

文章编号: 0258-7025(2005)08-1110-03

# 列阵透镜对能量测量影响的分析

欧阳小平<sup>1</sup>, 竺庆春<sup>1</sup>, 朱宝强<sup>1</sup>, 马伟新<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup> 上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

**摘要** 结合列阵透镜的透过率分析了其后的光场分布。列阵透镜由多个列阵元拼接而成,用以改善主透镜焦点附近能量分布的均匀性。列阵透镜在提高辐照均匀性的同时,给能量测量带来了不利的影响。这是由于经过列阵元的相邻子光束会产生干涉,干涉条纹处的激光能量密度和功率密度相应都大为增加,其数值在干涉区域中心处能上升到原来的 4 倍。更高的能量密度和功率密度对能量计提出了更苛刻的要求。在没有采取适当措施的时候使用,就会损坏能量计。

**关键词** 激光技术;高功率激光;激光能量计;列阵透镜

**中图分类号** TN 247 **文献标识码** A

## Analysis About Affection of Lens Array on Energy Measurement

OUYANG Xiao-ping<sup>1</sup>, ZHU Qing-chun<sup>1</sup>, ZHU Bao-qiang<sup>1</sup>, MA Wei-xin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
<sup>2</sup> Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China

**Abstract** The distribution of optical field passing through lens array is analyzed. Lens array consists of many array units, which can improve energy distribution uniformity around the focus of main lens. Lens array improves illumination, but it brings bad affection to energy measurement. The reason is that intervention will happen between sub-beams after the array units, thus energy density and power density of laser on the interference stripes will increase sharply. Its value will augments to four times contrasting to former one. The higher energy and power need more severe criteria to calorimeter. If proper means is not taken in use, calorimeter will be destroyed.

**Key words** laser technique; high power laser; laser calorimeter; lens array

## 1 引 言

在高功率激光实验中,列阵透镜用来实现对靶面的均匀辐照,能使二维多光束干涉斑纹更密,有利于均匀性及满足实验的要求<sup>[1~5]</sup>。然而,这些干涉条纹会对能量测量产生影响。因为,为了在物理实验中确定激光通过列阵透镜及靶镜的损耗,要求使用大口径能量计测量激光能量。这时,为实现靶面均匀辐照而放入光路中的列阵透镜产生的干涉条纹,就会影响能量计的测量结果。而且,经过干涉增强的高功率激光,容易使光路中的光学元件以及能量计中的吸收体产生破坏。为了找到能量计损坏原因,避免类似破坏的产生,需要分析列阵透镜对能量测量的影响。

## 2 实验装置及理论分析

在高功率实验中,用激光能量计来测量光束能量,如果使用不当,就有可能造成能量计的损坏。当能量计损坏后,为找到损坏原因进行了初步分析,发现和以往相比,条件改变的只是列阵透镜在光路中的放入。因此本实验也在神光 II 上进行,探讨列阵透镜对能量测量的影响。

实验装置如图 1 所示。激光束首先通过列阵透镜,经列阵透镜的调制后进入靶室。靶室内光路上的两块主透镜共焦放置。打靶实验时,调制后的各子光束分别在主透镜的焦前会聚,然后投射到主焦点附近区域,实现靶面均匀辐照。测量透镜损耗时靶室内不放靶,光束经由共焦放置的另一块主透镜

收稿日期:2004-08-10;收到修改稿日期:2005-01-24

作者简介:欧阳小平(1980—),男,湖北襄樊人,中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生,主要从事高功率激光诊断测试方面的研究。E-mail:oyxp@mail.ustc.edu.cn

出射。所以分析列阵透镜对测量损耗的影响,需要模拟损耗时的光路进行实验。在第二块主透镜后放置场图纸,用以观察出射的高功率激光能量分布。

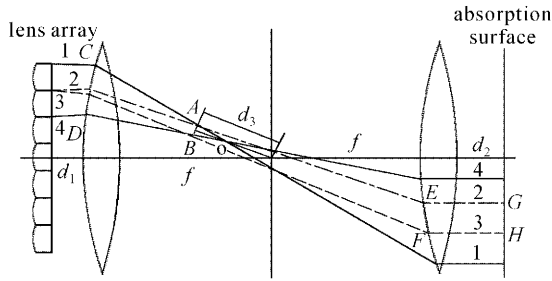


图1 系统结构图

Fig. 1 Configuration of the system

当不放置列阵透镜时,平行光束经过共焦的两块透镜后,仍然平行出射。光路中放入列阵透镜后,出射光会有所改变。下面的分析中,将两块主透镜近似为薄透镜进行处理。

图1中,1~4分别为相临两个列阵元的边缘光束, $f$ 表示主透镜焦距。可以看出,会聚在组合焦点上的各子光束,离开组合焦点后将相交,符合干涉产生条件。实验中,列阵元焦距 $f_i = 38850$  mm,主透镜焦距 $F = 750$  mm, $d_1 = 300$  mm, $d_2 = 350$  mm,计算得到 $d_3 = F^2 / (F + f_i) = 14.205$  mm。现在以第二、三两块列阵元为例,分析两块相临的列阵元出射的子波,它们聚焦在主透镜焦平面前的A、B两点。假设A、B两点为光源,经过第二块主透镜后,由透镜公式 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 可得像距 $v = 40348.733$  mm, $v \gg u$ 。这是由于列阵元的焦距远大于主透镜焦距,因而可以认为系统对激光束的发散作用很小,未能经第二块主透镜出射的激光相对来说很少,且将经由第二块主透镜出射的激光仍视为平行光,传播到吸收体玻璃表面处的激光束近似为平行光出射,相邻的两子波面之间将发生干涉。经近似计算,可知透镜后350 mm处的相干区域宽度近似为1 mm。

取列阵透镜主轴方向为 $z$ 方向,垂直于主轴方向为 $xy$ 平面。在 $xy$ 平面中只考虑 $x$ 方向,计算它们的光程差。主透镜的透过率为

$$t = \exp\left(-jk \frac{x^2 + y^2}{2f}\right),$$

列阵透镜的透过率为<sup>[6]</sup>

$$t = \exp\{j[k\delta_i S(n-1) + \psi]\} \times \exp\left[-jk \frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{2f_i}\right],$$

式中 $S = (x-x_i)\cos\alpha_i + (y-y_i)\sin\alpha_i$ , $i$ 为列阵元序号,中心处 $i$ 为0, $x_i, y_i$ 为各个列阵元中心的坐标, $n, f_i, \delta_i, \alpha_i, \psi_i$ 分别为列阵元的折射率、焦距、劈角、劈角取向和厚度变化产生的相位差, $j$ 为虚数单位, $k$ 为驱动激光的波矢。对于第二块列阵元,中心位置 $x_2 = 32.6 \times 2.5$  mm,第三块列阵元的中心位置 $x_3 = 32.6 \times 3.5$  mm。列阵元的厚度变化引起的相位变化 $\psi_i$ 是一个二阶小量,故在此忽略。

在能量接收面处坐标用 $x'_2$ 表示。通过计算,到达能量计接收面同一位置的两束激光的光程差为 $\Delta = 0.7894 \times 10^{-3} x'_2 + C$ ( $C$ 为常量)。

在干涉区域,亮条纹处符合 $\Delta = 0.7894 \times 10^{-3} x'_2 + C = n\lambda$ ,暗条纹处符合 $\Delta = 0.7894 \times 10^{-3} x'_2 + C = (n + \frac{1}{2})\lambda$ ,条纹间距为

$$e = 0.512 / 0.7894 = 0.65 \text{ mm}.$$

由光的波动性可以知道,对于相干成像系统,像面上复振幅分布是各复振幅的线性叠加。所以干涉条纹的强度为

$$I' = E(x)E^*(x) = 4A^2[\cos(\delta/2)]^2 \leq 4I,$$

式中 $\delta$ 为两束相干光的相位差。

同时,光强又受到填充因子影响。填充因子是用来描述激光近场分布均匀性的一个参量。近场填充因子的计算为:填充因子=平均值/最大值,激光系统稳定状态时填充因子在0.5附近。没有列阵透镜的光路中,近场仪采集到的激光的近场图像(伪彩色)如图2所示。

神光II输出的激光束具有特殊性,中间被圆屏和杆挡住而没有光,光束的能量分布是不均匀的。近场测量软件中平均值的计算是以所选矩形的内切圆为取样区域 $S'$ ,即图2中光斑内圆形和矩形部分,可以认为是图2中光斑外缘所在的圆,面积为 $S$ 。所

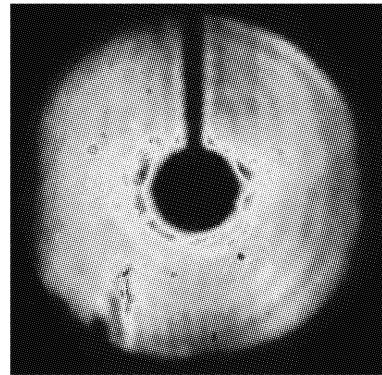


图2 近场图像

Fig. 2 Image of near field

以在这里分析光强分布时,需要扣除中心圆球和档杆所遮挡的面积。

经过计算得到其换算系数为  $k = S/S' = 1.113$ 。

### 3 实验结果及数据分析

经过实验,得到了经过列阵透镜的激光在第二块透镜出射后产生的场图(图3)。图3(a)中,较长的线是六角形列阵元的边缘留下的轮廓。对比没有列阵透镜的场图3(b),可以发现,相邻两块列阵元之间,激光在场图纸上留下了细密的明暗条纹。

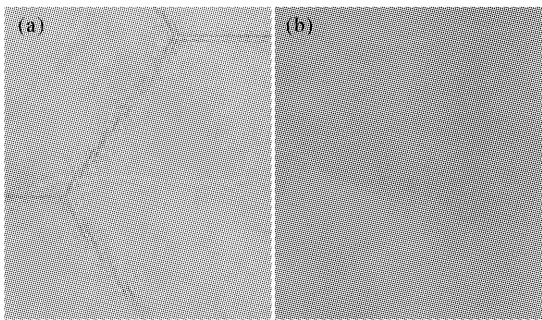


图3 有列阵透镜(a)和无列阵透镜(b)的部分场图纸  
Fig. 3 Part of burn-paper pattern with lens array (a) and without lens array (b)

假设这是由纸本身造成的,可能会有两种原因:

1) 纸的缺陷是均匀分布的,这样条纹就会等概率地分布于纸的所有区域;2) 纸的缺陷是局部情况,这样产生的条纹就只是无规则地随机出现。而现在的情况是,条纹有规律地出现在列阵元像的区域,所以排除了纸本身的原因。因此,这些条纹是由于列阵透镜的周期性分布结构引起的。

经过测量,得到干涉区域宽 1 mm,条纹间距 0.6 mm,与理论分析的结果吻合。

实验中,入射到吸收体上 2 倍频能量为 282 J,脉宽 830 ps,由此产生的单位面积上能量平均值为  $E = 282/S' = 0.756 \text{ J/cm}^2$ ,平均光强度  $I = E/t = 0.756/0.83 \times 10^{-9} = 0.91 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ ,因为填充因子通常接近 0.5,所以取 0.5 计算,有  $E_{\max} = E/(0.5 \times 1.113) = 1.364 \text{ J/cm}^2$ ,干涉后  $E' = 4E_{\max} = 5.456 \text{ J/cm}^2$ ,  $I_{\max} = I/(0.5 \times 1.113) = 1.64 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ ,干涉后  $I' = 4I_{\max} = 6.56 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ ,而能量计的功率负载密度为  $10 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ ,能量负载密度为  $5 \text{ J/cm}^2$ [7]。干涉后的激光束,能量密度超出了能量计的承受能力,功率密度也接近了能量计的损坏阈值,所以强区所在的区域产生的干涉都

会造成吸收体玻璃的破坏。

### 4 结 论

在高功率激光实验中,光学元件非工作表面通常是做成一定楔角或布儒斯特角以减少干扰。测量能量时,需要先估算光路上的能量大小,再用合适的能量计来测量。但有时会忽略某个光学元件引起的干涉,以致降低能量测量的灵敏度,严重的会破坏能量计。使用列阵透镜的目的是为了提高靶面上的辐照均匀度,但它同时也为能量测量带来了挑战。为了能够测量带有列阵透镜的能量损耗,可采取的措施有:一是通过工艺革新,制造更大接收功率、破坏阈值更高的能量计,二是在能量计前放置能承受高功率激光、性能稳定的滤光片。对于主光路中的直接测量来说,前者可靠性可能会更好。

致谢 感谢邵平、华能、沈卫星等在实验中提供的帮助。

### 参 考 文 献

- Deng Ximing, Liang Xiangchun, Chen Zezun *et al.*. Uniform illumination of large focal targets using a lens array [J]. *Chinese J. Lasers*, 1985, **12**(5):257~260  
邓锡铭,梁向春,陈泽尊等. 用列阵透镜实现大焦斑面的均匀照射[J]. *中国激光*, 1985, **12**(5):257~260
- Chen Zezun, Liang Xiangchun, Deng Ximing. Computer analysis by lens array for uniform illumination [J]. *Chinese J. Lasers*, 1986, **13**(2):65~70  
陈泽尊,梁向春,邓锡铭. 用透镜阵聚焦实现均匀辐照的计算机分析[J]. *中国激光*, 1986, **13**(2):65~70
- Qiu Yue, Qian Liejia, Huang Hongyi *et al.*. Improve illumination uniformity by suppressing the diffraction of a lens array [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(1):27~31  
丘悦,钱列加,黄宏一等. 用消衍射方法改善透镜阵列的辐照均匀性[J]. *中国激光*, 1995, **A22**(1):27~31
- Fu Sizu, Sun Yuqin, Huang Xiuguang *et al.*. Optimizing design for uniform irradiation system on target surface of "Shengguang-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
- Fu Sizu, Huang Xiuguang, Wu Jiang *et al.*. Planarity and stability of shock driven directly by multi-beam laser from "Shengguang-II" laser facility [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(6):570~574  
傅思祖,黄秀光,吴江等. 利用"神光-II"激光装置多路光束叠加直接驱动下的冲击波平面性及稳定性[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(6):570~574
- Huang Xiuguang, Sun Yuqin, Zhou Guanlin *et al.*. Experiment test and improved design of lens array uniform illumination system [C]. *Collection of Theses on High Power Laser and Plasma Physics*, Shanghai, 2000. 177~182  
黄秀光,孙玉琴,周关林等. 列阵透镜均匀照明系统的实验考核与改进设计[C]. *高功率激光及等离子体物理研究论文集*, 上海, 2000. 177~182
- Lin Kangchun, Tian Li, Shen Liqing *et al.*. Large calibre calorimeter for measuring 3 $\omega$  energy in black cavity on "Shengguang-II" facility [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1999, (Suppl.):83~85  
林康春,田莉,沈丽青等. 用于测量"神光II"装置进黑腔靶 3 $\omega$  激光能量的大口径能量计[J]. *激光与光电子学进展*, 1999, (增刊):83~85