

一种重构高功率激光束波前的方法*

陈 哲 胡永明 常胜利 曾 淳 刘泽金

(国防科技大学应用物理系, 长沙 410073)

张小民 郑万国

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 成都 610003)

摘 要 介绍一种对“星光” 10^{12} W 高功率激光器的波前相位进行重构测量的研究方法. 实验中, 对高功率激光束经过孔阵列相位传感器在像纸上烧蚀成的光斑阵列进行图像处理, 测定各光斑光强中心及相对位移, 再由理论分析得到实用的迭代算法公式, 重构出高功率激光束波前. 此方法用计算机软件实现了常规哈特曼-沙克(Hartmann-Shack)传感器中子透镜阵列的子光束聚焦过程, 可直接测量高功率大光束直径激光束的波前. 文中给出了这种重构波前方法的基本原理和实用的重构公式. 利用此方法在“星光”高功率激光器上进行了重构波前实验, 最大可测激光束直径为 $\Phi 200$ mm, 波前重构分辨率约为 $\lambda/5$.

关键词 高功率激光, 波前重构, 图像处理, 衍射光斑.

1 引 言

在 10^{12} W 以上的高功率激光装置中, 由于光学材料的不均匀、光学材料中的热效应、以及光学元件加工精度的限制等误差原因, 会使高功率激光器输出激光束的波前相位发生畸变, 波前相位畸变将影响激光束的聚焦和远场传输性能^[1]. 研究激光束的波前相位的畸变的实验工作, 是分析激光装置中相位误差、提高系统性能的重要手段. 在研究激光束质量的实验工作中, 常用哈特曼-沙克波前传感器来测量重构激光束的相位波前^[2-3]. 以哈特曼-沙克波前传感法重构波前的关键, 是用 CCD 阵列或四象限探测器来测量经微透镜聚焦后的小孔衍射像的中心位置, 这种方法由于微透镜要求加工精度高、透镜阵列平行度校准困难、透镜阵列几何尺寸小等问题, 使得成本很高, 使用不太便利; 特别是, 当研究的是高功率激光束时, 会出现激光损伤问题, 但如加入衰减板, 则可能会带来附加相位的影响.

为了能方便、可靠地测量 10^{12} W 以上的高功率激光束的波前相位面, 特别是大光束直径激光束的波前, 可以在高功率激光束光路中应用孔阵列相位传感器^[4], 直接用像纸对小孔衍射像曝光, 在像纸上烧蚀成衍射光斑阵列, 如图 1 所示; 然后用扫描仪输入像纸上的衍射光斑阵列图像, 再用计算机对图像进行处理^[6], 用计算机软件实现常规哈特曼-沙克传感器中子

* 中国工程物理研究院科学技术基金资助项目.

收稿日期: 1997-09-25; 收到修改稿日期: 1998-01-29

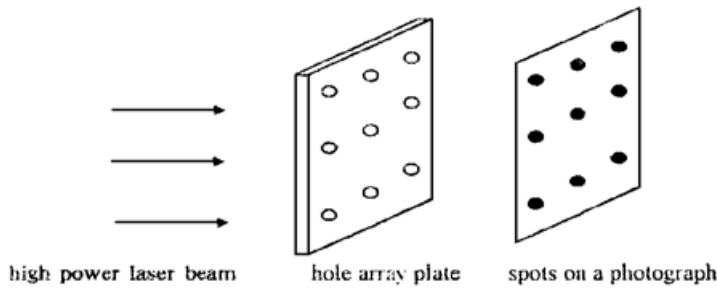


Fig. 1 A setup of phase sensor with hole array

透镜阵列的子光束聚焦过程,从而得到衍射光斑的光强中心位置;再由理论分析建立实用的迭代重构算法公式,重构高功率激光束波前.而且,只要改变适用于某一波长的记录像纸就可用于不同波长光束的波前检测,为高功率激光波前的重构分析提供了一种较高性能、较低成本的测试手段.

本文给出了这种重构波前方法的基本原理,建立了实用的重构公式,并介绍了实验装置和重构结果.

2 基本原理与实验装置

测量的基本原理与哈特曼-沙克波前传感器相同,但实验装置根据高功率激光的实验需要,用小孔阵列替代哈特曼-沙克传感器的微透镜阵列,同时,用摄影像纸替代 CCD 摄像机,使高功率激光束经小孔阵列后,在摄影像纸上烧蚀出光斑.如图 1 所示.哈特曼-沙克波前传感器测量得到的是子孔径内的波前相位平均斜率^[5],小孔阵列测量得到的是小孔内的波前相位平均斜率,一般说来两者是有差别的,但哈特曼-沙克波前传感器能够正确进行波前探测的前提条件是子孔径内只存在整体倾斜,而不存在其它高阶像差,在此条件下子孔径内和小孔内的波前相位平均斜率是一致的.

入射激光照射在小孔阵列上,如果激光是严格的平面波,则在观察屏上形成的光斑阵列与小孔阵列相同;当激光相位面不是平面,激光束波前发生畸变时,由于各小孔内光的传播方向垂直于该处的相位面,在观察屏上各光斑中心位置相对于平面波的情况将有一位移 Δ . 设对应于第 i 个孔在 x 、 y 方向上的位移分别为 Δx_i 、 Δy_i , 并设小孔阵列与观察屏之间的距离为 f , 则设第 i 个孔上的波矢在 x 、 y 方向的斜率 g_i^x 、 g_i^y 分别为^[5]

$$g_i^x = \Delta x_i / f, \quad g_i^y = \Delta y_i / f \quad (1)$$

因此只要测出 Δx_i 、 Δy_i , 即可求出 g_i^x 、 g_i^y , 从而用一定的算法重构激光在小孔阵列的相位面.

本实验装置不用 CCD 器件,而是采用对高功率激光束光斑进行计算机图像处理的方法测出的 Δx_i 、 Δy_i ^[6]. 将放置于孔阵列相位板后面、经高功率激光烧蚀成衍射光斑阵列的像纸放进扫描仪中,按 300 dpi、256 级灰度扫描衍射光斑阵列图像,再以非压缩 TIFF 文件格式存储到图像文件中.

在此装置条件下,在像纸上明显看到衍射圆环^[6],实验中,首先就是要确定亮斑的中心.按菲涅耳衍射的讨论,圆孔衍射看到的是衍射圆环^[7],在高功率激光照射下,亮斑中心“点”在像纸上的几何尺寸太小,很难分辨,因此采用了二值化的图像处理方法,用求质心的方法求出“中心点”,以取代哈特曼传感器中子透镜的聚焦过程.孔阵列中各孔间距 8 mm,保证了各孔之间的光束的干涉影响极小.当圆孔直径远小于孔阵列板与像纸间距的条件下,可以认为小孔中心与像纸上焦斑中心的连线方向就是透过该小孔的子波矢方向.用图像处理方法可以确定衍射光斑的中心点位置,从而得到子波矢方向.

由于在扫描输出光斑阵列图像时,将噪声斑点一并输入了,因此计算机处理图像时,首

先要去除噪声斑点. 每个不同实验记录的衍射光斑阵列图像中, 衍射光斑的位置都不尽相同, 而计算机从分析数据文件的数据的角度来说较难区分出衍射光斑或边缘噪声斑点; 同时, 在衍射光斑之间还随机散布着许多噪声斑点. 本文采用人工干预和机器自动处理相结合的方法, 去除噪声斑点, 然后计算出每一个衍射光斑的光强中心的坐标位置, 求各个衍射光斑中心的坐标位置的方法是用求平面图形质心的方法^[6]. 取衍射光斑阵列中部的一个光斑中心为参考点, 认为其位置偏移为零, 也就是认为该小孔光线传播方向为参考方向, 整个波前引入一个倾斜量. 各个衍射光斑中心的坐标减去参考点坐标, 即得到相对 Δx_i 、 Δy_i .

3 波前重构算法公式

哈特曼-沙克类型的波前传感器只能测量出波前的离散斜率, 即由测出的 Δx_i 、 Δy_i , 求出 g_i^x 、 g_i^y , 还需要用一定的算法重构激光束在小孔阵列的完整波前相位面.

在重构波前理论中, 常用的估计波前相位的方法之一是区域法. 它用 N 个点取代连续面, 把一个完整的波前细分成 $(N - 1)^2$ 个子区间(子孔径), 利用各子孔径边界上测量的波前梯度, 来重构整个波前相位. 在区域法的模型选取中, 可以选用误差传输系数较小的 Shouthwell 模型^[5]. 对于本实验, 由于一般重构公式不能有效地使用, 必须结合本实验的实际, 分析推导出一组重构公式.

Shouthwell 模型把整个波前相位面分成栅格面, 相邻栅格点间就是子区间, 重构时测量

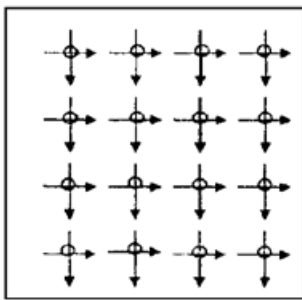


Fig. 2 Shouthwell model. Symbols \odot indicate the phase points to estimate. Symbols \updownarrow indicate the positions of the measuring data

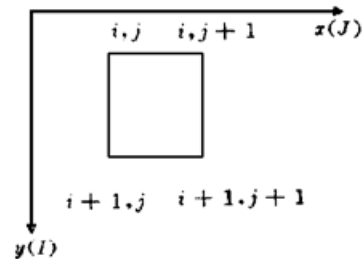


Fig. 3 Reference grid to reconstruct wavefront. I : parameters of grid in y direction; J : parameters of grid in x direction

斜率点和待估计的相位点均在栅格点上. 考虑如图 2 所示的格点分布, 可以认为, 相邻栅格点相位差是与相邻栅格点间中点的斜率对应的, 根据图 3 分析得到:

$$\frac{1}{2}(g_{i,j+1}^x + g_{i,j}^x) = \frac{1}{h}(\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j}), \quad i = 1 \sim N, j = 1 \sim (N - 1) \quad (2)$$

$$\frac{1}{2}(g_{i+1,j}^y + g_{i,j}^y) = \frac{1}{h}(\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j}), \quad i = 1 \sim (N - 1), j = 1 \sim N \quad (3)$$

式中 $g_{i,j}^x$ 或 $g_{i,j}^y$ 分别为第 (i, j) 栅格点处 x 或 y 方向上的斜率; $\phi_{i,j}$ 为 (i, j) 点上的位相值, 可用长度单位表示; h 为子区间的长度. 按照这一模型, 区域内部的斜率是连续线性变化的, 所以待估计的相位将按抛物线规律变化, 这将有损于精确估计相位.

对于 N 个栅格点的栅格, (2) 式、(3) 式可用矩阵直接求解各栅格点上的 $\phi_{i,j}$, 也可以用迭代法求解, 本文采用迭代法. 迭代法的思想在于, 用待估计点四邻位置的相位平均值以及四邻位置的斜率测量值来迭代求解待估计点的相位值. 因此, 对于参量为 (i, j) 的栅格点, 除

了(2)、(3)两式外,迭代法还要有以下公式:

$$\frac{1}{2}(g_{i,j}^x + g_{i,j-1}^x) = \frac{1}{h}(\phi_{i,j} - \phi_{i,j-1}), \quad i = 1 \sim N, j = 1 \sim N \quad (4)$$

$$\frac{1}{2}(g_{i,j}^y + g_{i-1,j}^y) = \frac{1}{h}(\phi_{i,j} - \phi_{i-1,j}), \quad i = 1 \sim N, j = 1 \sim N \quad (5)$$

对于光斑阵列中不同位置的栅格点,相邻栅格点的数目不相同,取用(2)、(3)、(4)、(5)四式的组合方式也不同,但迭代式都可以表示成:

$$\phi_{i,j} = \frac{\overline{\phi_{i,j}} + b_{i,j}}{K_{i,j}} \quad (6)$$

式中 $\overline{\phi_{i,j}}$ 为待估计点 (i, j) 四邻位置的相位平均值,它与待估计值 $\phi_{i,j}$ 很接近; $b_{i,j}$ 由斜率测量值决定,是常数; $K_{i,j}$ 为第 (i, j) 个栅格点周围的相邻栅格点数目.对于常在实验中出现的几种栅格点情况,表1中按不同参数及公式组合情况分类给出第 (i, j) 个栅格点处的迭代表达式的参数值.

Table 1. Iteration formula group at (i, j) point of grids

No.	adjacent point	formule combination	$K_{i,j}$	$\overline{\phi_{i,j}}$	$b_{i,j}$
1	$(i, j-1), (i, j+1), (i+1, j), (i-1, j)$	(4) + (5) - (2) - (3)	4	$\phi_{i,j-1} + \phi_{i,j+1} + \phi_{i-1,j} + \phi_{i+1,j}$	$h(g_{i,j-1}^x - g_{i,j+1}^x + g_{i-1,j}^y - g_{i+1,j}^y)/2$
2	$(i, j+1), (i+1, j)$	(2) - (3)	2	$\phi_{i,j+1} + \phi_{i+1,j}$	$h(-g_{i,j+1}^x - g_{i,j}^x - g_{i+1,j}^y - g_{i,j}^y)/2$
3	$(i, j-1), (i+1, j)$	(4) - (3)	2	$\phi_{i,j-1} + \phi_{i+1,j}$	$h(g_{i,j-1}^x + g_{i,j}^x - g_{i,j}^y - g_{i+1,j}^y)/2$
4	$(i, j+1), (i-1, j)$	(5) - (2)	2	$\phi_{i,j+1} + \phi_{i-1,j}$	$h(-g_{i,j}^x - g_{i,j+1}^x + g_{i-1,j}^y + g_{i,j}^y)/2$
5	$(i, j-1), (i-1, j)$	(4) + (5)	2	$\phi_{i,j-1} + \phi_{i-1,j}$	$h(g_{i,j-1}^x + g_{i,j}^x + g_{i-1,j}^y + g_{i,j}^y)/2$
6	$(i, j-1), (i, j+1), (i+1, j)$	(4) - (2) - (3)	3	$\phi_{i,j-1} + \phi_{i,j+1} + \phi_{i+1,j}$	$h(g_{i,j-1}^x - g_{i,j+1}^x + g_{i,j}^y - g_{i+1,j}^y)/2$
7	$(i, j-1), (i, j+1), (i-1, j)$	(4) + (5) - (2)	3	$\phi_{i,j-1} + \phi_{i,j+1} + \phi_{i-1,j}$	$h(g_{i,j-1}^x - g_{i,j+1}^x + g_{i-1,j}^y + g_{i,j}^y)/2$
8	$(i, j+1), (i+1, j), (i-1, j)$	(5) - (2) - (3)	3	$\phi_{i,j+1} + \phi_{i-1,j} + \phi_{i+1,j}$	$h(-g_{i,j}^x - g_{i,j+1}^x + g_{i-1,j}^y - g_{i+1,j}^y)/2$
9	$(i, j-1), (i+1, j), (i-1, j)$	(4) + (5) - (3)	3	$\phi_{i,j-1} + \phi_{i-1,j} + \phi_{i+1,j}$	$h(g_{i,j-1}^x + g_{i,j}^x + g_{i-1,j}^y - g_{i+1,j}^y)/2$

实际计算中,为加速迭代收敛,采用超松弛(SOR)法,改写(6)式,则第 $m+1$ 次迭代的公式为:

$$\phi_{i,j}^{m+1} = (1/K_{i,j})[\phi_{i,j}^m + \alpha(\overline{\phi_{i,j}} + b_{i,j} - \phi_{i,j}^m)] \quad (7)$$

式中 α 为超松弛因子.

4 实验结果

本实验中波前测量最大光束直径为 $\phi 200$ mm,斜率采样点愈多,获得相位重构信息愈多,但是在现有实验条件限制下(小孔的衍射和孔间干涉的限制),而且要有较高的空间分辨

率, 实验得到各孔间距不要小于 8 mm. 实际实验中, 孔阵列板上的孔距取 8.0 mm, 小孔直径取 2.0 mm, 钻孔定位精度 10 μm , 板材为铜板. 对于较小尺寸光束, 采用较密的孔阵列板较好, 但图像处理方法一样.

实验装置布局如图 1 所示, 孔阵列板面垂直于光路置于待测激光束输出孔径之后, 曝光像纸面也垂直于光路置于孔阵列板后面相距 f 处(f 的具体值根据每个实验需要而定, 一般约 1~ 2.5 m). 使用 Microteck SP II 扫描仪, 扫描输入像纸上的光斑阵列图像, 分辨率取为 300 dpi, 以保证有 0.0847 mm 的点分辨率; 扫描时适当选取亮度、对比度等参数, 以使光斑边缘处于低灰度级的光斑也能扫描输入. 重构的激光束波前相位可用分布数据或曲面几何图形表示. 在中国工程物理研究院的“星光”高功率激光器上进行了波前相位测量实验. 激光器功率为 10^{12} W, 波长为 1.054 μm ; 本实验中测量光束直径分别为 $\phi 40$ mm、 $\phi 110$ mm. 此方法最大可测光束直径只受到扫描仪幅面的限制, 本装置中光束直径为 200 mm, 波前重构分辨率约为 $\lambda/5$.

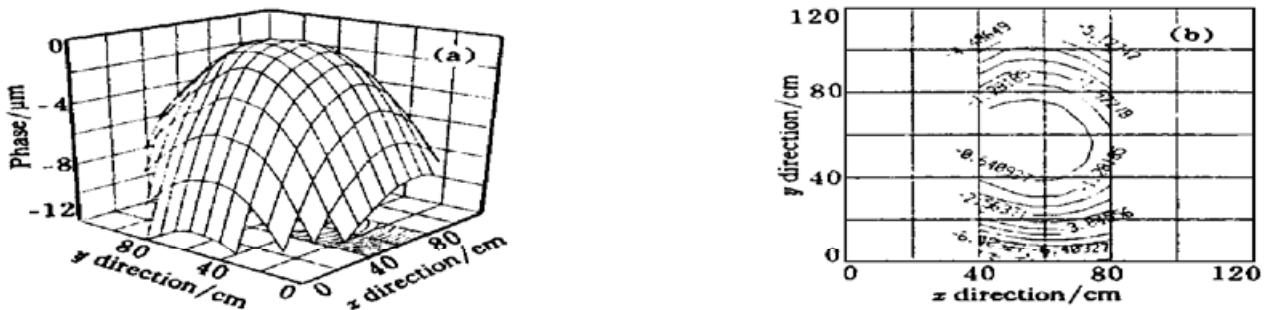


Fig. 4 Wavefront of beam (a) and its topographic map (b) with a diameter of 120 mm in experimenta No. 1

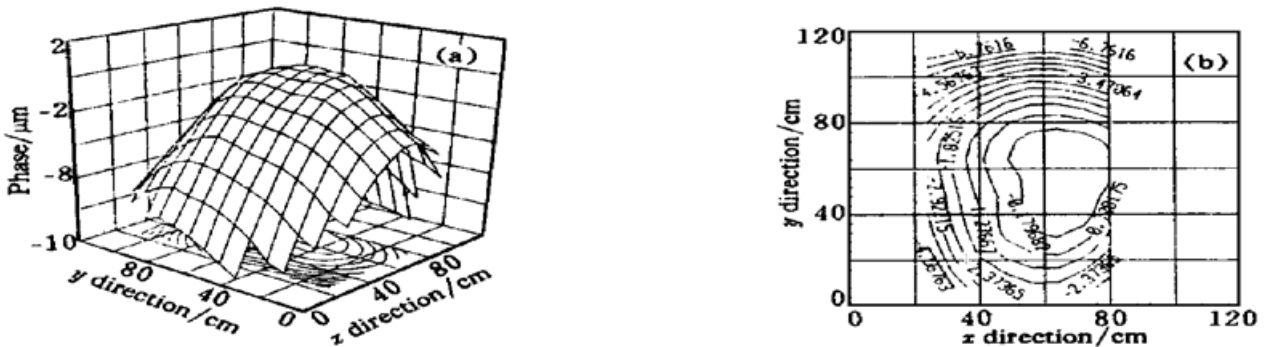


Fig. 5 Wavefront of beam (a) and its topographic map (b) with a diameter of 120 mm in experiment No. 2

光束直径 $\phi 110$ mm 的实验 1 的重构波前相位面的三维曲面图与投影等高线图如图 4 所示, 实验 2 的重构波前相位面的三维曲面图与投影等高线图如图 5 所示; 图 6 是二个投影等高线图叠加在一起的图, 由此图可看出波前相位的畸变情况, 实验中 f 取 200 cm. 光束直径 $\phi 40$ mm 的重构波前相位面的三维曲面图与投影等高线图如图 7 所示. 各图中, 位相坐标值都是以波前中心为参考点的相对位相值, 量纲为 μm ; 横坐标或平面坐标量纲为 cm. 等高线图仅作为对比参考, 所以等高线绘图时数据作了

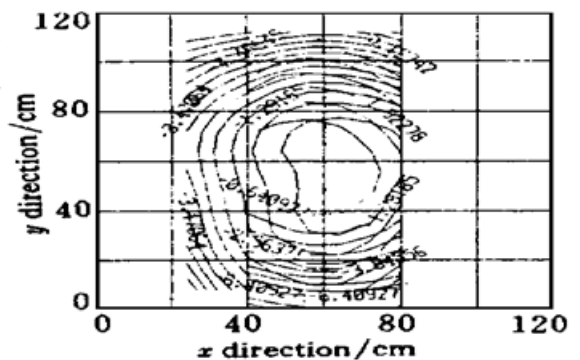


Fig. 6 Combination of topographic map of wavefront of beam with a diameter of 120 mm in experiment No. 1 and No. 2

一些平滑处理.

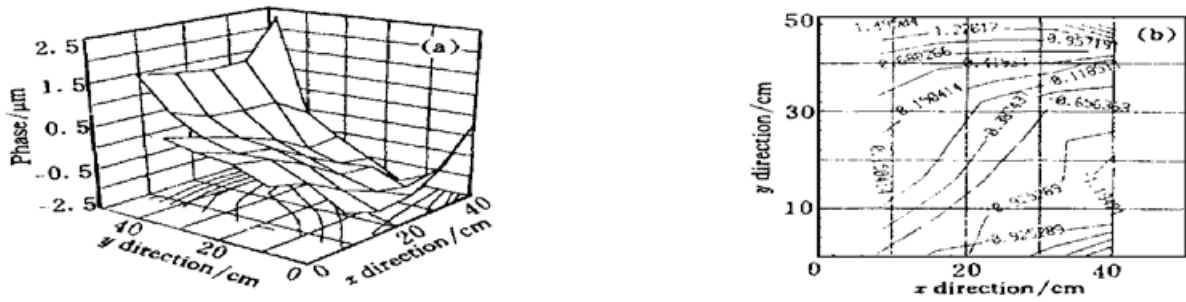


Fig. 7 Wavefront of beam (a) and its topographic map (b) with a diameter of 40 mm in experiment

利用此重构的带有位相畸变的波前, 可以通过数学拟合求得参考波前, 并由此推算出波像差及 Strehl 比, 此项工作将另文介绍.

结束语 根据对“星光” 10^{12} W 高功率激光器的光束质量进行测试的应用要求, 建立了高功率激光束波前孔阵列相位传感实验装置及数据采集处理系统, 成功地重构出了“星光”运行在高功率状态下的波前相位面, 并给出波前畸变等重要参数, 该装置最大可测光束直径为 200 mm, 波前重构分辨率约为 $\lambda/5$.

在该系统中用计算机软件代替了哈特曼-沙克传感器中子透镜阵列的子光束聚焦过程, 直接对高功率激光束经过孔阵列相位传感器、在记录像纸上烧蚀成的光斑阵列进行图象处理, 获取孔阵列上各孔处的波前斜率, 再通过理论分析建立在 Shouthwell 模型上的实用迭代算法公式, 重构出高功率激光束波前.

该系统可直接对大光束直径高功率激光束波前进行测量, 在测量过程中, 不需在原有装置上附加任何其它光学系统或元件, 不会因测量引入其它附加光学元件的相位差, 而且, 只要改变适用于某一波长的记录像纸就可用于不同波长的波前检测, 为高功率激光波前的重构分析提供了一种高性能, 低成本的测试手段.

参 考 文 献

- [1] Claude A K. Wavefront distortions in power optics. *Proc. SPIE*, 1981, 293: 73~ 77
- [2] Robert K T. *Principle of Adaptive Optics*, New York: Academic Press, Inc. 1991.
- [3] 叶嘉雄, 余永林. 自适应光学, 武汉: 华中理工大学出版社, 1992.
- [4] 蒋志平等. 强激光与粒子束, 1993, 5(3): 469~ 471
- [5] 周仁忠. 自适应光学. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [6] 陈 哲, 常胜利, 胡永明等. 测量高功率激光束衍射光斑阵列位置的图象处理方法. *光电工程*, 1998, 25(1): 6~ 12
- [7] 梁铨廷. 物理光学, 北京: 机械工业出版社, 1980. 110~ 111

A Novel Method to Reconstruct the Wavefront of High Power Laser Beam

Chen Zhe Hu Yongming Chang Shengli Zeng Chun Liu Zhejin

(*Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073*)

Zhang Xiaomin Zheng Wanguo

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610003*)

(Received 25 September 1997; revised 29 January 1998)

Abstract A novel method is presented to reconstruct the wavefront with phase distortion in STRALIGHT $\sim 10^{12}$ W high power laser apparatus by means of computer image processing. In experiments, the image processing of optical spots fired on photograph by high power laser beams through a plate with hole array. The iteration formula group was deduced to apply in the experiments. Each center of intensity of optical spots and relative shift were measured, and phase wavefront of high power laser was reconstructed in iteration. Computer software made the focusing procedure of small optical beams in hole array instead of which in sub-lens array of normal Hartmann-Shack sensor. The method can be used to measure directly the high power laser beam with large diameter. The principle and the formula of the reconstruction are described. The method has been used in the experiments of the high power laser apparatus STARLIGHT. The maximum diameter measured is 200 mm, and the resolving power of wavefront reconstruction is about $\lambda/5$.

Key words high power laser, reconstruction of wavefront, image processing, diffractive optical spot.