

文章编号: 0258-7025(2007)03-0331-06

焦斑可调的透镜阵列均匀辐照光学系统

郑建洲^{1,2}, 于清旭¹, 卢永军², 关寿华^{1,2}

(¹ 大连理工大学物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116024; ² 大连民族学院理学院, 辽宁 大连 116600)

摘要 提出用两组透镜阵列与非球面透镜组成焦斑可调的均匀辐照光学系统, 可实现靶面光斑尺寸在几微米到几毫米的范围内连续可调, 并且能将圆形入射激光束变换为方形均匀焦斑, 同时满足二维激光光束形状的改变和强度空间分布均匀化的要求。应用矩阵光学、衍射积分理论, 详细分析了它的工作原理, 给出了系统优化设计参数和详细的数值计算结果。模拟计算结果表明, 当靶面离焦量为 $\Delta z = 2$ mm 时, x, y 方向平顶区的不均匀度分别为 $\eta_x = 4.6\%$, $\eta_y = 5.3\%$, 能量利用率达到 95.3%, 基本上达到了设计要求。Zemax 光学设计软件的仿真实验测试结果与理论分析结果吻合得很好。

关键词 光学设计; 焦斑可控系统; 透镜阵列; 均匀辐照; Zemax 光学设计软件

中图分类号 O 439 **文献标识码** A

Improved Lens Arrays Optical System with Controllable Focus Width for Uniform Irradiation

ZHENG Jian-zhou^{1,2}, YU Qing-xu¹, LU Yong-jun², GUAN Shou-hua^{1,2}

(¹ School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)
(² School of Science, Dalian Nationalities University, Dalian, Liaoning 116600, China)

Abstract A novel lens arrays optical system with continuously variable focus width from several microns to several millimeters for providing uniform irradiation is proposed, which is composed of two lens arrays and an aspherical lens, and the system converts a circular laser beam into a flat-top square focused spot, which realizes the transformation of beam-shape and the uniform distribution of the spatial intensity at the same time. Based on the adaxial matrix optics and scalar quantity diffraction integral theory, the principle of this system is analyzed, and optimum design of the system parameters and numerical calculations for this system are presented in detail. The simulated results show that the nonuniformity along the x and y direction are $\eta_x = 4.6\%$, $\eta_y = 5.3\%$ respectively, the energy efficiency can be up to 95.3%, and by moving the target slightly backward from the focal plane, off-focus length $\Delta z = 2$ mm is obtained, which nearly satisfies the need. The theoretical analysis agrees with the results of the emulational experiment with Zemax optical design software.

Key words optical design; controllable focus width; lens array; uniform irradiation; Zemax optical design software

1 引言

在强激光的一些实际应用中, 例如在惯性约束聚变(ICF)、激光等离子体相互作用和 X 射线产生等实验研究中, 常要求将入射激光整形为某种特定空间分布光束, 对靶进行辐照, 而且对辐照均匀性有相当高的要求。十几年来, 提出了多种改善均匀性

的技术和方法, 使激光束在靶面上的辐照均匀性大为提高^[1~7]。其中 Ximing Deng 等^[1]提出的阵列透镜均匀照明系统, 能够显著地改善靶面辐照的均匀性, 并且基本上不受激光近场分布的影响。然而一些实验, 例如高压状态方程和冲击波实验, 都要求从几百微米到几毫米范围的可控的二维激光光斑尺寸

收稿日期: 2006-05-09; 收到修改稿日期: 2006-10-08

作者简介: 郑建洲(1960—), 男, 河南桐柏人, 博士研究生, 副教授, 主要从事激光的传输与控制及靶面均匀辐照的研究工作。E-mail: zjz@dlnu.edu.cn

导师简介: 于清旭(1955—), 教授, 博士生导师, 主要从事激光器件、红外激光光谱学以及光纤传感技术研究。E-mail: yuqx@dlut.edu.cn

均匀辐照在靶面上。而阵列透镜均匀照明系统的不断完善之处是焦斑尺寸固定而不可调节,当实验要求焦斑尺寸变化时,只能更换整个光学系统,应用起来既不方便,又增加了成本。为了克服这一不足,本文提出一种兼有两者优点的新方案——用两组透镜阵列和非球面透镜组成的焦斑尺寸连续可调的均匀点聚焦光学系统。基于旁轴矩阵光学、标量衍射积分理论,详细分析了该系统的工作原理与焦斑光强分布特性。计算表明,只要适当选择系统参数,焦斑尺寸可在几微米到几毫米的范围内连续可调,它能在有效利用入射光束能量的情况下,可使光强分布均匀,并且焦斑的位置、光束入射角等保持不变。

2 设计原理

可变焦的透镜阵列系统原理结构如图 1 所示,其中, A_1, A_2 分别为两组透镜阵列, L 为非球面透镜,其焦距为 f 。 f_m 为 A_1, A_2 对应的第 m 单元组合透镜焦距。两组透镜阵列单元总数均为 $N \times N$, 并且设 N 为奇数。 A_1, A_2 间的距离为 S_1 , A_2 与 L 间的距离为 S_2 。靶面上焦斑的形状取决于透镜阵列单元的形状,若透镜阵列单元边界形状为圆形,则得到圆的焦斑,若透镜阵列单元边界形状为正六边形,则得到正六角形的焦斑,若透镜阵列单元边界形状为正方形,则得到正方形的焦斑。设计中把 A_1, A_2 的每个单元边界形状做成正方形,其优点是可使各透镜阵列单元边缘损失的光通量少,而且容易加工拼接。设

阵列单元的边长均为 d , 则

$$d = D/N, \quad (1)$$

式中 D 为入射激光束的口径, N 为透镜阵列水平方向单元数。 A_1 与 A_2 几何位置是相对应的。 A_1 各单元凸透镜的焦距均相等且均为 $f_1 > 0$, A_2 各单元凹透镜的焦距均相等且均为 $f_2 < 0$ 。可变焦的透镜阵列均匀照明系统能获得均匀点聚焦的原理是,入射光通过两组透镜阵列系统后,被分割成 $N \times N$ 个方形子光束,经过非球面透镜 L 的聚焦后,在非球面透镜的后焦面上各子束彼此重合叠加,虽然每束子光单独产生的焦斑强度分布不一定均匀,但所有 N^2 个子束叠加在一起,就可使入射光束近场分布的不均匀性相互平均补偿,入射激光束的空间不均匀性大大降低,得到接近平顶分布的无旁瓣的方形焦斑。原则上, N 越大,束匀化效果越好。

系统的可变焦原理分析。设计时取参数:入射光束直径为 $D = 180 \text{ mm}$, $N = 7$, $d = 26 \text{ mm}$, $f_1 = 2000 \text{ mm}$, $f_2 = -1600 \text{ mm}$, f 分别为 200 mm , 400 mm , 600 mm , 800 mm 时,焦斑宽度 l 随 S_1 变化的关系如图 2 所示,几何光学的计算结果与 Zemax 光学设计软件的计算结果完全一致。设 x, y 方向上的焦斑宽度为 l_x, l_y , 由矩阵光学可得

$$f_m = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - S_1}, \quad (2)$$

$$l_x = l_y = \left| \frac{-df}{f_m} \right| = \left| \frac{f(S_1 - f_1 - f_2)d}{f_1 f_2} \right|, \quad (3)$$

从(3)式和图 2 知,焦斑宽度 l 随 S_1 和 f 变化而连续变化。可见该系统的优点是保持 A_2 与 L 间的距离 S_2 和主聚焦透镜焦距 f 不变,只需使 A_1 沿着光轴自由移动,则焦斑宽度 l 随着 S_1 连续变化而变化,而且它们之间是简单的线性变化关系,且焦斑光强分布基本保持不变。为了使各个子束都能通过 A_2 , 应使 $f_1 > 0$, 而且 A_1 的焦距 f_1 应较大,同时系统中各参数除要满足(3)式外,还应避免光路中光束过度汇聚,打坏光学元件。可见,当 S_1 在 $0 \sim 400 \text{ mm}$ 之间时,焦斑宽度线性减少,此范围内 ($0 \leq S_1 < 400 \text{ mm}$), A_1, A_2 对应的第 m 单元的组合透镜焦距为负时 $f_m < 0$, 非球面透镜后焦面上的合成焦斑是“前焦斑”。设焦斑宽度 $l > 0$, 其物理意义是,通过透镜阵列每一单元的光线,例如光线 1, 2 经非球面透镜汇聚后, $1'$ 在焦斑的下面, $2'$ 在焦斑的上面,如图 1(a) 所示。 S_1 增大时, f_m 增大,焦斑宽度 l 减小。当 $S_1 = 400 \text{ mm}$ 时,焦斑尺寸为零,其物理意义是,此时 A_1, A_2 的组合焦距 f_m 为无穷大,相当于 A_1, A_2

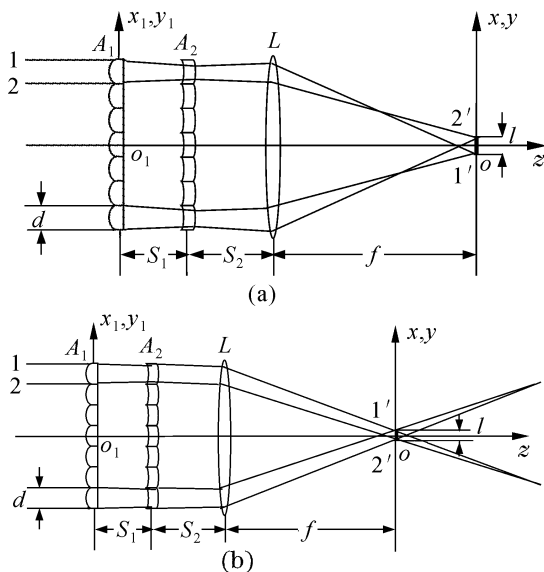


图 1 焦斑可控透镜阵列的光学系统原理图

Fig. 1 An improved lens arrays optic system scheme with controllable focus width

(a) $f_m < 0$; (b) $f_m > 0$

此时为两平行平板, 平行入射光束只由非球面透镜 L 聚焦, 按几何光学计算, 此时焦斑为零, 实际的焦斑尺寸由于衍射原因, 不可能为零, 而由透镜的衍射极限决定, 可达一个极小值。当 $S_1 > 400$ mm 后, 则焦斑宽度 $l < 0$, 其物理意义是, 通过透镜阵列每一单元的光线, 例如光线 1, 2 经非球面透镜汇聚后, $1'$ 在焦斑的上面, $2'$ 在焦斑的下面, 而且焦斑宽度 $|l|$ 随 S_1 线性增加。此时 A_1, A_2 对应的第 m 单元的组合透镜焦距为正时 $f_m > 0$, 合成焦斑是“后焦斑”, 见图 1(b)。 S_1 增大时, f_m 减小, 焦斑宽度 l 增大。在实际中可取 $0 \leq S_1 \leq 400$ mm 范围进行实验, 焦斑宽度 l 随 S_1 增大而线性减小, 焦斑宽度可在 $650 \mu\text{m} \geq l \geq 0$ 范围。实际中由于透镜阵列的各种像差和衍射效应的存在, 靶面上焦斑尺寸必然比以上理论计算的要大一些, 考虑到使焦斑尺寸变大的各种因素后, 仍可达到惯性约束聚变实验中几百微米的焦斑尺寸要求。

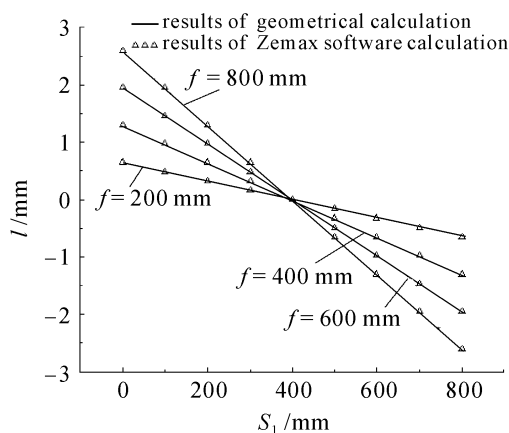


图 2 系统焦斑宽度 l 随距离 S_1 对不同主聚焦透镜焦距 f 的变化关系

Fig. 2 Focus width l varies with the distance S_1 for different focus widths of main focusing lens f

3 焦斑上的光强分布分析

从几何光学看, 阵列单元数目 N 足够大时, 每一子束光强分布可视为均匀的平面波, 这些平面波汇聚到同一靶面上, 所得到的焦斑强度分布就越好。然而, 实际激光具有很强的相干性, 必然产生多光束干涉条纹和阵列单元边缘的衍射, 由于采用了准近场照明方式, 故能产生准平顶分布的焦斑光强分布轮廓, 其强度分布应按物理光学分析。考虑到透镜阵列具有对称性, 为了方便起见, 按一维情况来计算。对图 1 所示的可变焦距透镜阵列系统, 设其单元数 N 为奇数, 可将每一子束所经过的光学系统看作一个失调的光学系统, 其中, 第 m 子束所经过的

透镜阵列单元 A_{1m}, A_{2m} 相对于系统主光轴的平移失调量为

$$\epsilon_m = md, \quad m = (-N-1)/2, \dots, (N-1)/2, \quad (4)$$

它们的角失调量为 $\epsilon'_m = 0$ 。第 m 子束从参考面 $x_1 o_1 z_1$ 到参考面 xoz 通过该系统时的失调传输矩阵 M_m 为^[6]

$$M_m = \begin{pmatrix} A_x & B_x & \alpha_x \epsilon_m & \beta_x \epsilon'_m \\ C_x & D_x & \gamma_x \epsilon_m & \delta_x \epsilon'_m \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

在非球面透镜后焦面上, 有

$$A_x = -\frac{f(f_1 + f_2 - S_1)}{f_1 f_2}, \quad B_x = f\left(1 - \frac{S_1}{f_2}\right),$$

$$C_x = -\frac{1}{f}\left(1 - \frac{S_1}{f_1}\right)\left(1 - \frac{S_2}{f_2}\right) - \frac{1}{f_1}\left(1 - \frac{S_2}{f}\right) - \frac{1}{f_2}\left(1 - \frac{S_1}{f_2}\right),$$

$$D_x = 1 - \frac{S_1}{f_2} - \frac{S_1 + S_2}{f} + \frac{S_1 S_2}{f f_2},$$

$$\alpha_x = -A_x, \quad \beta_x = 0,$$

$$\gamma_x = -C_x - \frac{1}{f}, \quad \delta_x = 0.$$

失调矩阵程函公式为^[6]

$$L_m(x_1, x) = L_0 + \frac{1}{2B_x} \{ A_x x_1^2 - 2x_1 x + D_x x^2 + 2(\alpha_x \epsilon_m + \beta_x \epsilon'_m) x_1 + 2[(\beta_x \gamma_x - D_x \alpha_x) \epsilon_m + (B_x \delta_x - D_x \beta_x) \epsilon'_m] x \}, \quad (6)$$

式中 L_0 为两参考面之间光轴上的光程, $L_0 = S_1 + S_2 + f$, 则靶面上 x 方向的总光强的复振幅分布由柯林公式(Collins)给出

$$E(x) = \left(-\frac{i}{\lambda B}\right)^{1/2} \sum_{m=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \times \int_{(m-1/2)d}^{(m+1/2)d} E_0(x_0) \exp[ikL_m(x_1, x)] dx_1, \quad (7)$$

式中 $E_0(x_0)$ 为入射光场分布, 假设为单位平面波, 即 $E_0(x_0) = 1$, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为激光波长。靶面上焦斑 x 方向总的光强分布为

$$I(x) = E(x)E^*(x) = [E(x)]^2, \quad (8)$$

式中 $*$ 为复共轭符号。

选取系统参数: $D = 180$ mm, $N = 7$, $d = 26$ mm, $f_1 = 2000$ mm, $f_2 = -1600$ mm, $f = 400$ mm, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, 离焦量 $\Delta z = 0$ mm, S_1 值分别取 100 mm, 200 mm, 300 mm, 500 mm,

600 mm时,由(3)式计算的焦斑尺寸 l 分别为 $975 \mu\text{m}$, $650 \mu\text{m}$, $325 \mu\text{m}$, $-325 \mu\text{m}$, $-650 \mu\text{m}$, $-975 \mu\text{m}$ 。利用(8)式做数值计算,沿着 x 方向在 $20 \mu\text{m}$ 范围内积分得到的结果如图 3 所示。可见靶面上的光强分布随 S_1 的变化不敏感,焦斑尺寸的变化规律与几何光学计算的结果一致。但由于干涉和

衍射效应的存在,靶面上的光场分布实际是单个阵列元边缘的衍射和多光束干涉的合成,均匀辐照是在一定空间尺度内的光能的平均分布。干涉使得靶面上的强度分布由许多高频调制的条纹组成。由程函公式(6)可估算出,条纹间距为 $\lambda f/d$, 约 $9.74 \mu\text{m}$ 。

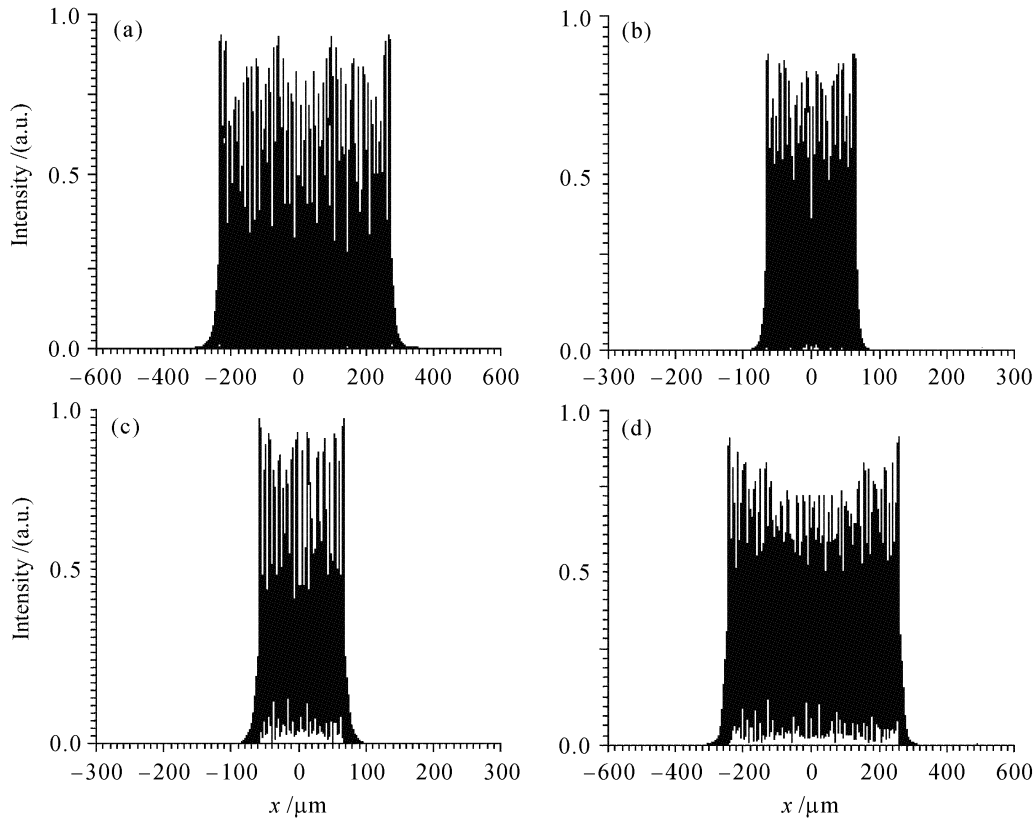


图 3 焦斑可控透镜阵列光学系统焦斑上 x 方向的光强分布的衍射积分示例

Fig. 3 Intensity distribution along the x direction of an improved lens array optic system with controllable focus width calculated by using diffraction integral

(a) $S_1 = 200 \text{ mm}$; (b) $S_1 = 300 \text{ mm}$; (c) $S_1 = 500 \text{ mm}$; (d) $S_1 = 600 \text{ mm}$

设 x, y 方向的一维光强的不均匀度分别为 η_x, η_y , 表示为

$$\eta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\%, \quad (9)$$

其中 I_{\max} 为光强的最大值, I_{\min} 为光强的最小值。当 $S_1 = 100 \text{ mm}$, $N = 7$, $d = 26 \text{ mm}$, 焦斑尺寸 $l_x = 975 \mu\text{m}$ 时, 计算沿 x 方向大约 $500 \mu\text{m}$ 范围内的一维不均匀度。焦斑上强度分布是沿着 x 方向 $20 \mu\text{m}$ 范围内积分再沿着 x 方向取 $50 \mu\text{m}$ 进行平滑后得到的。此时, 靶面光强 x, y 方向的不均匀度最小, 分别为 $\eta_x = 8.0\%$, $\eta_y = 8.2\%$ 。当系统阵列单元数 $N < 7$ 时, 系统不足以补偿近场不均匀性。当系统阵列单元数 $N > 7$ 时, 阵列元尺寸 d 减小, 必然引起单元衍射和多光束干涉产生的大尺度和小尺度的不均匀性。这与利用透镜阵列进行波面分割与重叠以提高

均匀性的要求相矛盾, 而这种衍射调制引起的大尺度辐照不均匀性有可能超过由于入射光束近场畸变所引起的靶面不均匀性。如图 4 所示, 例如 $N = 15$, $d = 15 \text{ mm}$, $l_x = 0.5625 \text{ mm}$ 时, x, y 方向的不均匀度分别增大为 $\eta_x = 18.7\%$, $\eta_y = 18.9\%$ 。

当靶面放置适当离焦时, 使各单元衍射分布不完全重叠, 彼此稍微错开, 可降低焦斑边缘的衍射起伏。例如通过数值计算, 当 $N = 7$, 离焦量 $\Delta z = 2 \text{ mm}$ 时, x, y 方向的不均匀度可分别降为 $\eta_x = 4.6\%$, $\eta_y = 5.3\%$, 而且条纹各主极大间的次极大增长到和主极大相当的强度, 大大减少了条纹小尺度的不均匀性。

为了验证理论计算的正确性, 应用 Zemax 光学设计软件, 用与系统的理论设计的相同参数, 设计了焦斑可调的透镜阵列均匀辐照光学系统, 并应用

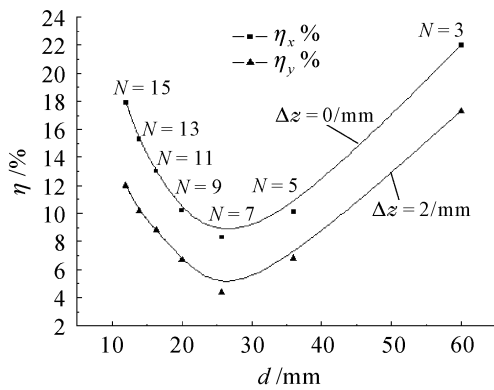


图 4 光强的不均匀度 η 随阵列单元宽度 d 和阵列单元数 N 的变化关系

Fig. 4 Variation of the intensity nonuniformity η with the element width d and the number N

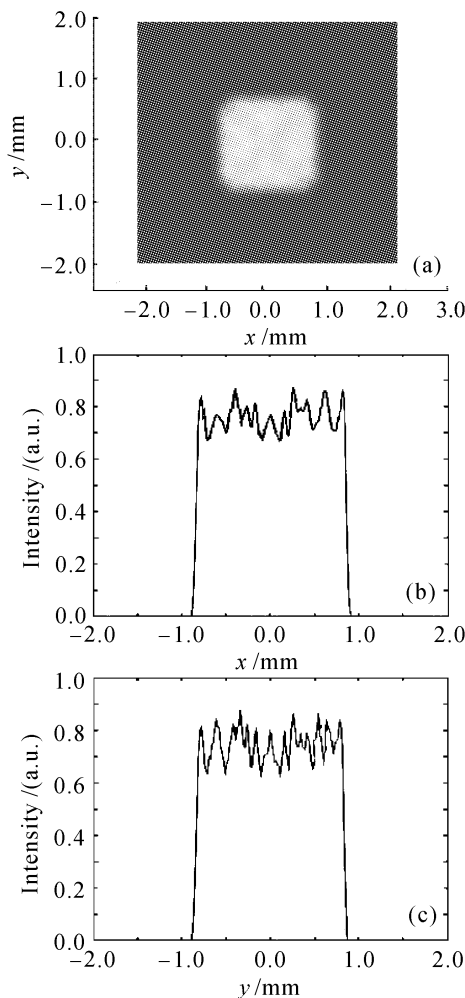


图 5 利用 Zemax 光学设计软件仿真实验测试的焦斑强度分布

(a) 二维方向; (b) x 方向; (c) y 方向

Fig. 5 Intensity distribution of the focal spot by the emulational experiment with Zemax software

(a) two-dimensional direction; (b) x direction; (c) y direction

Zemax 的光线追迹法对系统的焦斑尺寸随两透镜阵列间距 S_1 的变化规律进行了验证, 结果与几何光

学和物理光学计算的结果一样, 如图 2 所示。并且应用 Zemax 光学设计软件的仿真实验探测器, 对焦斑的形状和强度分布进行了测量, 阵列透镜为方形, 焦斑形状也为方形。当 $S_1 = 100$ mm, $f = 400$ mm, 离焦量 $\Delta z = 2$ mm, x, y 方向的不均匀度可分别为 $\eta_x = 8.1\%$, $\eta_y = 10.6\%$, 如图 5 所示, 与数值计算的结果符合得很好。

从理论和实验可知, 靶面上还存在着空间小尺度的强度调制, 小于 $10 \mu\text{m}$ 可以通过等离子体的热传导效应抹平, 空间大尺度的不均匀性不能通过等离子体的热传导效应来消除, 也不能通过增加阵列元的数目来消除。当靶面适当离焦时, 条纹各主极大之间的次极大可增长到与主极大相当的强度, 实际上使条纹间距减小了一倍。减小干涉条纹间距, 使之引向更高空间频率分量的方法除优化设计外, 还可用随机相位板^[9]、偏振控制^[8,9]及部分相干光^[10,11]等滑化技术来实现。

4 结 论

1) 用两组透镜阵列和非球面透镜组成光学系统可实现焦斑尺寸连续可调的焦斑, 焦斑光强为近平顶分布、无旁瓣、边缘上升下降陡峭, 靶面上的光强分布随 S_1 的变化不敏感。

2) 只要适当选择参数, 保持 f 不变, 只需简单地改变 S_1 , 可实现光斑尺寸在大范围内线性连续变化, 而且焦斑光强分布基本保持不变。应用 Zemax 光学设计软件, 对系统的焦斑尺寸随两透镜阵列间距 S_1 的变化规律进行了验证, 与几何光学和物理光学计算的结果一样。而实际中由于透镜阵列的各种像差和衍射效应的存在, 靶面上的焦斑尺寸必然比理论计算的要大一些, 考虑到使焦斑尺寸变大的各种因素后, 足可以达到惯性约束聚变实验中几百微米的焦斑尺寸要求。

3) 适当离焦时, 可降低焦斑边缘的衍射起伏。应用仿真实验探测器, 对焦斑的形状和强度分布进行了测量, 与数值计算的结果符合得很好。而且条纹各主极大间的次极大增长到和主极大相当的强度, 大大减少了条纹小尺度的不均匀性。

4) 由于激光束具有极强的相干性, 在透镜阵列元的边缘存在衍射效应和多光束干涉效应, 使得靶面上的光场分布含有高频调制。干涉使得焦线实际上由许多细密的条纹组成, 造成了光斑小尺度的不均匀, 而衍射则造成一些大尺度的光强起伏, 主要集

中于焦线的两端,从而影响靶面的辐照均匀性,这与提高均匀性的要求相悖。所以,要兼顾系统对入射光近场分布不均匀的补偿能力又要考虑由于系统单元数增加带来的新的不均匀性对靶面辐照带来的影响。数值计算表明, $N=7$ 时,得到的靶面光强的不均匀度最小,为最佳设计参数。

参 考 文 献

- 1 Ximing Deng, Xiangchun Liang, Zezun Cheng *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(2):377~381
- 2 D. M. Villeneuve, G. D. Enright, H. A. Baldis. Novel laser line focus geometry applied to X-ray lasers [J]. *Opt. Commun.*, 1991, **81**(2):54~58
- 3 Chen Wangnian, Wang Shusun, Chen Bin *et al.*. Cylindrical lens array focus system for X-ray laser experiments [J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, **11**(9):829~833
陈万年,王树森,陈斌等.用于X射线激光实验研究的列阵柱面透镜线聚焦系统[J].*光学学报*,1991,**11**(9):829~833
- 4 Fu Sizu, Sun Yuqin, Huang Xiuguang *et al.*. Optimizing design for uniform irradiation system on target surface of "Shenguang-II" facility [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2):129~133
傅思祖,孙玉琴,黄秀光等."神光-II"装置靶面均匀辐照系统的优化设计[J].*中国激光*,2003,**30**(2):129~133
- 5 Liu Zhongyong, Cai Bangwei, Lü Baida. Perpendicular segmented wedge arrays used to obtain a uniform square focus spot of continuously variable size [J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(8):702~706
刘忠永,蔡邦维,吕百达.用正交光楔列阵获得连续可调的均匀方形光斑[J].*中国激光*,1996,**A23**(8):702~706
- 6 Baida Lü, Bangwei Cai, Zhongyong Liu *et al.*. Improved segmented wedge array system with controllable line focus length [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **125**(4):48~52
- 7 Zheng Jianzhou, Cai Bangwei, Lü Baida *et al.*. Experimental study of two-dimensional orthogonal segmented wedge array [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(11):1008~1012
郑建洲,蔡邦维,吕百达等.二维正交光楔列阵大焦斑均匀照明光学系统的实验研究[J].*中国激光*,1997,**A24**(11):1008~1012
- 8 K. Tsubakimoto, M. Nakatsuka, H. Nakano *et al.*. Suppression of interference speckles produced by a random phase plate, using a polarization control plate [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **91**(1):9~12
- 9 F. Löwenthal, A. Präg, J. E. Balmer. Reduction of small-scale intensity modulation in a line focus produced by a cylindrical lens array using polarization control and wedge angles [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **135**(1):7~13
- 10 H. Nakano, N. Miyanaga, K. Yagi *et al.*. Partially coherent light generated by using single and multimode optical fibers in a high-power Nd:glass laser system [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(5):580~582
- 11 Lü Baida. Propagation and Control of High Power Lasers [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 274~319
吕百达.强激光的传输与变换[M].北京:国防工业出版社,1999.274~319