焦  $Z_{\text{defocus}} = 10 \text{ mm}$  时, 上侧

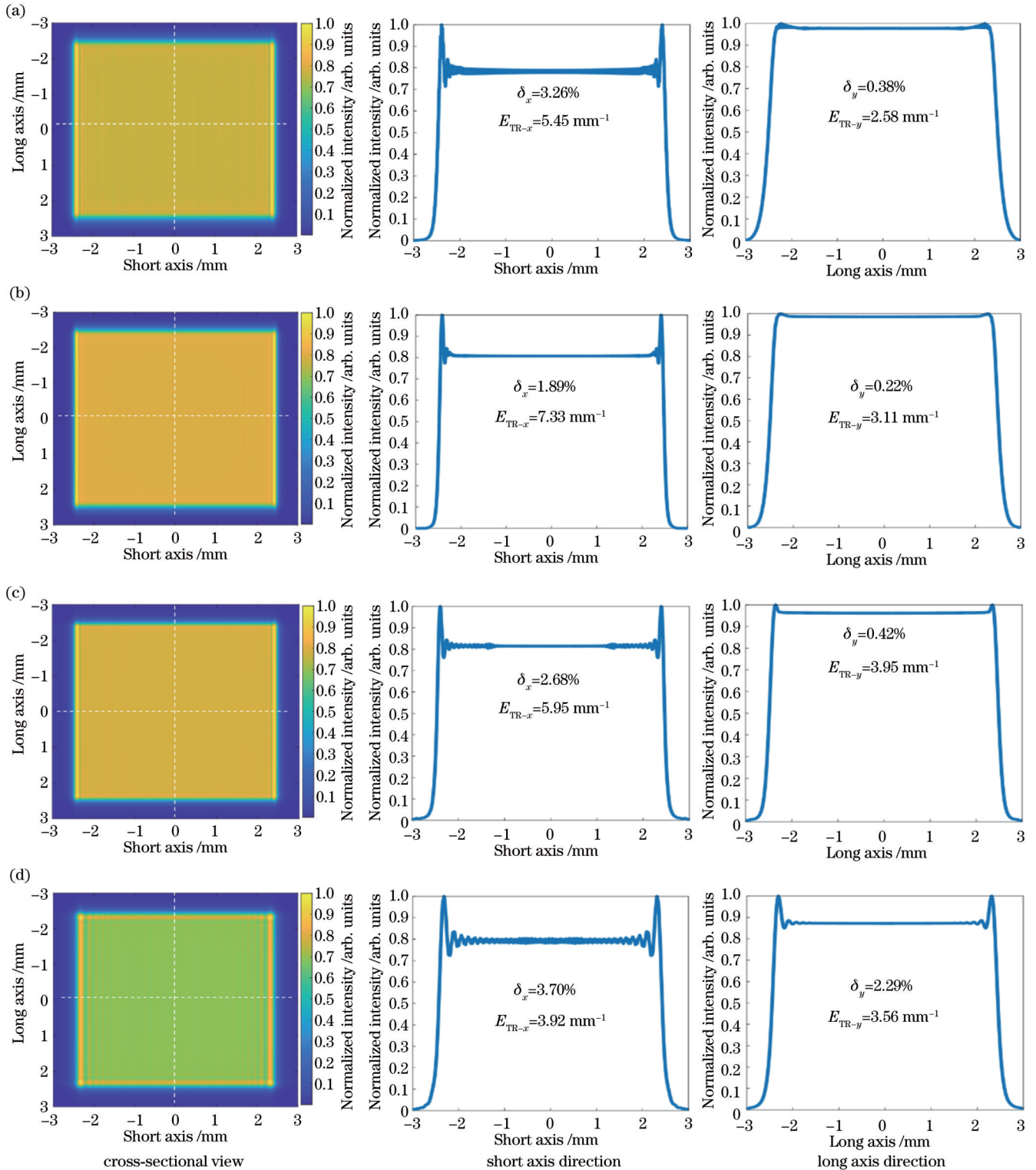


图 5 不同阵列间距下匀化光束的强度分布。(a)  $d_{12} = 15 \text{ mm}$ ; (b)  $d_{12} = 17.5 \text{ mm}$ ; (c)  $d_{12} = 22.5 \text{ mm}$ ; (d)  $d_{12} = 25 \text{ mm}$

Fig. 5 Intensity distribution of the homogenized beam at different array spacings. (a)  $d_{12} = 15 \text{ mm}$ ; (b)  $d_{12} = 17.5 \text{ mm}$ ; (c)  $d_{12} = 22.5 \text{ mm}$ ; (d)  $d_{12} = 25 \text{ mm}$



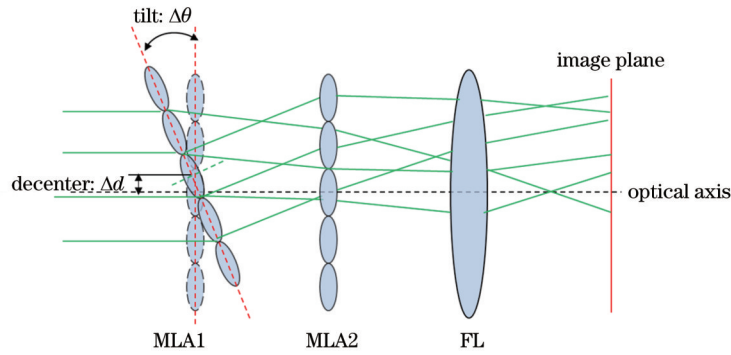


图 6 微透镜阵列匀化系统失调示意图

Fig. 6 Schematic of misalignment for microlens array homogenization system

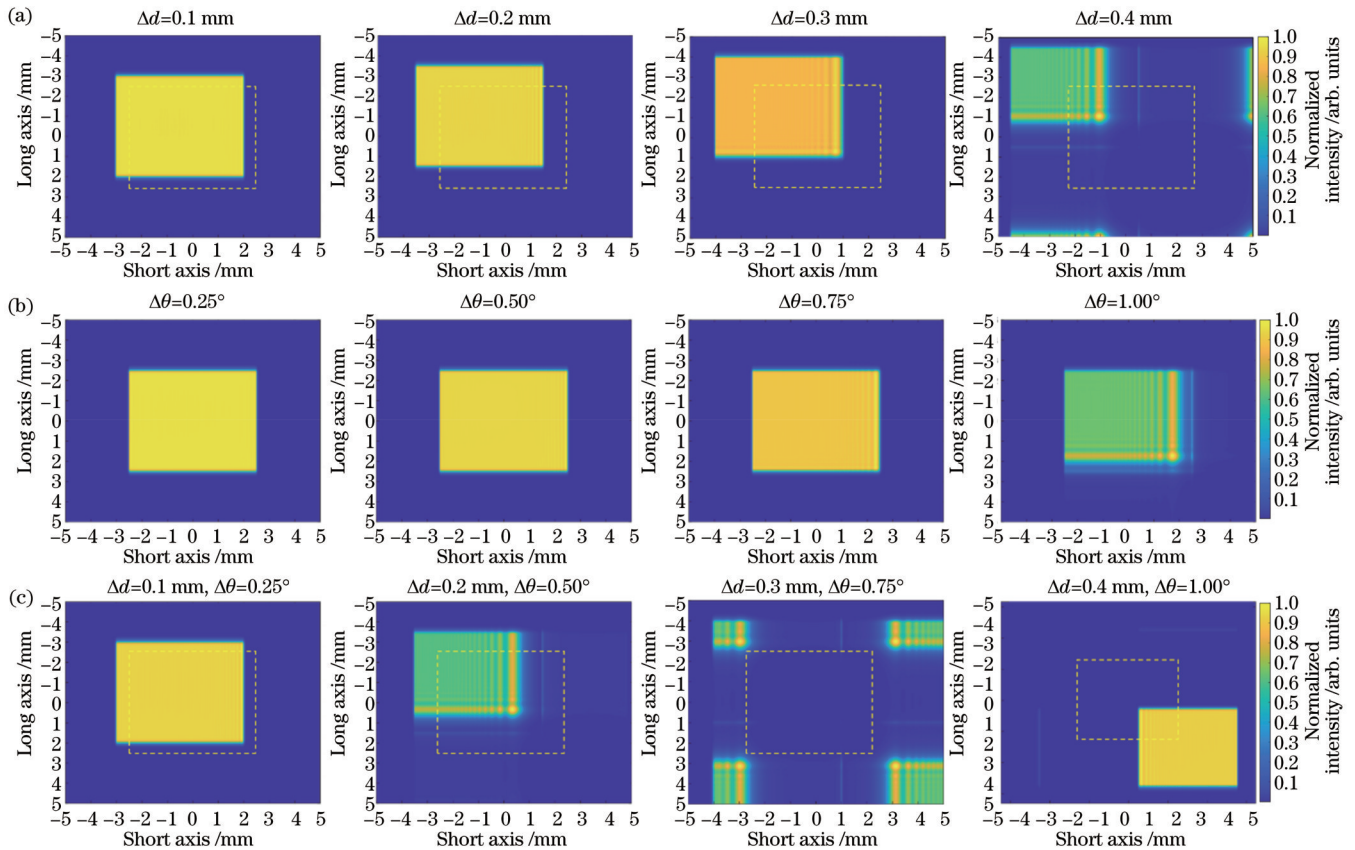


图 7 不同失调情况下匀化光束的强度分布。(a)偏心;(b)倾斜;(c)偏心和倾斜

Fig. 7 Intensity distribution of homogenized beam at different misalignments. (a) Decenter; (b) tilt; (c) decenter and tilt

分裂光束的强度仅在光敏纸上留下微弱反应。仿真发现,该实验结果与偏心量  $\Delta d_x = 0.32 \text{ mm}$ 、 $\Delta d_y = -0.32 \text{ mm}$  的理论模拟结果一致,对应匀化光束恰好处于分裂的状态,且实际激光器输出激光在短轴方向的空间相干性相比理论模型更低,使得与其关联的干涉和衍射效应较弱,导致实验光斑分布和均匀度不随离焦量增加发生明显变化,与 3.1 节长轴离焦变化趋势相同。该实验证明了理论设计的可靠性和参数影响分析的准确性,并为辅助后续匀化系统装调提供了参考。

## 4 结 论

针对大功率纳秒紫外激光匀化技术,基于伪模分解和角谱衍射理论设计了成像型微透镜阵列匀化系统,详细研究了部分相干光入射下衍射和干涉效应对光束匀化效果的影响。结果表明,空间相干度是光束匀化效果的重要影响参数,对于短轴和长轴空间相干长度分别为  $\sigma_x = 0.4 \text{ mm}$  和  $\sigma_y = 0.2 \text{ mm}$  的准分子激光,仿真发现,短轴均匀度与系统参数紧密相关,可通过离焦量、阵列间距调节,但长轴均匀度则不受影响。令阵列间距等于微透镜阵列 2 的子透镜

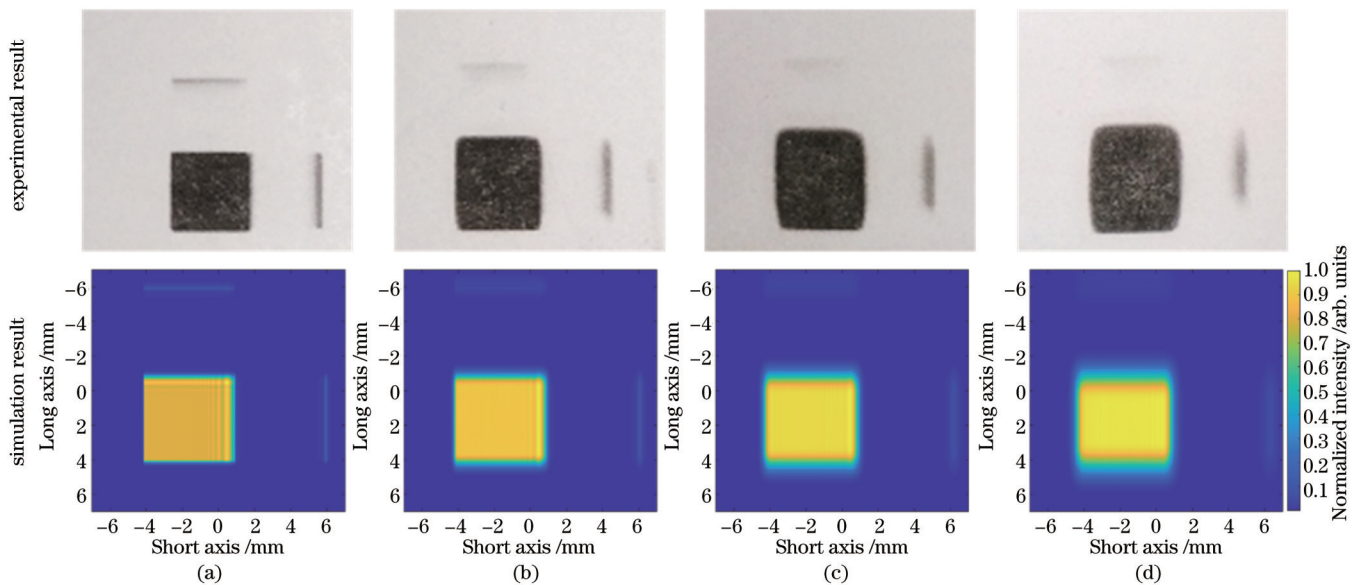


图 8 不同离焦量下微透镜阵列失调的实验结果及其对应的仿真结果。(a)  $Z_{\text{defocus}} = 1 \text{ mm}$ ; (b)  $Z_{\text{defocus}} = 4 \text{ mm}$ ; (c)  $Z_{\text{defocus}} = 7 \text{ mm}$ ; (d)  $Z_{\text{defocus}} = 10 \text{ mm}$

Fig. 8 Experimental results and corresponding simulation results for misaligned microlens arrays at different defocus distances.

(a)  $Z_{\text{defocus}} = 1 \text{ mm}$ ; (b)  $Z_{\text{defocus}} = 4 \text{ mm}$ ; (c)  $Z_{\text{defocus}} = 7 \text{ mm}$ ; (d)  $Z_{\text{defocus}} = 10 \text{ mm}$

焦距是实现高均匀度光束输出的必要条件,且此时光束边缘最锐利。在本设计案例中,所得均匀方形光束短轴方向的均匀度最高可达 0.17%,边缘陡度最大可达  $13.22 \text{ mm}^{-1}$ 。此外,对实际装调过程中微透镜阵列可能存在的偏心和倾斜现象进行详细讨论,分析各失调量对匀化光束形貌和均匀度的影响,并通过实验说明了理论设计的可靠性和参数影响分析的准确性。

#### 参 考 文 献

- Delmdahl R, Pätzel R, Brune J, et al. Line beam processing for laser lift-off of GaN from sapphire[J]. *Physica Status Solidi A*, 2012, 209(12): 2653-2658.
- 季凌飞, 马瑞, 张熙民, 等. 激光剥离技术在柔性电子制造领域的应用研究进展[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0100001. Ji L F, Ma R, Zhang X M, et al. Application of laser lift-off technique in flexible electronics manufacturing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0100001.
- Delmdahl R, Fricke M, Fechner B. Laser lift-off systems for flexible-display production[J]. *Journal of Information Display*, 2014, 15(1): 1-4.
- 尹广玥, 游利兵, 方晓东. 用于平板显示 LTPS 制备的 ELA 光束整形系统[J]. *激光技术*, 2016, 40(3): 383-387. Yin G Y, You L B, Fang X D. ELA-beam shaping systems for flat panel display prepared by LTPS[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(3): 383-387.
- Kim J, Kim J H, Cho S H, et al. Selective lift-off of GaN light-emitting diode from a sapphire substrate using 266-nm diode-pumped solid-state laser irradiation[J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(4): 305.
- 孙宁宁, 杨彪, 陈福荣, 等. 激光辅助 MicroLED 巨量转移技术进展[J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(4): 513-528. Sun N N, Yang B, Chen F R, et al. Advances in laser-assisted mass transfer of MicroLED[J]. *Scientia Sinica: Technologica*, 2022, 52(4): 513-528.
- 王海林, 董静, 刘贺言, 等. 高功率超快碟片激光技术研究进展[J]. *光子学报*, 2021, 50(8): 0850208. Wang H L, Dong J, Liu H Y, et al. Research progress of high-power ultrafast thin-disk laser technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(8): 0850208.
- 李红霞, 楼祺洪, 董景星, 等. 一种改善准分子激光光束均匀性的新型匀化器[J]. *中国激光*, 2004, 31(7): 785-788. Li H X, Lou Q H, Dong J X, et al. A novel homogenizer to improve the excimer laser beam uniformity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(7): 785-788.
- McBride R, Trela-McDonald N, Currie M O, et al. Beamshaping for high-power lasers using freeform refractive optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8963: 89630C.
- Liu J, Caley A, Taghizadeh M. Symmetrical iterative Fourier-transform algorithm using both phase and amplitude freedoms[J]. *Optics Communications*, 2006, 267(2): 347-355.
- 孟晶晶, 余锦, 貂泽强, 等. 光束积分激光空间整形技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(13): 130002. Meng J J, Yu J, Mo Z Q, et al. Laser space shaping based on beam integration[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(13): 130002.
- Zimmermann M, Lindlein N, Voelkel R, et al. Microlens laser beam homogenizer: from theory to application[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6663: 666302.
- Bich A, Rieck J, Dumouchel C, et al. Multifunctional micro-optical elements for laser beam homogenizing and beam shaping [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6879: 68790Q.
- 黄峰, 贾文武, 汪岳峰, 等. 多孔径光束积分激光匀束器理论与设计[J]. *激光与红外*, 2010, 40(1): 44-47. Huang F, Jia W W, Wang Y F, et al. Theory and design of laser beam homogenizer based on multi-aperture beam integrator [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(1): 44-47.
- Zhou A F. UV excimer laser beam homogenization for micromachining applications[J]. *Optics and Photonics Letters*, 2011, 4(2): 75-81.
- Jin Y H, Zhao Y, Jiang Y J. Microlens beam homogenizer for excimer laser processing[J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, 28(2): 022601.
- Jin Y H, Hassan A, Jiang Y J. Freeform microlens array



- homogenizer for excimer laser beam shaping[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 2486-24858.
- [18] Wang Z X, Zhu G Z, Huang Y, et al. Analytical model of microlens array system homogenizer[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 75: 214-220.
- [19] Voelkel R, Weible K J. Laser beam homogenizing: limitations and constraints[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7102: 71020J.
- [20] Wang F, Lü H, Chen Y H, et al. Three modal decompositions of Gaussian Schell-model sources: comparative analysis[J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 29676-29689.
- [21] Smith A, Dainty C. Numerical modeling of spatial coherence using the elementary function method[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(12): 2815-2827.
- [22] Gori F, Santarsiero M. Devising genuine spatial correlation functions[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(24): 3531-3533.
- [23] Martínez-Herrero R, Mejías P M, Gori F. Genuine cross-spectral densities and pseudo-modal expansions[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(9): 1399-1401.
- [24] Kawata S, Hikima I, Ichihara Y, et al. Spatial coherence of KrF excimer lasers[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(3): 387-396.
- [25] Smith A, Burvall A, Dainty C. Partial spatial coherence in an excimer-laser lithographic imaging system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7640: 764029.

## UV Laser Homogenization Technology Based on Microlens Array

Zheng Xin, Dai Shenyu, Zhang Yuying, Zhao Shuai\*

*Optoelectronics Science and Technology Research Department, Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, Guangdong, China*

### Abstract

**Objective** High-power nanosecond ultraviolet (UV) lasers have been widely applied in laser lift-off, laser annealing, laser transfer, and other fields, but their output is usually partially coherent light with nonuniform intensity distribution. To meet the high requirements of beam uniformity for precision machining, a homogenizer with microlens arrays is proposed. The microlens array homogenization technology based on the principle of beam splitting and superposition has attracted extensive attention due to its advantages of high energy utilization, insensitivity to wavelength, and good availability of unstable multimode beams. However, the current research on the homogenization technology of microlens arrays mostly adopts the ray tracing method of geometric optics, ignoring the diffraction effects that seriously affect the performance of homogenized beams, such as multi-beam interference and the finite aperture effect. Therefore, we design the microlens array homogenizer following the partially coherent diffraction principle and perform the quantization analysis of the influence of homogenizer parameters on the performance of output laser beams.

**Methods** Partially coherent light can be described by the cross-spectral density function (CSD), but direct application of CSD to the simulation involves quadruple integral calculation, which takes a long time. Therefore, the pseudo-mode representation of CSD is used to simplify the numerical process and reduce computational time. By combining the pseudo-mode representation of partially coherent light and coherent light diffraction theory, we build a numerical simulation model of a microlens array homogenizer for high-power UV lasers and quantitatively analyze the parameters of the homogenizer. Specifically, an excimer laser source with different spatial coherence along the horizontal (short axis) and vertical (long axis) directions is represented as an incoherent superposition of mutually uncorrelated pseudo-modes, *i. e.*, the coherent plane-wave modes obtained from the Gaussian Schell-model (GSM). Then, the diffraction field of each mode passing through the microlens array homogenizer is calculated according to the angular spectrum diffraction theory and superimposed to achieve a uniform output laser beam. Moreover, the influence of parameters such as laser coherence, defocus, array spacing, and misalignment on the uniformity and edge steepness of output laser beams is discussed comprehensively. Through the simulation optimization, a high-quality microlens array homogenizer is provided, which can output a sharp square laser beam with uniformity of less than 1.5%. At the same time, the reliability of the theoretical design and the accuracy of parameter impact analysis are verified by experiments.

**Results and Discussions** Firstly, the intensity distributions of excimer laser-homogenized beams on different axes (Fig. 1) are compared, and it is found that for short-axis beams with high spatial coherence, the multi-beam interference effect is stronger, which can produce obvious interference fringes and results in a decrease in beam uniformity. For long-axis beams with low spatial coherence, the beam uniformity is higher due to negligible interference effects, and the beam edges are not as sharp as short-axis beams. To meet the precision machining requirements of beam uniformity less than 1.5%, the method of increasing the defocus distance is used to reduce the effect of interference on the homogenized beam so that the short-axis uniformity is reduced from 5.3% to 0.17% (Table 1). The reason is that the size of discrete spots

formed by interference becomes larger with the increase in defocus distance, and these spots overlap each other to smooth the periodic oscillation of the homogenized beam. In addition, simulations show that the sharpest-edged homogenized beam can only be obtained when the spacing between two microlens arrays is equal to the focal length of the second lens (Fig. 5). Furthermore, the condition of microlens array misalignment is discussed (Fig. 7). When the decenter or tilt is small, the oscillation effect of the homogenized beam is gradually enhanced as the decenter or tilt increases owing to the incomplete superposition of sub-beams from the microlens array. When the decenter or tilt increases to a large value, such as a decenter equal to 0.4 mm, the homogenized beam will split into multiple beams due to the energy leakage of the adjacent sub-apertures of the microlens array. If both decenter and tilt exist, the effect of misalignment will be intensified, which makes it easier for the beam to split. However, due to the periodic structure of the microlens array, as the misalignment continues to grow, the output homogenized beam returns from the split state to the single-beam state, and the superimposed sub-beams are staggered by exactly one array period. Finally, the phenomenon of the homogenized beam splitting in the case of microlens array misalignment is observed experimentally (Fig. 8). The change of the uniform beam with increasing defocus distance is consistent with the theoretical analysis results, which illustrates the reliability of the theoretical design method and the accuracy of the parameter analysis.

**Conclusions** In this paper, the research on UV laser homogenization technology based on microlens arrays is carried out. Specifically, the pseudo-mode decomposition theory and the angular spectrum diffraction transmission algorithm are employed to build a numerical model for fast calculation of partially coherent light passing through the microlens array homogenizer, and an excimer laser is used as a simulated light source. Through the analysis of parameters such as defocus and array spacing, the optimal design parameters are determined, and the square beams with sharp edges and high uniformity are realized. Then, the influence of microlens array misalignment on the beam profile and uniformity is discussed in detail, which provides a reference for setting the assembly tolerance of the homogenization system. In addition, the reliability of the theoretical design and the accuracy of the parameter impact analysis are demonstrated through experiments.

**Key words** laser optics; ultraviolet laser; partially coherent light; laser homogenization; microlens array; misalignment