

基于简单透镜列阵的可调焦激光均匀辐照光学系统研究

江秀娟 李菁辉 朱俭 林尊琪

Study on a zooming optical system based on simple lens array used for laser uniform irradiation

Jiang Xiu-Juan Li Jing-Hui Zhu Jian Lin Zun-Qi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 054201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.054201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I5>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于零折射磁性特异电磁介质的波前调控

Manipulation of electromagnetic wavefront based on zero index magnetic metamaterial

物理学报.2015, 64(3): 034203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034203>

小宽带光谱色散平滑光束传输特性研究

Propagation characteristics of small-bandwidth pulsed beams with smoothing by spectral dispersion in high power laser system

物理学报.2014, 63(16): 164201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164201>

聚焦高斯涡旋光束焦区电场和磁场的偏振奇点

Electric and magnetic polarization singularities of focused Gaussian vortex beams in the focal region

物理学报.2014, 63(15): 154201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154201>

宽波段波状多层膜结构偏振分束器的设计与优化

Design and optimization of broadband polarization beam splitter made from a wave-structured multilayer film

物理学报.2014, 63(13): 134212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134212>

微波频段表面等离子激元波导滤波器的实验研究

Experimental studies of the surface plasmon polaritons waveguide filter in microwave band

物理学报.2013, 62(18): 184203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.184203>

基于简单透镜列阵的可调焦激光均匀辐照光学系统研究*

江秀娟^{1)†} 李菁辉²⁾ 朱俭³⁾ 林尊琪²⁾

1) (广东工业大学信息工程学院, 广州 510006)

2) (中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

3) (中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

(2014年7月30日收到; 2014年8月24日收到修改稿)

本文对基于简单透镜列阵的大口径激光均匀辐照光学系统的调焦能力进行了研究, 结果表明, 改变透镜列阵与靶镜之间的距离即可方便地改变靶面上光斑的大小. 文中详细分析了相关参数对调焦能力的影响, 并在此基础上设计出一个实用的光学系统. 用数值方法模拟了激光束通过光学系统后的传输, 发现尺寸不同的靶面光斑具有基本一致的强度结构特征. 定量地分析了光斑内部散斑间隔、调制对比度、顶部不均匀度及能量集中度等描述光斑均匀辐照质量的指标, 并研究了它们随靶面离焦量的变化关系.

关键词: 高功率激光驱动器, 靶面均匀辐照, 透镜列阵, 调焦

PACS: 42.25.Bs, 42.30.Kq

DOI: 10.7498/aps.64.054201

1 引言

高功率激光驱动装置可应用于惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 及高能密度物理实验等研究, 目标靶面光斑的匀滑一直是此类装置非常重要的关键技术之一^[1,2]. 利用空间匀滑方法可对光斑进行整形, 并可消除入射激光强度或相位不均匀分布所造成的影响. 目前成熟的空间域方法主要有透镜列阵法 (lens array, LA)^[3] 和连续相位板法 (continuous phase plate, CPP)^[4] 等. CPP可精确地控制光斑的形状, 并且具有激光能量利用率高、激光损伤阈值高、寿命长等优点, 得到美、法、中等各国研究人员的重视^[5,6]. LA法是1986年由Deng等提出的, 透镜列阵由几十至一百个左右的方形或者六角形小透镜元构成, 它将入射光束分割成大量子光束, 每个子束在靶面形成一个菲涅

耳衍射图样, 所有衍射图样叠加, 可得到均匀性较好的光斑强度分布. 在光斑整形方面, LA的灵活性不如CPP, 但它对光束近场畸变有更大的宽容度. LA由大量透镜元拼接而成, 拼接处在极高激光能量密度下会被破坏, 故LA的激光损伤阈值比CPP要低, 但足以满足目前激光驱动器的能量输出要求. 因此, LA在中国“神光”系列高功率激光装置上使用了二十多年, 取得了很好的实验效果, 至今仍然作为一种成熟和重要的空间匀滑方法在使用^[7,8]. 无论是采用CPP还是LA, 激光被分割成多个子光束在靶面上相干叠加, 都会因为干涉而产生散斑结构. 采用光谱色散匀滑 (smoothing by spectral dispersion, SSD) 等时间匀滑方法可破坏光束的时间相干性, 在一定程度上消除这类高空间频率 (或者说小空间尺度) 的强度调制, 进一步改善靶面的均匀辐照质量^[9-12].

采用空间匀滑方法时, 特定的CPP或LA都只

* 国家自然科学基金 (批准号: 11204043)、国家留学基金 (批准号: 201308440325) 和中国科学院高功率激光物理重点实验室开放基金 (批准号: SG-001103) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jiangxj@gdut.edu.cn

能在目标靶面获得特定大小的光斑,而在实际应用中,不同实验所需的光斑尺寸是不同的,要作光斑调整就需要更换 CPP 或 LA 元件. 大型的高功率激光装置包含多路激光,如“神光 II”有 8+1 路,“神光 III”有 64 路,改变目标光斑的尺寸需要在每条光路上都更换光学器件,耗费大量的资源和人力. 后来郑建洲和江秀娟分别提出了可调焦 LA 方案^[13,14],即用一对 LA 构成一个可调焦系统,以便在无需更换器件的情况下较为灵活地改变光斑的尺寸. 不过,与一般的透镜相比,一对 LA 的制作难度毕竟要大得多,成本也更高,若能找到更简单的调焦方法,将可进一步降低大型高功率激光系统的建造及运行成本. 事实上,目前正在使用的基本透镜列阵系统包含一个 LA 与一个主聚焦透镜(又称靶镜),它们本身已可构成调焦光学单元,只是其调焦能力尚未被深入发掘. 鉴于此,本文从两个厚透镜构成的光组出发,对基本透镜列阵系统重新进行了分析. 结果表明,改变 LA 与靶镜之间的距离即可改变靶面上光斑的大小. 文中根据“神光 II”装置的使用要求设计了一组实用的透镜列阵系统参数,并进一步对不同尺寸光斑的强度分布进行了数值模拟,详细分析了其辐照均匀性.

2 理论分析

2.1 两个厚透镜构成的光组

图 1 为 B, A 两个平凸透镜构成的光组,设光线方向为从左到右. 透镜 B 的像方焦距为 f'_B (图中未标出),物方主面 H_B 位于透镜内部,像方主面 H'_B 则与球面顶点 O_B 重合;透镜 A 的像方焦点为 F'_A ,像方焦距为 f'_A ,物方主面 H_A 与球面顶点 O_A 重合,像方主面 H'_A 则位于透镜内部^[15]. 两个透镜的相对位置用 B 的像方主面与 A 的物方主面之间的距离 s 表示. B 与 A 构成的光组的综合像方焦点为 F' ,综合像方焦距为 f' . 参考目前“神光 II”中透镜列阵系统的参数, f'_B 不小于几十米, f'_A 为米的量级,两个透镜的厚度均为几十毫米,即 $f'_B \gg f'_A \gg$ 透镜厚度,则根据几何光学相关理论的计算表明,此时光组的综合像方主面 H' 与透镜 A 的像方主面 H'_A 位置非常接近,为了简化分析,我们认为两个面重合. 光学系统的像方焦距为其像方主面到像方焦点的距离,故得到图 1 中各量的几何关系,并且有^[15]

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_A} + \frac{1}{f'_B} - \frac{s}{f'_A f'_B}. \quad (1)$$

在本文的相关讨论中,总光组的物方基点与基面不需考虑,故为了简洁起见,未在图 1 中标出. 在不至混淆的情况下,下文不再对系统的物方光学量与像方光学量做区分.

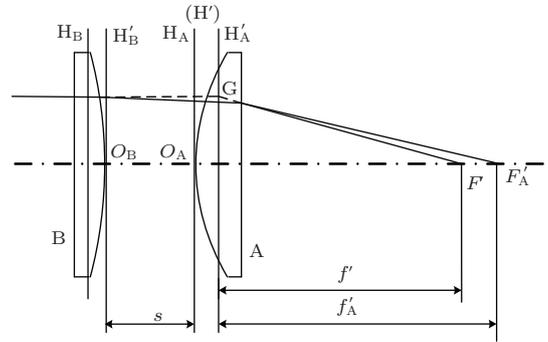


图 1 两个厚透镜构成的光组

2.2 透镜列阵系统

从图 1 所示的简单光组出发,进一步画出透镜列阵系统的结构,见图 2. B 为 LA,其总口径为 D ,包含 $M \times M$ 个透镜元(取 M 为奇数),每个透镜元口径 $d = D/M$,焦距为 f_B ; A 为靶镜,其焦距为 f_A . B 与 A 之间距离为 s . B 与 A 构成的光组综合焦距为 f ,综合焦面为 E, C 为靶面. 平行的激光束经过透镜元和靶镜后,会聚成综合焦面 E 上的一点,该点可视为点光源,其再照射于距离为 l 处的靶面,形成边长为 a 的光斑. 实际应用中 f_B 很大,而距离 s 又较小,可认为入射到 A 的光束口径与入射到 B 的大致相等,故有以下几何关系:

$$f_A = f + l, \quad (2)$$

$$\frac{d}{f} = \frac{a}{l}. \quad (3)$$

将 (1), (2) 和 (3) 式联立,可得

$$a = \frac{f_A - s}{f_B} \cdot d. \quad (4)$$

可见,在 LA 与靶镜各自的结构参数一定的情况下,改变它们之间的距离 s ,即可改变靶面上光斑的大小. 特别地,当 $s = 0$ 时,有

$$a = \frac{f_A}{f_B} \cdot d, \quad (5)$$

即简化回文献 [3] 的情形.

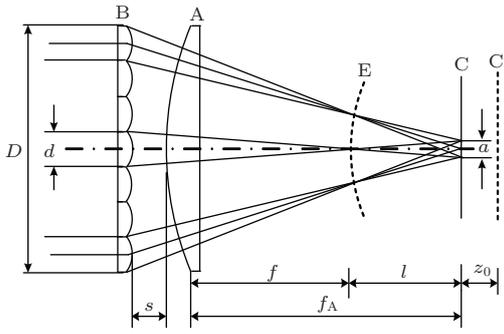


图2 透镜列阵系统结构示意图

2.3 透镜列阵系统参数的影响

LA 焦距 f_B 取不同值时, 靶面上光斑尺寸 a 随距离 s 的变化关系如图 3 所示. a 是 s 的线性减小函数, f_B 越大, 直线斜率的绝对值越小. 根据目前“神光 II”的使用条件及具体实验要求, 光斑尺寸大约需由 $600 \mu\text{m}$ 调节到 $400 \mu\text{m}$, 此种情况下取较大的 f_B 较为有利, 因为其对应的 s 值较小, 可令驱动器末端光路更为紧凑; 另外, 直线斜率的绝对值较小, 对于一定的 a 值调节范围, s 具有更大的变化量, 在实际应用时, 这意味着更好的光斑尺寸调节分辨率. 但是, f_B 的取值是受制约的, 即根据 (4) 式, 有

$$f_B \leq \frac{f_A \cdot d}{a_{\max}}, \quad (6)$$

此处, a_{\max} 为光斑尺寸调节范围的上限. 例如, 取靶镜焦距 $f_A = 1.5 \text{ m}$, 透镜元口径 $d = 50 \text{ mm}$, 则当光斑最大尺寸设为 $600 \mu\text{m}$ 时, f_B 不能大于 125 m .

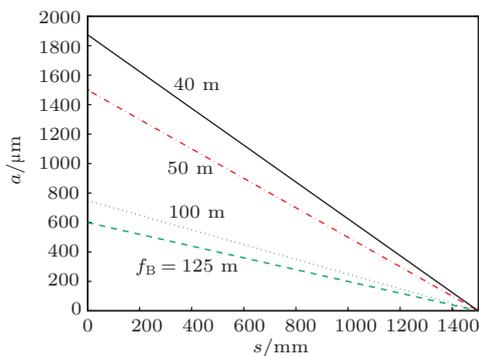


图3 (网刊彩色) LA 焦距 f_B 取不同值时, 靶面上光斑尺寸 a 随 LA 与靶镜之间距离 s 的变化关系 (靶镜焦距 $f_A = 1.5 \text{ m}$, LA 总口径 $D = 350 \text{ mm}$, 透镜元个数 7×7 , 透镜元口径 $d = 50 \text{ mm}$)

图 4 给出了靶镜焦距 f_A 取不同值时, 光斑尺寸 a 与距离 s 的关系. 这是一组平行的斜线, 光斑尺寸调节区间为 $[600 \mu\text{m}, 400 \mu\text{m}]$, 则 f_A 取较小

值时, 对应的 s 值也较小. 但从 (6) 式可知, 在其他参数一定的情况下, f_A 的取值也是受制约的, 如在图 4 中它不能小于 1.2 m .

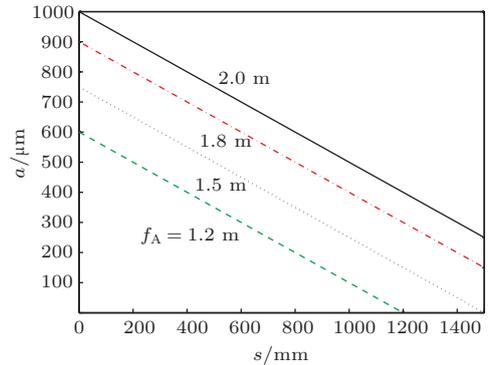


图4 (网刊彩色) 靶镜焦距 f_A 取不同值时, 靶面上光斑尺寸 a 随 LA 与靶镜之间距离 s 的变化关系 (LA 焦距 $f_B = 100 \text{ m}$, LA 总口径 $D = 350 \text{ mm}$, 透镜元个数 7×7 , 透镜元口径 $d = 50 \text{ mm}$)

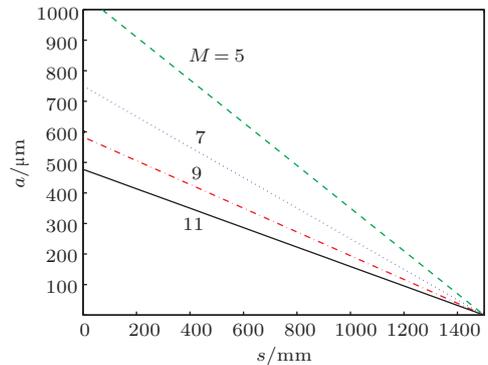


图5 (网刊彩色) 透镜元口径 d 取不同值时, 靶面上光斑尺寸 a 随 LA 与靶镜之间距离 s 的变化关系 (LA 焦距 $f_B = 100 \text{ m}$, 靶镜焦距 $f_A = 1.5 \text{ m}$)

在本文的分析中, LA 是方形的, 边长 $D = 350 \text{ mm}$, 它包含 $M \times M$ 个方形的透镜元 (M 为奇数). 当 $M = 5, 7, 9$ 和 11 时, 透镜元边长对应为 $d = 70, 50, 38.9$ 和 31.8 mm . 图 5 给出了上面几种情况下 a 与 s 的关系. 与图 3 相似, a 是 s 的线性减小函数, M 越大 (即 d 越小), 直线斜率的绝对值越小. 从几何光学的角度来看, M 越大, LA 包含的透镜元个数越多, 入射激光束被分割得越精细, 越有利于消除入射光的畸变以获得均匀辐照光斑. 但另一方面, 从物理光学的角度来看, 入射光通过 LA 后, 在靶面形成一个菲涅尔衍射的光斑包络, 同时各子光束之间发生干涉, 使得光斑内部产生大量的干涉散斑, M 越大, 透镜元口径越小, 上述的衍射与干涉效应就越明显, 这是不利于光斑均匀辐照的. 因此, M 值需要权衡以上两方面作选取, 而且根据 (6)

式, 在其他参数一定的情况下, 其取值实际也是受限的, 如在图 5 中, 若光斑尺寸上限要达到 $600\ \mu\text{m}$, 则 M 不能大于 7.

2.4 设计举例及模型的误差分析

根据上述分析及目前“神光 II”的使用条件, 一组实际可行的透镜列阵系统参数为: LA 采用平-凸面型, 口径 $D = 350\ \text{mm}$, 包含 7×7 个方形的透镜元, 透镜元口径 $d = 50\ \text{mm}$, 焦距 $f_B = 100\ \text{m}$; 靶镜采用凸-平面型, 口径为 $350\ \text{mm}$, 焦距 $f_A = 1.5\ \text{m}$. 使靶镜位置固定, 移动 LA, 当两者之间的距离在 $[300\ \text{mm}, 700\ \text{mm}]$ 区间变化时, 靶面光斑边长调节范围为 $[600\ \mu\text{m}, 400\ \mu\text{m}]$.

计算透镜列阵系统的以上光学参数时, 为了简化理论模型, 我们设定系统的综合像方主面与靶镜的像方主面重合 (见图 1), 而实际上这两个主面之间存在微小距离 Δ [15]. 例如, 采用方才的设计参数, $s = 300\ \text{mm}$ 可获得 $a = 600\ \mu\text{m}$ 的靶面光斑, 此时系统综合焦距 $f = 1.482\ \text{m}$, $\Delta \approx 4\ \text{mm}$; $s = 700\ \text{mm}$ 可获得 $a = 400\ \mu\text{m}$ 的靶面光斑, 此时系统综合焦距 $f = 1.488\ \text{m}$, $\Delta \approx 10\ \text{mm}$. 这说明, 在设定的使用条件下, 模型简化引入的设计数据系统误差很微小, 以 f 的相对误差来衡量, 其最小值为 0.3%, 最大值为 0.7%, 这在实际当中是可以忽略的.

3 靶面光斑强度分布及均匀性

上述的透镜列阵系统放置于激光驱动器的末端, 波长为 $351\ \text{nm}$ 的紫外激光通过 LA, 被分割成大量子光束, 然后被靶镜聚焦成一个很小的光斑. 如果靶面正好位于靶镜的焦平面上, 其上面形成的光场是激光束的远场, 但在 LA 的实际应用中, 为了削弱透镜元边缘衍射引起的大尺度不均匀性, 靶面通常会稍微离开靶镜的焦平面 (见图 2 中的平面 C'), 这时上面的光场就是激光束的准近场. 但无论是哪一种情形, 光束的传输都遵守菲涅耳衍射规律. 在激光的传输过程中, LA 及靶镜的作用是产生特定的空间相位调制 [16]. 为了研究靶面焦斑的光强分布, 本文用数值方法模拟了激光束的传输, 该方法在文献 [17] 中作过详细介绍.

根据上文的设计参数, 取 $M = 7$, LA 焦距 $f_B = 100\ \text{m}$, 靶镜焦距 $f_A = 1.5\ \text{m}$, 则当 $s = 300\ \text{mm}$ 时, 靶面上光斑边长为 $600\ \mu\text{m}$; 当 $s = 700\ \text{mm}$ 时, 靶面上光斑边长为 $400\ \mu\text{m}$. 我们设入射光束在空间上具有理想的六阶超高斯型强度分布, 模拟了离焦量为 $200\ \mu\text{m}$ 的靶面上的光斑, 见图 6. 两种尺寸光斑的总体特征相似, 都具有菲涅耳衍射的包络轮廓, 内部存在大量的干涉散斑. 更细致的分析显示, 干涉散斑之间的最小距离约为 $4\ \mu\text{m}$.

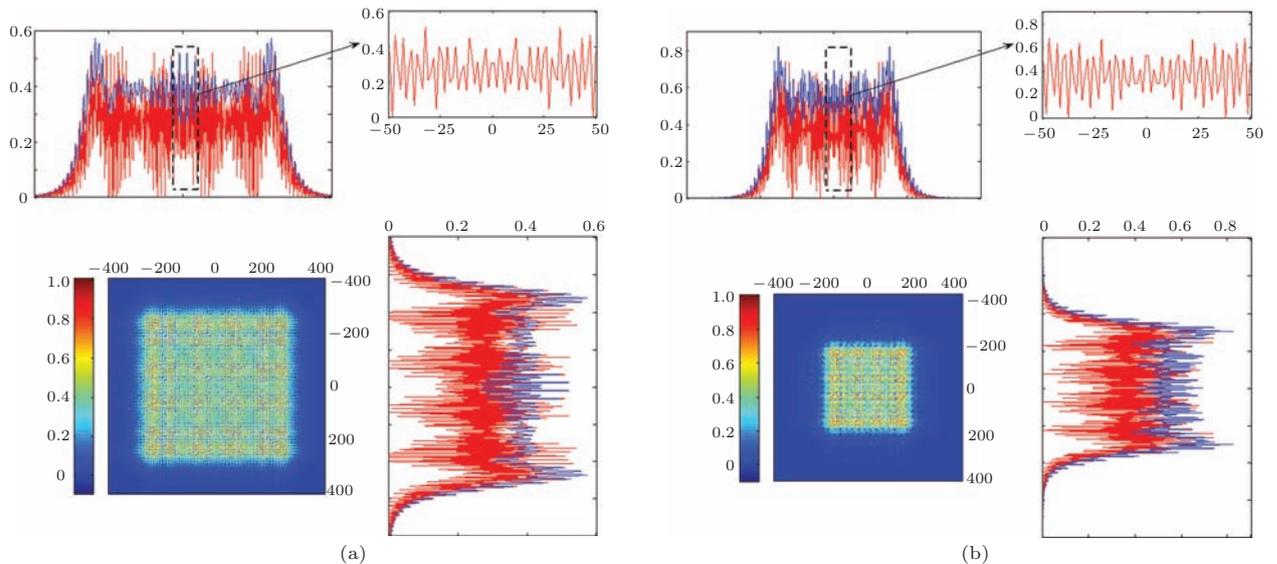


图 6 (网刊彩色) (a) 边长为 $600\ \mu\text{m}$ 的光斑强度分布; (b) 边长为 $400\ \mu\text{m}$ 的光斑强度分布 (光斑强度归一化到其最大值. 靶面离焦量为 $200\ \mu\text{m}$. 蓝线所示为滤去 $4\ \mu\text{m}$ 空间周期以下的细密条纹后的光斑包络)

我们对图6中的光斑进行了空间功率谱分析, 结果如图7(a)所示. 设光斑内部强度调制的空间周期为 λ_{SN} , 图7(a)中波数的定义为 $k_{SN} = 2\pi/\lambda_{SN}$, 且功率 P 以光斑总功率为单位进行了归一化. 为了定量地表示高频成分总功率与低频成分总功率的对比, 我们引入一个调制对比度参数 σ ^[18]为

$$\sigma(k_{SN0}) = \left[\frac{\int_{k_{SN} > k_{SN0}} P(k_{SN}) dk_{SN}}{\int_{k_{SN} \leq k_{SN0}} P(k_{SN}) dk_{SN}} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

其中 k_{SN0} 是高频与低频的转折点. σ 值越小, 说明空间频率高的成分在光斑中所占的能量比例越小, 光斑越匀滑. 由(7)式易见, σ 是转折波数 k_{SN0} (或者说转折波长 λ_{SN0})的函数, 我们据此作出图线, 见图7(b). 在转折波长小于11 μm 的阶段, σ 随转折波长递增, 其后就趋于不变了, 最明显的转折点约在 $\lambda_{SN0} = 4 \mu\text{m}$ 处, 说明光斑内部的强度调制主要集中在该空间周期以下, 这与图6中强度分析的结果是一致的. 我们可以趋于不变时的 σ 值来大致评估光斑中的高频-低频调制对比度, 则对600 μm 光斑, $\sigma = 0.64$; 对400 μm 光斑, $\sigma = 0.62$.

滤去空间周期为4 μm 以下的细密强度调制后, 可得到较为清晰的光斑包络, 见图6中蓝线所示. 在考虑光斑的使用效率与辐照均匀性时, 该包络的质量可用能量集中度及其顶部的rms不均匀度来评价^[19], 它们的定义分别为

$$\eta = \frac{\text{光强大于}0.9\bar{I}\text{部分的能量}}{\text{光斑总能量}},$$

$$\sigma_{\text{rms}}^2 = \frac{\langle (I(x, y) - \bar{I})^2 \rangle}{\bar{I}^2},$$

其中 $I(x, y)$ 和 \bar{I} 分别为光斑各点的光强及其平均值, 尖括号 $\langle \rangle$ 表示对括号内的物理量取平均. 计算可知, 600 μm 光斑的能量集中度约为78%, 其顶部400 μm 范围内 $\sigma_{\text{rms}} = 0.22$; 400 μm 光斑的能量集中度约为77%, 其顶部266 μm 范围内 $\sigma_{\text{rms}} = 0.24$.

激光聚变实验研究表明, 强度不均匀的光斑会通过自相位调制作用在等离子体中引起小尺度细丝不稳定性, 这是阻碍实验成功的关键因素之一. LA及CPP等空间匀滑方法在一定程度上提高了靶面光斑的辐照均匀性, 改善了激光与等离子体相互作用的边界条件. 但是, 使用这类方法获得的光

斑内部均存在干涉散斑, 若这些散斑被分割得越密集(也意味着分配到每个散斑的能量越小), 则对实验越有利^[2]. 因此, 光斑的均匀辐照质量需要从多方面去考量, 除了 σ , σ_{rms} 及 η 三个参数外, 干涉散斑之间的距离 λ_0 也非常重要.

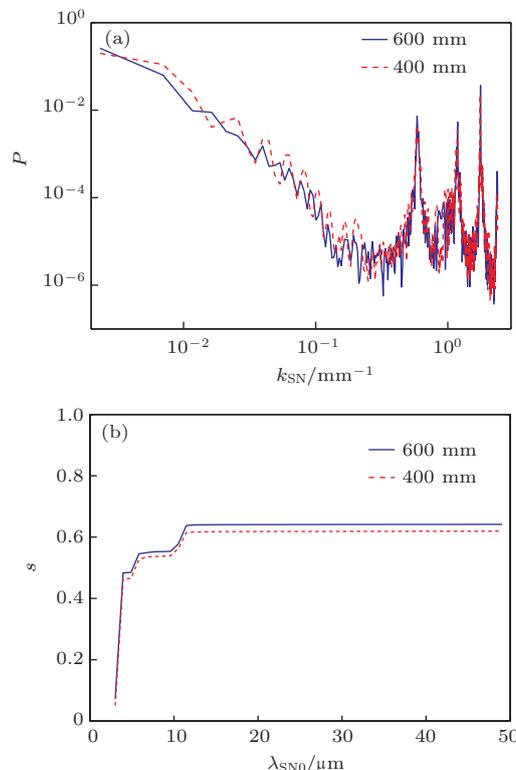


图7 (网刊彩色)(a)图6所示光斑的空间频谱图; (b)光斑调制对比度随转折空间波长 λ_{SN0} 的变化曲线

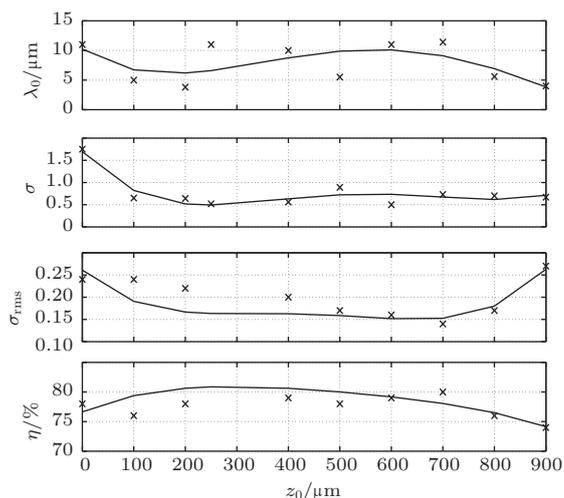


图8 光斑内部散斑间隔 λ_0 、调制对比度 σ 、顶部不均匀度 σ_{rms} 、能量集中度 η 等四个描述光斑辐照质量的参数随离焦量 z_0 的变化曲线(\times 表示从各数值结果分析得到的参数值, 据此拟合出变化曲线. 光斑大小为600 μm (400 μm 光斑的曲线走势与此一致))

上述光斑参数不仅决定于LA系统的结构参数,也受靶面离焦量的影响.选择合适离焦量的原则是:使光斑包络尽量平滑,能量集中度尽量高,光斑内部细密散斑的间距尽量小,高空间频率-低空间频率的强度调制对比度尽量低.我们进行了大量的数值计算,拟合出了光斑参数随离焦量的变化趋势曲线,见图8.每条曲线各自会有一些较佳的取值,实际应用中需要兼顾上述几个因素,仔细将靶面调到合适的位置,如在图8中,离焦量 $z_0 = 200 \mu\text{m}$ 是一个较优的取值.

4 结 论

本文对基于简单透镜列阵的均匀辐照光学系统的调焦能力进行了研究,结果表明,改变LA与靶镜之间的距离即可方便地改变靶面上光斑的大小.按照目前“神光II”装置的实际需要,设计了一组实际可行的透镜列阵系统参数,当LA与靶镜之间的距离从300 mm增大到700 mm时,光斑尺寸将从600 μm 减小到400 μm ,基本可满足装置上进行的各类实验的一般要求,又不会明显改变目前光路的排布.文中模拟了光束通过透镜列阵系统后的传输,分析了靶面光斑的强度分布,发现尺寸不同的光斑具有基本一致的强度结构特征.定量地评价了光斑的均匀辐照表现,并研究了靶面离焦量对相关评价参数的影响.结果表明,若选择较佳的离焦量,光斑内部散斑间隔可小至5 μm 左右,高空间频率-低空间频率的强度调制对比度可低至0.5左右,强度包络顶部(约占光斑总面积的4/9)的rms不均匀度约0.15,光斑的能量利用率可高于80%.若将该可调焦透镜列阵系统与SSD等时间匀滑方法配合使用,将可进一步改善靶面光斑的均匀辐照质量.

目前在“神光II”装置中使用的LA的构成单元有方形与六角形两种,本文的研究是基于方形透镜元进行的,但总体设计与分析原则同样适用于六角形的情形.文中分析靶面光斑的强度分布时,未考虑实际入射光束存在的强度与相位畸变,但已有的研究表明,采用LA时,光束畸变不会对光斑强度分布产生明显的影响.将这种基于简单透镜列阵的均匀辐照光学系统应用于大型激光驱动器装置,可观地节约装置的建造及运行成本.实际应用时,通过计算机自动控制,可精准地调整系统中相关光

学元件的位置,获得所需的光斑尺寸.本文所得结果可推广到激光加工等工业应用领域.

作者感谢上海光学精密机械研究所范薇、华能与王利提供的帮助.

参考文献

- [1] Skupsky S, Lee K 1983 *J. Appl. Phys.* **54** 3662
- [2] Lin Z Q, Lei A L, Fan W, Zhou S L, Wang L 2013 *High Power Laser Science and Engineering* **1** 110
- [3] Deng X, Liang X, Chen Z, Yu W, Ma R 1986 *Appl. Opt.* **25** 377
- [4] Lin Y, Kessler T J, Lawrence G N 1996 *Opt. Lett.* **21** 1703
- [5] Li J L, Lu B D 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1840
- [6] Yao X, Gao F H, Zhang Y X, Wen S L, Guo Y K, Lin X D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3130 (in Chinese) [姚欣, 高福华, 张怡霄, 温圣林, 郭永康, 林祥棣 2009 物理学报 **58** 3130]
- [7] Jiang S E, Zhang B H, Liu S Y, Yang J M, Sun K X, Huang T X, Ding Y K, Zheng Z J 2007 *Scientia Sinica G* **37** 502 (in Chinese) [江少恩, 张保汉, 刘慎业, 杨家敏, 孙可煦, 黄天暄, 丁永坤, 郑志坚 2007 中国科学G辑 **37** 502]
- [8] Cheng W Y, Zhang X M, Su J Q, Zhao S Z, Li P, Dong J, Zhou L D 2009 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11** 015709
- [9] Skupsky S, Short R W, Kessler T, Craxton R S, Letzring S, Soures J M 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 3456
- [10] Jiang X J, Zhou S L, Lin Z Q, Zhu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5824 (in Chinese) [江秀娟, 周申蕾, 林尊琪, 朱俭 2006 物理学报 **55** 5824]
- [11] Zhang R, Li P, Su J Q, Wang J J, Li H, Geng Y C, Liang Y, Zhao R C, Dong J, Lu Z G, Zhou L D, Liu L Q, Lin H H, Xu D P, Deng Y, Zhu N, Jing F, Sui Z, Zhang X M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 054204 (in Chinese) [张锐, 李平, 粟敬钦, 王建军, 李海, 耿远超, 梁樾, 赵润昌, 董军, 卢宗贵, 周丽丹, 刘兰琴, 林宏奂, 许党朋, 邓颖, 朱娜, 景峰, 隋展, 张小民 2012 物理学报 **61** 054204]
- [12] Jiang X J, Li J H, Wu R, Zhu Z T, Zhou S L, Lin Z Q 2013 *J. Opt. Soc. Am. A* **30** 2162
- [13] Zheng J Z, Yu Q X, Lu Y J, Guan S H 2007 *Chin. J. Laser.* **34** 331 (in Chinese) [郑建洲, 于清旭, 卢永军, 关寿华 2007 中国激光 **34** 331]
- [14] Jiang X J, Li J H, Li H G, Li Y, Lin Z Q 2011 *Appl. Opt.* **50** 5213
- [15] Yu D Y, Tan H Y 2006 *Engineering Optics* 2nd ed. (Beijing: China Machine Press) p27 (in Chinese) [郁道银, 谈恒英 2006 工程光学第二版 (北京: 机械工业出版社) p27]
- [16] Goodman J W 1968 *Introduction to Fourier Optics* 1st ed. (San Francisco: Mcgraw-hill Book Company) p83
- [17] Jiang X J, Zhou S L, Lin Z Q 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 023109

[18] Regan S P, Marozas J A, Craxton R S, Kelly J H, Donaldson W, Jaanimagi R P A, Jacobs-Perkins D, Keck R L, Kessler T J, Meyerhofer D D, Sangster T C, Seka W, Smalyuk V A, Skupsky S, Zuegel J D 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 9982

[19] Qiu Y, Qian L J, Huang H Y, Fan D Y, Deng X M 1995 *Chinese Journal of Lasers* **22** 27 (in Chinese) [丘悦, 钱列加, 黄宏一, 范滇元, 邓锡铭 1995 *中国激光* **22** 27]

Study on a zooming optical system based on simple lens array used for laser uniform irradiation*

Jiang Xiu-Juan^{1)†} Li Jing-Hui²⁾ Zhu Jian³⁾ Lin Zun-Qi²⁾

1) (*School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China*)

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

3) (*Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China*)

(Received 30 July 2014; revised manuscript received 24 August 2014)

Abstract

A zooming optical system based on a simple lens array used for uniform irradiation by a large-aperture laser is studied; and it can be shown that the size of target spot may be flexibly adjusted by changing the separation between the lens array and the focusing lens. How the choice of optical parameters will affect the zooming ability is analyzed, and a practical system is designed. Propagation of laser beam through the optical system is simulated numerically; results show that the spots in different size are similar in intensity structure. Speckle separation, modulation contrast, rms nonuniformity, and concentration ratio of the spot are quantified, and their variations are analyzed when the target is placed in different positions relative to the focal plane of the focusing lens.

Keywords: high-power laser driver, uniform irradiation, lens array, zooming

PACS: 42.25.Bs, 42.30.Kq

DOI: [10.7498/aps.64.054201](https://doi.org/10.7498/aps.64.054201)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11204043), the Scholarship Fund of China (Grant No. 201308440325), and the Open Fund of Key Laboratory for High Power Laser Physics of Chinese Academy of Sciences (Grant No. SG-001103).

† Corresponding author. E-mail: jiangxj@gdut.edu.cn