



不同 2×2 集束聚焦方式下高功率激光靶面光强分布特性

孙晓艳 雷泽民 卢兴强 吕风年 张臻 范滇元

Light intensity distribution of high-power laser beams on target plane under different focus system of 2×2 beam array

Sun Xiao-Yan Lei Ze-Min Lu Xing-Qiang Lü Feng-Nian Zhang Zhen Fan Dian-Yuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 064203 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.064203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高稳定性、高质量脉冲压缩飞秒光纤激光系统研究

Femtosecond fiber laser for high-stability and high-quality pulse compression

物理学报.2015, 64(16): 164207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164207>

$Ba_{1-x}B_{2-y-z}O_4Si_xAl_yGa_z$ 晶体和频可调谐深紫外飞秒激光器

Tunable deep ultraviolet femtosecond sum frequency laser based on $Ba_{1-x}B_{2-y-z}O_4Si_xAl_yGa_z$ crystal

物理学报.2015, 64(16): 164205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164205>

基于 1064 nm 光纤皮秒种子源的 Nd:YAG 再生放大器

A Nd:YAG regenerative amplifier seeded by 1064 nm picosecond fiber

物理学报.2014, 63(13): 134207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134207>

基于相位调制器与 Fabry-Perot 干涉仪的激光多普勒频移测量方法

Laser Doppler shift measuring method based on phase modulator and Fabry-Perot interferometer

物理学报.2013, 62(18): 184206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.184206>

采用环形再生腔结构的飞秒激光啁啾脉冲放大研究

A ring Ti:sapphire regenerative amplifier for high energy chirped pulse amplification

物理学报.2013, 62(10): 104211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.104211>

不同 2×2 集束聚焦方式下高功率激光靶面光强分布特性*

孙晓艳¹⁾²⁾ 雷泽民¹⁾²⁾ 卢兴强^{1)†} 吕风年¹⁾ 张臻¹⁾ 范滇元¹⁾

1)(中国科学院上海光学精密机械研究所, 高功率激光物理重点实验室, 上海 201800)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2015年5月26日收到; 2015年12月2日收到修改稿)

大口径高功率激光装置为提高激光靶面的光强强度, 通常采用 2×2 集束聚焦的模式进行打靶. 大口径楔形透镜是组成 2×2 集束聚焦系统的核心元件, 可分为二维离轴楔形透镜、一维离轴楔形透镜和非离轴楔形透镜3类. 为了获得理想靶面光强分布, 基于这3类楔形透镜, 对比研究相应 2×2 集束聚焦系统下的靶面光强分布特性. 研究表明: 相比离轴楔形透镜, 采用基于非离轴楔形透镜的 2×2 集束聚焦系统时, 容易在激光靶面获得更窄的主瓣宽度、更强的峰值强度、更高的能量集中度. 研究结果对高功率激光靶场聚焦系统的配置选择有重要参考价值.

关键词: 集束聚焦, 楔形透镜, 光强分布

PACS: 42.60.-v, 42.79.Bh, 42.25.Hz

DOI: 10.7498/aps.65.064203

1 引言

在大型惯性约束核聚变(ICF)装置中, 为了输出更高的能量, 大部分采用甚多束激光打靶的方式. 已建成的美国国家点火装置(NIF)采用192束激光打靶^[1], 在建的法国兆焦耳装置(LMJ)可运行240束激光^[2], 我国在建的神光III主机装置采用48束激光打靶^[3]. 随着打靶光束数量的增加, 在有限的靶场空间内, 光束传输系统的排布也面临着挑战^[4]. 为了提高光束传输系统集成度, 将每4束激光组成 2×2 集束, 并经过一套集成化的 2×2 终端光学组件, 最终相干会聚于同一靶点^[5]. 虽然这种多光束传输和聚焦方式极大地缓解了靶场空间紧张的状况, 但它和单束打靶方式产生的靶面光强分布并不相同, 因而打靶效果也不同. 目前的研究主要针对多光束相干合成中的光束形状、排布方式、填充因子、相干性等对远场特性的影响^[6-11], 而尚

无ICF装置 2×2 集束聚焦系统的大口径楔形透镜设计对远场影响的详实报道, 因此研究楔形透镜设计对靶面光强分布的影响十分必要.

在现行的大型ICF装置集束聚焦系统中, 2×2 集束的目的是获得4束激光相干会聚的远场, 很自然想到采用4块二维离轴透镜在形式上组成一块“大透镜”的模式来实现4束激光会聚的功能, 但是大口径离轴楔形透镜加工难度高, 实际上采用的模式分化为离轴、非离轴模式^[12]. 为了获得理想的激光靶面光强分布, 本文基于二维离轴楔形透镜、一维离轴楔形透镜和非离轴楔形透镜3类来设计 2×2 集束聚焦方案, 并探讨对应的激光靶面光强分布. 首先介绍在3类楔形透镜条件下的3套 2×2 集束聚焦方案, 然后根据这3种套集束聚焦方案推导对应的光束传输表达式, 最后分别数值模拟激光靶面光强分布并讨论其特性. 研究结果为大型ICF装置靶场集束聚焦系统设计提供一定的参考.

* 国家自然科学基金(批准号: 60707019)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xingqianglu@siom.ac.cn

2 集束聚焦系统设计方案

靶场楔形透镜的作用是光束聚焦和谐波分离,其中楔角用于谐波分离,文中只考虑楔形透镜的光束聚焦作用,为了方便表述,用透镜指代楔形透镜.要实现 2×2 集束聚焦,首先采用了一块大透镜聚焦以获得理想的远场,如图1所示,以透镜A光心为原点、所在平面为 $x-y$ 平面、主光轴为 z 轴建立空间直角坐标系,集束经透镜A后在激光靶面相干会聚.为了配合 2×2 的集成光学模块设置,采用4块二维离轴楔形透镜在形式上组成一块“大透镜”的模式来实现4束激光相干会聚的功能.由于大口径二维离轴楔形透镜的加工和使用难度大,实际上用来实现 2×2 集束聚焦的透镜分化为二维离轴楔形透镜、一维离轴楔形透镜和非离轴楔形透镜3类.为了实现较好的激光打靶效果,基于这3类楔形透镜,设计相应的3套集束聚焦方案.

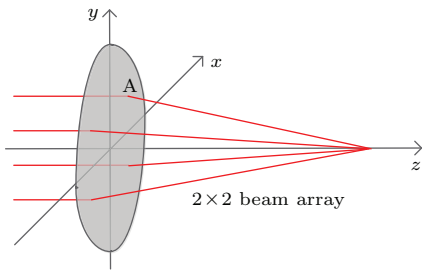


图1 单个透镜会聚 2×2 集束示意图
Fig. 1. Schematic representation of focusing 2×2 beam array based on a focus lens.

二维离轴楔形透镜表示透镜中心 (x_c, y_c) 相对透镜光心 (x_o, y_o) 在 x 和 y 方向都存在离轴量,即 $x_c \neq x_o, y_c \neq y_o$.采用二维离轴楔形透镜的 2×2 集束聚焦系统方案如图2所示,简称方案一,其中 B_i 表示子透镜, $i = 1, 2, 3, 4$ 分别表示第 i 象限.如图2(a)所示,4块子透镜的球面对称选取在透镜A球面的每个象限内,构成 2×2 排布的二维离轴透镜阵列来替代透镜A.如图2(b)所示,调整靶场投射反射镜使投射到4块透镜的激光光轴都互相平行,集束经透镜阵列后相干会聚于靶面.

一维离轴楔形透镜表示透镜中心 (x_c, y_c) 相对透镜光心 (x_o, y_o) 只在 x 或 y 方向存在离轴量,即 $x_c \neq x_o, y_c = y_o$ 或 $x_c = x_o, y_c \neq y_o$.采用一维离轴楔形透镜的 2×2 集束聚焦系统方案如图3所示,简称方案二.如图3(a)所示,4块子透镜的球面中

心对称选取在透镜A球面的坐标轴上,形成4块一维离轴透镜.为了匹配 2×2 集束排列方式,需要移动4块一维离轴透镜至4个象限内,如图3(b)所示,分别固定蓝虚线框内的子透镜 B_1 和 B_3 、红虚线框内的子透镜 B_2 和 B_4 为一个整体,再使子透镜 B_1 和 B_3 的中心绕原点顺时针旋转 90° 至 x 轴上,接着使子透镜 B_1 和 B_3 沿 y 轴正方向平移至第一和第二象限内,最后使子透镜 B_2 和 B_4 沿 y 轴负方向平移至第三和第四象限内.此时构成 2×2 排列的4块子透镜中心相对子透镜光心都只在 x 轴方向离轴,并且当4束平行光入射时,经子透镜 B_1 和 B_3 的2束光聚焦于 y 轴正半轴一点,经子透镜 B_2 和 B_4 的2束光聚焦于 y 轴负半轴一点.为了使 2×2 集束会聚于靶面同一点,调整靶场投射反射镜使投射到透镜 B_1 和 B_3 上的激光光轴平行, B_2 和 B_4 上的激光光轴平行, B_1 和 B_4 之间以及 B_2 和 B_3 之间的激光光轴都存在夹角,便于4束激光打到同一个焦点上.

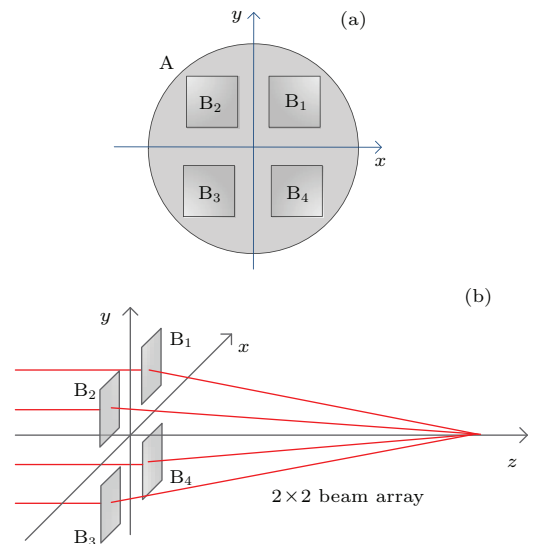


图2 采用二维离轴楔形透镜的 2×2 集束聚焦方案
(a) 子透镜的球面选取区域; (b) 子透镜的排布组合
Fig. 2. Focusing project of 2×2 beam array based on two-dimensional off-axis wedged focus lenses: (a) Selected spherical surface; (b) arrangement of each focus lens.

非离轴楔形透镜表示透镜中心 (x_c, y_c) 和透镜光心 (x_o, y_o) 重合,即 $x_c = x_o, y_c = y_o$.采用非离轴楔形透镜的 2×2 集束聚焦系统方案如图4所示,简称方案三.如图4(a)所示,4块子透镜的球面中心都选取在透镜A球面中心,形成4块非离轴透镜;如图4(b)所示,将4块子透镜对称放置在同一平面的每个象限内,此时子透镜不会使子光束光轴发生

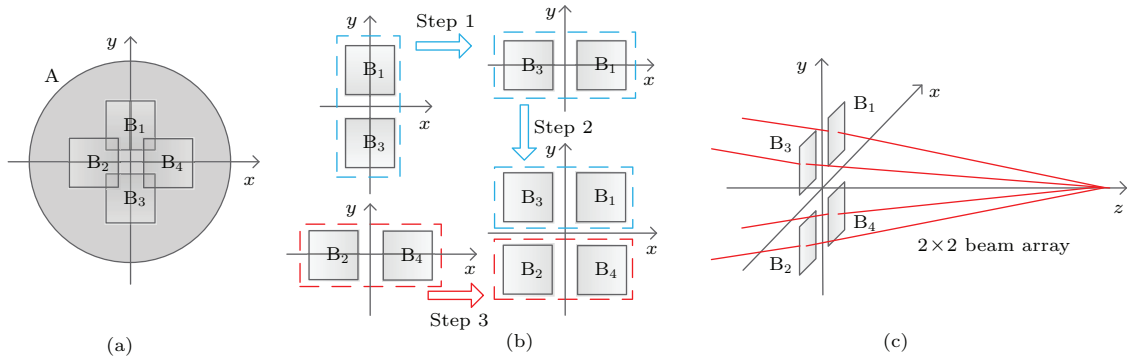


图3 采用一维离轴楔形透镜的2×2集束聚焦方案 (a) 子透镜的球面选取区域; (b) 子透镜的位置变换; (b) 子透镜的排布组合

Fig. 3. Focusing project of 2×2 beam array based on one-dimensional off-axis wedged focus lenses: (a) Selected spherical surface; (b) changed position; (c) arrangement of each focus lens.

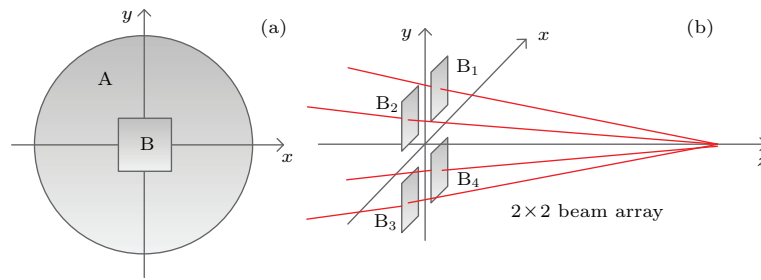


图4 采用非离轴楔形透镜的2×2集束聚焦方案 (a) 子透镜的球面选取区域; (b) 子透镜的排布组合

Fig. 4. Focusing project of 2×2 beam array based on non-off-axis wedged focus lenses: (a) Selected spherical surface; (b) arrangement of each focus lens.

偏折. 为了使2×2集束会聚于靶面同一点, 调整投射反射镜使投射到每块透镜上的激光光轴都不平行, 彼此之间都存在夹角, 以实现4束激光在激光靶面的相干叠加.

3 集束聚焦系统原理分析

3.1 光束传输分析

3种聚焦方案对激光光束的调制通过系统透过率函数来表示. 聚焦系统的整体透过率函数为

$$T_j(x, y) = \sum_{i=1}^4 t_{i,j}(x, y) \quad i = 1, 2, 3, 4; \quad j = 1, 2, 3; \quad (1)$$

其中, $t_{i,j}(x, y)$ 表示集束聚焦方案 j 在第 i 象限内的透过率函数.

对于方案一, 4束子光束平行并对称投射到2×2集束聚焦系统上, 子聚焦系统 FS_i 的透过率函数为

$$t_{i,1}(x, y) = \exp\left(-ik\frac{x^2 + y^2}{2f}\right) \text{rect}\left(\frac{x - x_i}{D_0}\right)$$

$$\times \text{rect}\left(\frac{y - y_i}{D_0}\right), \quad (2)$$

其中, k 为传播常数, f 为集束聚焦系统的焦距, D_0 为子光束口径, (x_i, y_i) 为子透镜中心且满足 $x_1 = -x_2 = -x_3 = x_4 = y_1 = y_2 = -y_3 = -y_4$.

对于方案二, 只有子光束 B_1 和 B_3 相互平行, B_2 和 B_4 相互平行, 而 B_1 和 B_4 之间以及 B_2 和 B_3 之间以相同的角度对称入射, 子聚焦系统 FS_i 的透过率函数为

$$t_{i,2}(x, y) = \exp\left\{-ik\left[\frac{x^2 + (y - y_i)^2}{2f} - y \cos \beta_0\right]\right\} \times \text{rect}\left(\frac{x - x_i}{D_0}\right) \text{rect}\left(\frac{y - y_i}{D_0}\right), \quad (3)$$

其中, $\beta_0 = \pi - \arctan(f/y_i)$ 且 $\arctan(f/y_i) \in (0, \pi)$, β_0 是投射到子透镜的激光光轴与 y 轴的夹角.

对于方案三, 4束子光束以相同的角度对称入射, 子聚焦系统 FS_i 的透过率函数为

$$t_{i,3}(x, y) = \exp\left\{-ik\left[\frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{2f}\right]\right\}$$

$$-x \cos \alpha_1 - y \cos \beta_1 \Big] \Big\} \times \text{rect} \left(\frac{x - x_i}{D_0} \right) \text{rect} \left(\frac{y - y_i}{D_0} \right), \quad (4)$$

其中, $\alpha_1 = \pi - \arctan(\sqrt{y_i^2 + f^2}/x_i)$ 且 $\arctan \sqrt{y_i^2 + f^2}/x_i \in (0, \pi)$, $\beta_1 = \pi - \arctan(\sqrt{x_i^2 + f^2}/y_i)$ 且 $\arctan \sqrt{x_i^2 + f^2}/y_i \in (0, \pi)$, α_1, β_1 分别是投射到子透镜的激光光轴与 x 轴和 y 轴的夹角.

2×2 集束经采用方案 j 的聚焦系统后在靶面的光场分布为^[13]

$$E_j(x_0, y_0) = \frac{A \exp(ikf)}{i\lambda f} \iint T_j(x, y) \times \exp \left[ik \frac{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}{2f} \right] dx dy, \quad (5)$$

其中, A 为初始振幅, λ 为激光波长. 4 束子光束相干叠加的靶面光强分布为

$$I_j(x_0, y_0) = E_j(x_0, y_0) E_j^*(x_0, y_0), \quad (6)$$

其中, $*$ 表示共轭.

3.2 波前调制特性分析

2×2 集束聚焦系统引入的波前调制特性对靶面光强分布有着重要的影响, 为了分析集束聚焦系统对每个光束引入的相位因子在子光束内部、在子光束和子光束之间的对称性, 如图 5 所示, 对于集束聚焦方案 j , 在子透镜所在区域 S_i 内以子透镜中心 $O_i(x_i, y_i)$ 为圆心, 如果在半径 r_i 处的透过率 $t_{i,j}(x_i + r_i \cos \gamma_i, y_i + r_i \sin \gamma_i)$ ($\gamma_i \in [0, 2\pi)$) 值不随圆心角 γ_i 变化而变化, 那么集束聚焦系统对每个光束引入的相位因子在子光束内部是对称的; 对于集束聚焦系统, 以子聚焦系统 FS_1 与其余 3 个子聚焦系统的透过率对称性为例, 在图 5 中点 $P_1(x, y)$ 分别和点 $P_2(-x, y)$ 关于 y 轴对称、点 $P_4(x, -y)$ 关于 x 轴对称、点 $P_3(-y, -x)$ 关于 $y = -x$ 对称, 如果点 $P_1(x, y)$ 、点 $P_2(-x, y)$ 、点 $P_4(x, -y)$ 和点 $P_3(-y, -x)$ 的透过率同时相等, 即满足 $t_{1,j}(x, y) = t_{2,j}(-x, y) = t_{4,j}(x, -y) = t_{3,j}(-y, -x)$, 那么集束聚焦系统对每个光束引入的相位因子在子光束和子光束之间是对称的.

在方案一中, 由 (2) 式可得子聚焦系统的 $t_{i,1}(x_i + r_i \cos \gamma_i, y_i + r_i \sin \gamma_i)$ 值随 γ_i 变化而变

化, 因此集束聚焦系统对每个光束引入的相位因子在子光束内部不对称; 对于集束聚焦系统, 满足 $t_{1,1}(x, y) = t_{2,1}(-x, y) = t_{4,1}(x, -y) = t_{3,1}(-y, -x)$, 因此集束聚焦系统对每个光束引入的相位因子在子光束和子光束之间对称. 在方案二中, 由 (3) 式可得子聚焦系统的 $t_{i,2}(x_i + r_i \cos \gamma_i, y_i + r_i \sin \gamma_i)$ 值随 γ_i 变化而变化, 因此集束聚焦系统对每个光束引入的相位因子在子光束内部不对称; 对于集束聚焦系统, 满足 $t_{1,2}(x, y) = t_{2,2}(-x, y) = t_{4,2}(x, -y) \neq t_{3,2}(-y, -x)$, 因此集束聚焦系统对每个光束引入的相位因子在子光束和子光束之间不对称. 在方案三中, 由 (4) 式可得子聚焦系统的 $t_{i,3}(x_i + r_i \cos \gamma_i, y_i + r_i \sin \gamma_i)$ 值不随 γ_i 变化而变化, 因此集束聚焦系统对每个光束引入的相位因子在子光束内部对称; 对于集束聚焦系统, 满足 $t_{1,3}(x, y) = t_{2,3}(-x, y) = t_{4,3}(x, -y) = t_{3,3}(-y, -x)$, 因此集束聚焦系统对每个光束引入的相位因子在子光束和子光束之间对称.

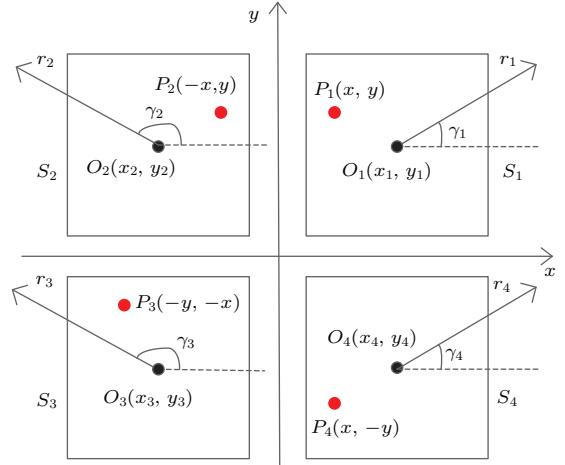


图 5 (网刊彩色) 2×2 集束聚焦系统在横向空间的排布示意 (黑点为点 O_i , 红点为点 P_i)

Fig. 5. (color online) Arrangement of focus system of 2×2 beam array on transverse space (black dots are O_i , and red dots are P_i).

4 靶面光强分布的数值模拟与讨论

基于上述 3 种 2×2 集束聚焦方案, 入射聚焦系统的 2×2 集束在横向空间的强度分布如图 6 所示, 其中每个子光束都是有一定软边的平顶光束, 其形状为圆角正方形. 在数值模拟中, 为了获得更多的靶面焦斑细节, 采用 64 位程序运算, 最小采样精度达到 $1.5 \mu\text{m}$; 为了匹配大型 ICF 装置的 F 数, 这里 F 数为 17.7; 相邻子光束的中心间距 d 与子光束口

径 D_0 之比 $m = d/D_0$ 设置为 1.25.

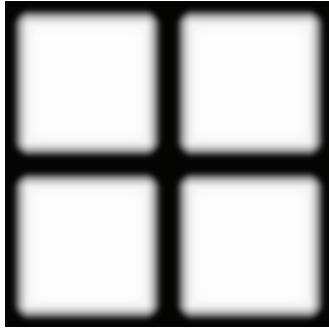


图6 入射聚焦系统的 2×2 集束在横向空间上的光强分布示意

Fig. 6. Light intensity distribution on transverse space of 2×2 beam array propagating through a focus system.

在如图 6 所示的 2×2 集束激光入射下, 模拟得到 3 种集束聚焦方案的靶面光强分布形态如图 7 所示, 并且坐标轴坐标值 R 转化为方形光束衍射极限倍数 $N = DR/(\lambda f)$ (单位: DL) 来表示, 其中方形光束衍射极限 (DL) 为 $2\lambda/D$, $D = 2D_0$ 是子光束间没有间隙时对应的集束口径. 由图 7 可得在焦斑形态对称性方面, 方案一和方案三的焦斑形态对称性最好, 主瓣形态呈圆形, 方案二的焦斑形态不对称, 主瓣形态呈椭圆形. 在焦斑主瓣尺寸方面, 方案一的主瓣尺寸最大, 方案二的主瓣尺寸在水平方向介于方案一和方案三之间, 在垂直方向与方案三接近, 方案三的主瓣尺寸最小, 整体好于前两种方案. 在焦斑旁瓣分布方面, 方案一的 8 个第一旁瓣中心呈方形排布, 其中 4 个旁瓣中心位于坐标轴上, 其余 4 个位于对角线上, 并且坐标轴上和对角线上的旁瓣形态不相同; 方案二的 4 个第一旁瓣中心呈菱形排布于坐标轴上, 并且位于水平方向的第一旁瓣尺寸大于位于垂直方向的; 方案三的 4 个第一旁瓣中心呈方形排布于坐标轴上, 并且第一旁瓣形态分布完全相同. 图 7 给出了焦斑形态差异可以用 2×2 集束聚焦系统引入的波前调制特性来说明, 因为从光束相干角度来看, 方案一、方案二、方案三这 3 种集束聚焦系统对每个光束引入的相位因子在子光束内部分别是不对称、不对称、对称的, 子光束和子光束之间分别是对称、不对称、对称的, 所以 4 束子光束的波前一致性在方案三中最好, 方案一次之, 方案二最差.

将图 7 给出的二维光斑形态分布转化成三维立体图, 并对它们的强度用同样的因子进行归一

化, 得到图 8 给出的集束焦斑强度分布结果. 3 种集束聚焦方案产生的远场主瓣峰值强度依次升高, 方案一最低, 方案二居中, 方案三最高.

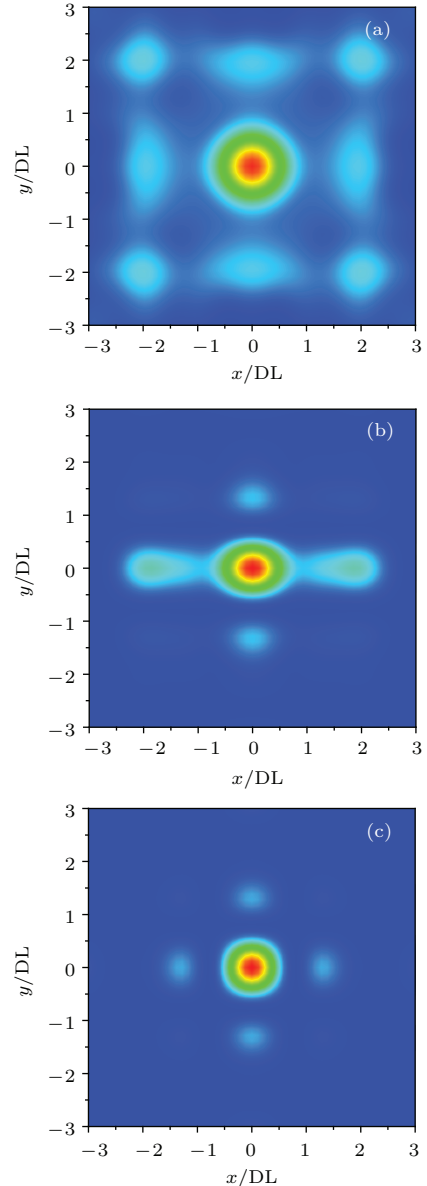


图7 (网刊彩色) 在 3 种 2×2 集束聚焦方案下的激光靶面光强二维分布 (a) 方案一; (b) 方案二; (c) 方案三

Fig. 7. (color online) Two-dimensional intensity distribution on the target plane under three focusing projects of 2×2 beam array: (a) Project 1; (b) project 2; (c) project 3.

为了分析 3 种聚焦方案下的打靶穿孔效率, 如图 9 所示, 对图 7 的两维光斑沿坐标轴的空间分布进行研究. 对比图 9 (a) 和图 9 (b) 可以看出在方案一、方案三中, x 和 y 轴的强度分布完全相同, 并且 x 或 y 轴的正半轴和负半轴的光强分布完全对称; 在方案二中, 相同级次旁瓣的极大值强度和位置在离轴方向都大于非离轴方向, 整体上激光能量向离

轴方向积聚; 在三种方案中, 相同级次旁瓣的半峰全宽依次变窄, 方案一最宽, 方案二居中, 方案三最窄. 由图9(a)可得在 x 轴上的第一旁瓣极大值位置离主瓣中心最近的是方案三, 方案一虽然与方案二相差不多, 但远于方案二; 由图9(b)可得在 y 轴上的第一旁瓣极大值位置离主瓣中心最近的是方案二和方案三, 方案一最远. 因此, 当靶室靶孔较小时, 打靶穿孔效率从低到高依次是方案一、方案二、方案三.

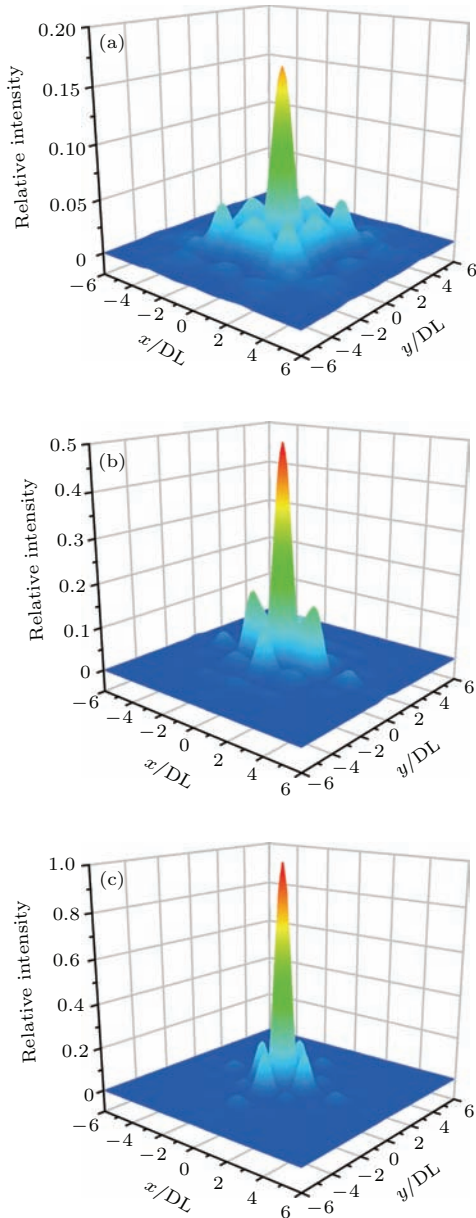


图8 (网刊彩色) 在3种 2×2 集束聚焦方案下的激光靶面光强三维分布 (a) 方案一; (b) 方案二; (c) 方案三
Fig. 8. (color online) Three-dimensional intensity distribution on the target plane under three focusing projects of 2×2 beam array: (a) Project 1; (b) project 2; (c) project 3.

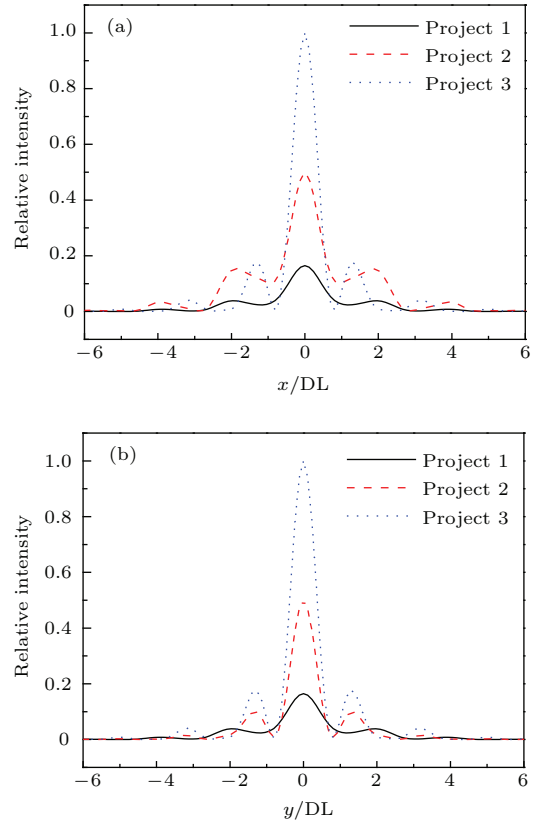


图9 在3种 2×2 集束聚焦方案下的激光靶面沿坐标轴的光强分布 (a) 沿 x 轴; (b) 沿 y 轴
Fig. 9. Axial intensity distribution on the target plane under three focusing projects of 2×2 beam array: (a) x -axis; (b) y -axis.

为了更直观地反映3种聚焦方案的远场焦斑能量集中度, 采用能量集中度

$$\eta_E = \frac{\int_0^R \int_0^{2\pi} I(x, y) r dr d\theta}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} I(x, y) r dr d\theta}$$

来表示给定半径 R 的圆周内所包围的激光功率占总功率的百分比. 3种聚焦方案下的能量集中度曲线如图10所示, 可以看出聚焦能力从弱到强依次是方案一、方案二、方案三.

根据上述模拟结果, 得到如表1所列的3种 2×2 集束聚焦方案下的靶面光强分布特性. 对比这3种聚焦方案可以看出, 透镜的离轴模式可以使能量向旁瓣积聚, 主瓣宽度增加, 峰值强度降低, 相反, 非离轴模式可以使能量向主瓣中心积聚, 主瓣宽度变窄, 峰值强度增强. 从靶面光强的分布形态、激光峰值功率和能量集中度等指标来看, 由4块非离轴楔形透镜组成的 2×2 集束聚焦系统的靶面光强分布特性最佳.

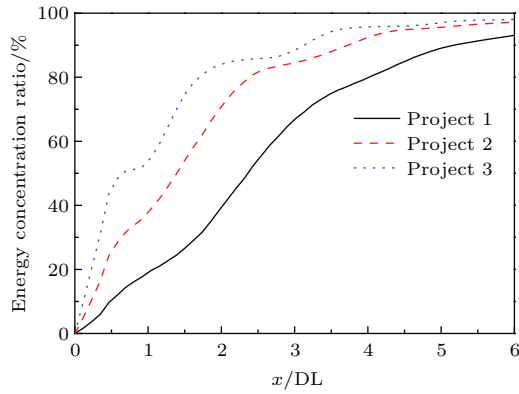


图 10 在 3 种 2×2 集束聚焦方案下的激光靶面能量集中度

Fig. 10. Energy concentration ratio on the target plane under three focusing projects of 2×2 beam array.

表 1 在 3 种 2×2 集束聚焦方案下的激光靶面光强分布特性

Table 1. Intensity distribution characteristic on the target plane under three focusing projects of 2×2 beam array.

方案	主瓣形态	主瓣宽度	峰值功率	能量集中度
方案一	圆形	宽	低	低
方案二	椭圆形	中	中	中
方案三	圆形	窄	高	高

5 结 论

针对靶场终端光学组件中 2×2 集束聚焦系统, 分析基于二维离轴楔形透镜、一维离轴楔形透镜和非离轴楔形透镜的 3 种集束聚焦方案, 推导相应光束传输表达式, 并模拟和对比研究其激光靶面的光强分布特性. 研究表明: 2×2 集束经离轴楔形透镜会聚时, 激光靶面主瓣尺寸增加, 峰值强度降低, 能量集中度变差, 因此从激光靶面光强的分布形态、主瓣宽度、峰值强度、能量集中度等指标来看, 采用非离轴楔形透镜的集束聚焦方案获得的靶面光强分布特性最好, 并且同时回避了加工和使

用难度较高的离轴楔形透镜. 研究结果可以为靶场 2×2 集束聚焦系统的设计提供一定的参考.

参考文献

- [1] Hunt J T 1999 UCRL-ID-138120-98 [R] *National Ignition Facility Performance Review*, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore USA
- [2] Ebrardt J, Chaput J M 2008 *J. Phys.: Conference Series* **112** 032005
- [3] Zheng W G, Zhang X M, Wei X F, Jing F, Sui Z, Zheng K X, Yuan X D, Jiang X D, Su J Q, Zhou H, Li M Z, Wang J J, Hu D X, He S B, Xiang Y, Peng Z T, Feng B, Guo L F, Li X Q, Zhu Q H, Yu H W, You Y, Fan D Y, Zhang W Y 2008 *J. Phys.: Conference Series* **11** 2 032009
- [4] Wang M C, Zhu M Z, Chen G, Wu W K, Fu X N 2013 *Laser & Optoelectronics Progress* **50** 011403 (in Chinese) [王美聪, 朱明智, 陈刚, 吴文凯, 傅学农 2013 激光与光电子学进展 **50** 011403]
- [5] Wegner P, Auerbach J, Biesiada T, Dixit S, Lawson J, Menapace J, Parham T, Swift D, Whitman P, Williams W 2004 *SPIE* **5341** 180
- [6] Su R T, Zhou P, Wang X L, Ji X, Xu X J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 084206 (in Chinese) [粟荣涛, 周朴, 王小林, 冀翔, 许晓军 2012 物理学报 **61** 084206]
- [7] Huang Z H, Wei X F, Li M Z, Wang J J, Lin H H, Xu D P, Deng Y, Zhang R 2012 *Appl. Opt.* **51** 1546
- [8] Liu H K, Xue Y H, Li Z, He B, Zhou J, Ding Y Q, Jiao M L, Liu C, Qi Y F, Wei Y Q, Dong J X, Lou Q H 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 044204
- [9] Tan Y, Li X Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 094202 (in Chinese) [谭毅, 李新阳 2014 物理学报 **63** 094202]
- [10] Xiao R, Hou J, Jiang Z F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 853 (in Chinese) [肖瑞, 侯静, 姜宗福 2008 物理学报 **57** 853]
- [11] Lü B D, Hong M 1999 *Opt. Commun.* **171** 185
- [12] Li F Q, Han W, Wang F, Zhang X M, Wei X F, Feng B, Xiang Y, Jia H T, Li K Y *Laser & Optoelectronics Progress* **50** 060002 (in Chinese) [李富全, 韩伟, 王芳, 张小民, 魏晓峰, 冯斌, 向勇, 贾怀庭, 李格宇 2013 激光与光电子学进展 **50** 060002]
- [13] Born M, Wolf E 1999 *Principles of Optics* (London: Cambridge University Press) pp412-430

Light intensity distribution of high-power laser beams on target plane under different focus system of 2×2 beam array*

Sun Xiao-Yan¹⁾²⁾ Lei Ze-Min¹⁾²⁾ Lu Xing-Qiang^{1)†} Lü Feng-Nian¹⁾
Zhang Zhen¹⁾ Fan Dian-Yuan¹⁾

1) (*Key Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 26 May 2015; revised manuscript received 2 December 2015)

Abstract

Large aperture high-power laser drivers usually focus the high power laser beams in 2×2 quads to the target chamber center in order to increase the light intensity on the target plane. The large aperture wedged focus lenses are the core components in the focus system of quadruplets of beams, and it is thought possible to use four two-dimensional off-axis wedged focus lenses as four sub-lenses to make up a larger aperture wedged focus lens in form to focus the four beams. Given that the large aperture two-dimensional off-axis wedged focus lenses are processed and used difficultly, the wedged focus lenses are divided into three categories: the two-dimensional off-axis wedged focus lenses, the one-dimensional off-axis wedged focus lenses, and the non-off-axis wedged focus lenses. On the basis of the three modes of the wedged focus lenses and the corresponding specific incidence angles of each sub-beam, the three focus schemes for the 2×2 beam array are put forward to comparatively research the light intensity distribution on the target plane. Research results show that from a perspective of the coherence among the four sub-beams, the phase factors of each sub-beam respectively introducing by the three focus systems with the two-dimensional off-axis, one-dimensional off-axis, and non-off-axis wedged focus lenses are asymmetric, asymmetric and symmetric inside each sub-beam, and symmetric, asymmetric and symmetric among the four sub-beams. Therefore, the wave front consistency of the four sub-beams decreases in the order of the focus systems with the non-off-axis, two-dimensional off-axis, and one-dimensional off-axis wedged focus lenses. The focus schemes with the non-off-axis wedged focus lenses for 2×2 beam array can get the narrowest main-lobe, the strongest peak-value intensity, the highest energy concentration ratio on the target plane, followed by the one-dimensional off-axis and two-dimensional off-axis wedged focus lenses. The off-axis mode of the wedged focus lenses not only increases the complexity in the course of processing and using, but also increases the main-lobe size, decreases the peak-value intensity and the energy concentration ratio, which obtains a weaker focusing characteristics than that of the non-off-axis mode of the wedged focus lenses. Research results can provide an important reference for the design of the focus system in the target area of high-power laser drivers.

Keywords: beam array focus, wedged focus lens, light intensity distribution

PACS: 42.60.-v, 42.79.Bh, 42.25.Hz

DOI: 10.7498/aps.65.064203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60707019).

† Corresponding author. E-mail: xingqianglu@siom.ac.cn