

高功率激光聚焦均匀照明靶面的验证

梁向春 陈泽尊 邓锡铭

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

由正六边形的球面透镜列阵和一个非球面的主聚焦透镜组成的聚焦系统, 用于改善高功率激光 (10^{12} W) 聚焦照明靶面的均匀性, 得到实验上的证明。文中报道了采用这个聚焦系统进行的激光驱动高压冲击波实验, 显示出了均匀照明对改善激光冲击波平面性的良好的效果。

关键词: 高功率激光; 正六边形透镜列阵; 均匀照明靶面。

一、引 言

随着激光等离子体物理实验的进一步发展, 对高功率激光聚焦均匀照明靶面的要求愈来愈迫切。为此作者曾开展了研究探索工作, 提出了一种透镜列阵的聚光方法^[1~2]。文献[1]描述的透镜列阵的单元是圆形的平凸球面镜, 当把这些圆形透镜用光胶粘在光学平板上构成透镜列阵时, 由于透镜之间的空隙充满了胶合物成为不透光的部分, 带来6%左右的激光能量损耗。文献[2]发表后, 引起国外同行学者的注意, 并称之为中国的方法。其特点是实现了均匀的准近场大焦斑(直径 $\sim 400\ \mu\text{m}$), 焦斑边缘的光强按指数迅速衰减为零, 特别适用于激光驱动高压冲击波实验的物理研究。国外一些实验室提出了各种办法获得均匀焦斑, 日本的大阪大学采用无规位相板技术^[3], 美国的海军实验室采用透射或反射式阶梯镜技术^[4, 5], 法国的里梅耳(Limeil)中心则采用宽带振荡器和多模阶跃折射率光纤技术^[6], 他们的共同特点都是减少或破坏激光空间相干性去实现均匀的远场焦斑, 获得了成功的实验结果, 只是在主焦斑外还有较弱的光强衍射分布。

本文报道用改进后的正六边形透镜列阵和主聚焦透镜组合的聚焦系统去实现靶面的均匀照明, 并在高功率玻璃激光等离子体物理实验中得到验证。

二、聚焦系统结构和设计参数

在激光靶室中, 非球面主聚焦透镜的前方置一正六边形平凸透镜列阵, 构成聚焦系统。正六边形透镜列阵的排布如图1所示, 由于相互靠紧的结构使得相邻透镜之间的缝宽小于 $20\ \mu\text{m}$, 因此该透镜列阵对激光能量的损失很小, 约为千分之一。聚焦系统的参数为非球面主聚焦透镜: 口径 D 为200 mm, 焦距 F 为340 mm, 正六边形平凸球面透镜: 口径 d 为30 mm(正六边形中两平行边之间的距离), 焦距 f 为18,000 mm, 同心度 $\theta < 10''$, 焦距一致

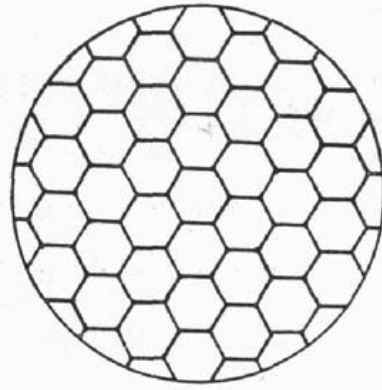


Fig. 1 Arrangement of the regular hexagon lens array

性($\Delta f/f$) $\leq 1.5 \times 10^{-2}$ 。靶面几何光斑直径 $\delta = (Fd/f) \approx 560 \mu\text{m}$ 。

值得说明的是, 如果列阵单元透镜的同心度加工极好($\theta \leq 5''$), 会使小透镜在焦面上的费涅耳衍射花样完全重叠, 导致焦斑光强的大尺度光强起伏。所以在加工六边形透镜时, 必须考虑到这个问题, 降低了同心度的要求, 改为 $\theta \leq 10''$, 其效果明显好转, 消除了焦斑内的衍射环, 减少了大尺度的光强起伏, 对光照均匀性更为有利。

有关该聚焦系统能改善靶面照明均匀性的原理已在文献[1, 2]中有详述, 此处不再重复, 这里我们主要介绍一些有价值的实验结果。

三、实验结果

1. 均匀焦斑的图象显示

采用单模输出的连续 YAG 器件作为光源, 经 1:100 扩束镜后输出口径为 200 mm, 波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的激光束, 通过正六边形透镜列阵和主聚焦透镜的组合聚焦系统后, 获得的焦斑图象如图 2 所示。图 2 是把聚焦系统的焦面上的焦斑经放大成像后所拍摄的。显然, 除焦斑边缘有硬边衍射外, 焦斑的绝大部分是均匀的。采用硅靶管二维图象显示仪, 对图 2 的焦斑进行了测量, 得到了焦斑的两维光强分布如图 3 所示, 焦斑有一个平顶的光强分布区域。进一步的定量测量采用 FC 数字图象处理系统, 对焦斑进行等密度线处理, 结果如图 4

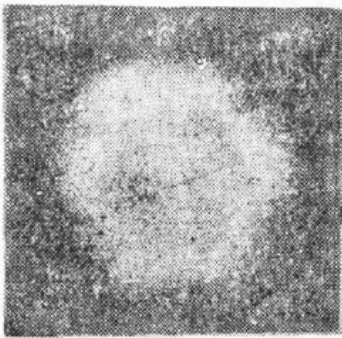


Fig. 2 Focal spot
(diameter: $560 \mu\text{m}$)

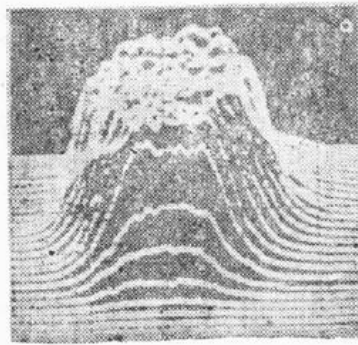


Fig. 3 Two-dimensional intensity
distribution on the focal spot

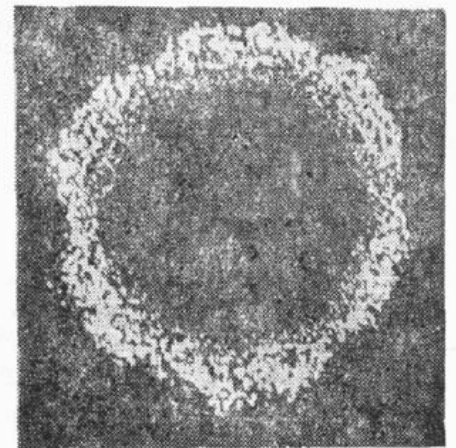


Fig. 4 Equal density line
distribution (flat top diameter:
 $400 \mu\text{m}$)

所示,其中等密度区范围的直径约为 $400\ \mu\text{m}$ 。

为了说明该聚焦系统对焦斑均匀化的明显作用,将一束光强近场分布极不均匀的光束,只通过主透镜聚焦,没透列阵时其焦斑的一维光强分布如图 5(a) 所示,光强的调制度高达 $\pm 45\%$ 。而当把正六边形透列阵置入聚焦系统后,则焦斑光强起伏明显减小,如图 5(b) 所示,光强调制度仅为 $\pm 10\%$ 。说明在入射光束近场分布均匀性很差的情况下,经透列阵的聚焦系统仍然可以在焦面上得到大焦斑范围内均匀平滑的照明效果。

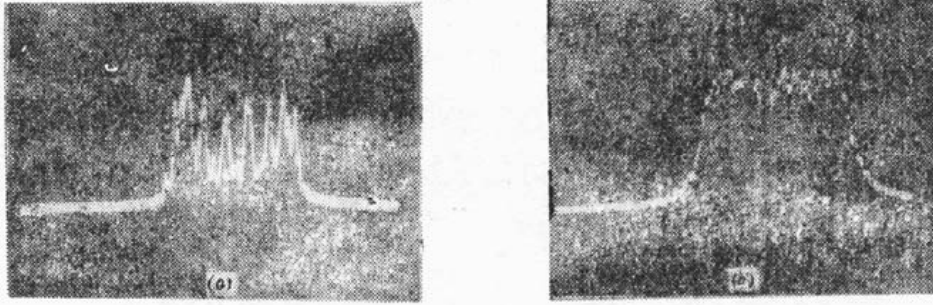


Fig. 5 One-dimensional intensity distribution on the focal spot

- (a) Without the lens array (at the difocal plane, the spot diameter is the same as that in b);
 (b) With the lens array (at the focal plane)

2. 靶面均匀照明的实际验证

正六边形透列阵与主聚焦透镜组合的聚焦系统已成功地用于激光输出功率高达 $10^1\ \text{W}$ 的 LF-12 激光装置的靶室上,使得那些要求均匀照明靶面的激光与物质相互作用的物理课题能够顺利地展开。

(a) 调焦位置的灵敏度

在用高功率激光束打靶之前,通常先用低功率激光束(靶面功率密度为 $(1\sim 2)\times 10^{12}\ \text{W}/\text{cm}^2$) 考察该聚焦系统对调焦位置的灵敏度。把一个带小孔的铜片靶置于焦面和离焦位置上,测试透过能量的百分比,以判断允许的调焦位置的变化范围。考虑到焦前,焦后的焦斑基本上是对称的,所以选用两种尺寸的小孔靶,完成一个量程(从焦前到焦后)的测量。表 1 是一组实测数据。从表 1 测量数据显见,调焦位置若以焦面为零点,在焦点前后 $150\ \mu\text{m}$ 范围内,能量透过率没明显变化,说明该聚焦系统对调焦精度的要求比单独使用非球面靶镜时要宽容得多,这就使调焦方便了。

(b) 激光冲击波发光信号面型变化

在激光驱动高压冲击波的实验中^[7],靶面均匀照明获得了非常好的的效果。激光与平面铝箔靶的相互作用实验是在激光波长 λ 为 $1.05\ \mu\text{m}$,激光脉宽为 $1.2\ \text{ns}$ 左右,激光束末

Table 1

Focal plane position	$-300\ \mu\text{m}$	$-150\ \mu\text{m}$	0	$150\ \mu\text{m}$	$300\ \mu\text{m}$
Transmissivity of energy $\phi=530\ \mu\text{m}$			75%	73%	64%
Transmissivity of energy $\phi=400\ \mu\text{m}$	31%	33%	35%		

级输出能量为 500 J 左右的情况下进行的,靶面激光功率密度为 $(1\sim 2)\times 10^{14}$ W/cm²。用扫描相机拍摄到了清晰的靶背面的冲击加热发光信号。实验表明:在入射激光条件基本相同的情况下,用单独的非球面主聚焦透镜和插入正六边形透镜列阵的组合聚焦系统分别打靶,获得的激光冲击波发光信号的扫描相机记录有明显的不同,如图 6 所示。图中右边狭长的竖直信号是光纤引进的时间参考信号。当只采用非球面主聚焦透镜打靶时,为了得到同样的大焦斑尺寸,将靶置于离焦位置,获得如图 6(a)所示的结果,此时激光冲击波发光信号的前沿呈凸面型,中间超前,两侧滞后,这种形状的激光冲击波不能满足高压状态方程的实验测量的要求。当采用正六边形透镜列阵与主聚焦透镜组合聚焦系统聚光打靶时,获得如图 6(b)所示的结果,说明靶面光强均匀时,冲击波的压力一致,显示了相当好的平面型激光冲击波,这是均匀照明靶面的最有说服力的证明。实现了这一步,就能使激光高压状态方程的实验测量成为可能,从而获得一系列的有价值的实验结果。

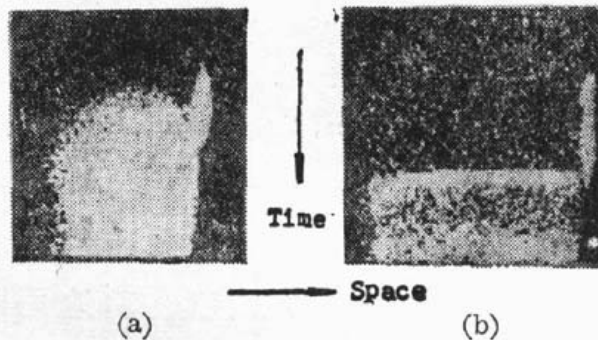


Fig. 6 Luminescence signal at the back surface of aluminium foil obtained by the streak camera

- (a) Only principal focusing lens;
 (b) Principal focusing lens with an regular hexagon lens array

感谢 LF-12 装置运行组全体人员的大力支持和配合,感谢中国工程物理研究院有关人员的合作,感谢上海光机所光学车间在制作正六边形透镜时所做的努力,使精度达到相当高的水平。

参 考 文 献

- [1] 邓锡铭,梁向春等;《中国激光》,1985, 12, No. 5 (May), 257.
 [2] X. Deng, X. Liang *et al.*; *Appl. Opt.*, 1986, 25, No. 3 (Feb), 377.
 [3] Y. Kato, K. Mima *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1984, 53, No. 11 (Sep), 1057.
 [4] R. H. Lehmborg, S. P. Obenschain; *Opt. Commun.*, 1983, 46, No. 1 (Jun), 27.
 [5] S. P. Obenschain, J. Grun *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1986, 56, No. 26 (Jun), 2807.
 [6] D. Veron, H. Ayrat *et al.*; *Opt. Commun.*, 1988, 65, No. 1 (Jan), 42.
 [7] 顾 援,倪元龙等;《物理学报》, 1988, 37, No. 10 (Oct), 1690.

Demonstration of uniform illumination on target by focusing high power laser beam

LIAG XIANGCHUN, CHEN ZEZUN AND DENG XIMING

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

(Received 24 April 1991; revised 30 May 1991)

Abstract

The effect of a focusing system which is composed of a spherical regular hexagon lens array and an aspherical principal focusing lens used for improving the illumination uniformity of the high power laser on the target surface has been demonstrated experimentally. We report here a excellent result that the flatness of the laser driven shock wave was improved obviously when this focusing system was used at laser beam power of 10^{12} W.

Key words: high power laser , regular hexagon lens array, uniform illumination target surface.