

用透镜阵精测大口径激光束的波前曲率

梁向春 邓锡铭

(中国科学院上海光机所)

提要: 描述利用透镜阵精测大口径激光束波前的曲率。测试精度达焦深量级。得到的结果与以往采用的网格投影法和剪切干涉仪法相比,判读精度有明显的提高。

Precise measurement of wavefront curvature of large diameter laser beams using lens array

Liang Xiangchun, Deng Ximing

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

Abstract: A description is given of the precise measurement of the wavefront curvature of large diameter laser beams using the lens array. The precision of the measured wavefront curvature is up to the order of the focal depth. The results obtained are compared with those from the mesh projection image and the shearing interference. It indicates that the accuracy for judgement reading has been raised notably.

一、引言

在激光等离子体实验中,通常要用透镜把大口径(直径60毫米以上)高功率激光束聚焦到靶上,为此必须测量光束波前的曲率半径,才能使靶置于最佳焦点位置上。测量激光束波前曲率有多种方法。当直接检验激光振荡器输出光束的波前曲率时,采用傅里叶成像技术的Rochi型衍射光栅较宜^[1];当激光束经多次放大,光束口径较大时,采用的方法有哈特曼网格法和剪切干涉仪法^[2]。网格板是简单易测的工具,但判读精度低;剪切干涉仪法原则上可测到焦深量级,但由于激

光束在传输过程中有自聚焦现象,导致光束位相不均匀,波面畸变,使剪切干涉条纹混乱或局部消失,这时已不能准确测试干涉条纹间距,使高精度的干涉法失掉意义。

二、测试精度分析

激光束波前曲率半径和面形的测量,是保证高功率激光束准确聚焦于靶面的一个重要环节。若光束口径为200毫米,聚焦系统焦距为300毫米,光束发散角为0.13毫弧度,要求可聚焦能量集中到直径为60微米的靶面上,则靶面与焦平面之间的不确定量不能

收稿日期:1982年3月29日。

大于 20 微米。因此,对调焦用的模拟光束波面和实际激光束波面,都必须取得足够精度的测量数据。

如图 1 所示,根据牛顿成象公式 $Rx' = f^2$, 式中 R 为波面曲率半径, x' 为象点与焦点的距离, f 为透镜焦距。波面半径的测量误差可表示为:

$$dR = |R^2 dx' / f^2| \quad (1)$$

按上述靶面定位精度要求, $dR \leq 2 \times 10^{-4} R^2 /$ 米, 这样的误差允许值约为焦深的 2 倍。

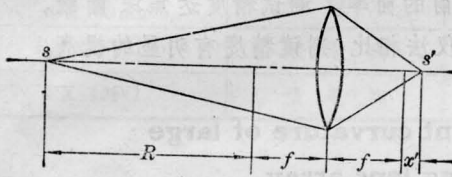


图 1 牛顿公式示意图

以往用哈特曼网格板方法测量波面,如图 2 所示。等效发光点 s 距网格板距离 R 可根据几何关系表示为:

$$R = lA / L - l \quad (2)$$

式中 l 为网孔间距,一般为 10 毫米; L 为网孔的投影象间距; A 为接收屏与网格板距离,一般选为 2 米左右。测试误差可表示为:

$$dR = |dLL^2 / lA| \quad (3)$$

dL 为确定网孔投影点中心的精度,由于网孔一般为 2~3 毫米附近,目视测试投影点定中心的精度通常为 1/10 直径,所以 $dL \sim 0.2$ 毫米,这时 $dR = 2 \times 10^{-2} R^2 /$ 米,远远达不到要求,基本原因就是判读精度低。

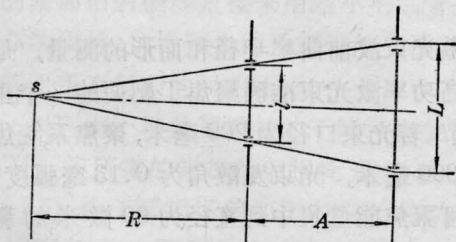


图 2 网格板测波面曲率示意图

现改用透镜阵取代网格板,每个透镜元对应一个网格板的孔。用多个(例如 50~100 个,可根据光束口径而定)焦距、口径相同的小透镜(相对口径为 $f/100$, 单片即可)并排成透镜阵,待测光束通过透镜阵在公共焦平面上形成焦点阵,如图 3 所示。通过测量焦点之间的距离来确定光束波面曲率半径及面形。计算时仍利用表示式(2),此时 A 值改为小透镜焦距 F ,随着入射光束波面曲率的变化, F 稍有改变。 l 是当平行光束(一般采用扩束的 He-Ne 光束)通过透镜阵后,在焦平面上的焦点之间的距离,定为比较标准。 L 为待测光束的焦点间距。例如,用 He-Ne 扩束光束作判断实验,若小透镜口径为 20 毫米,焦距为 2 米,光束波长为 0.63 微米,则由口径决定的衍射焦斑直径为 0.15 毫米,用万能工具显微镜或两维黑密度计定焦点中心位置的坐标,判读精度可做到 10 微米以内,相当于光轴光线的角判读精度为 5×10^{-6} 弧度,即 1 弧秒。这种精度已能满足 $dR = 2 \times 10^{-4} R^2 /$ 米的要求了。

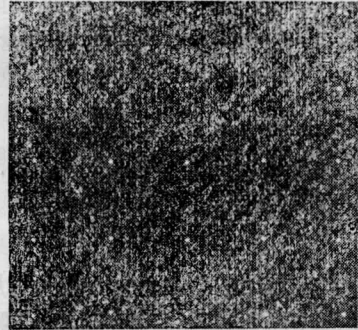


图 3 焦点列阵照片

三、引起误差的因素

当判读精度是在 10 微米以内的高精度情况时,需要对测试数据有贡献的透镜和感光板进行精度考核。

1. 透镜加工和装校误差的影响

透镜阵是采用平凸型透镜,加工透镜时

除满足面形要求外，还要对透镜的中心偏差和焦距偏差提出适当要求。透镜的中心偏差是指透镜外圆的几何轴与光轴的偏离量，一般用球心的偏离量来度量。常见的透镜中心偏差有两种，如图4所示，即透镜光轴与几何轴具有平行性中心偏差和透镜光轴与几何轴具有交叉性中心偏差。很不希望有交叉性中心偏差，因这时不但破坏了光学系统的共轴性，而且还会产生色差，实验中采用的透镜中心偏差 $C \leq 0.02$ 毫米。

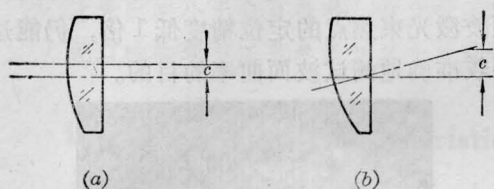


图4 偏心透镜示例
(a) 光轴与几何轴平行；
(b) 光轴与几何轴相交

透镜焦距偏差 $\Delta f/f \leq 1\%$ 时，能保证透镜阵焦平面上的图象清晰。

把符合使用要求的小透镜装在金属框上排成列阵时，装配倾斜度不宜过大，否则会引起象散和色差。在小角度情况下(1度以内)，这些影响可忽略不计，这时只考虑由于透镜倾斜对折射光线偏离轴向的距离在误差允许值之内即可。经计算倾斜角应不大于10弧分，这是完全可以做到的。

2. 照相材料和室温的影响

为了防止照相材料的伸缩性对测试结果的影响，我们采用了光谱玻璃干板或全息玻璃干板作为照相记录。普通窗玻璃的热胀系数为 $9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，如果200毫米长的玻璃板在相差 5°C 下工作，则线膨胀量为9微米，是合乎要求的。实验表明，在恒温室内冲洗玻璃干板，分别在照相乳胶未干和全干以后进行测试焦点间距表明，测试结果无明显差异。说明乳胶的伸缩性也是在允许的测试误差范围内，选用玻璃干板是可靠的。

四、测试结果

用 He-Ne 激光束做了精测波面曲率的实验，实验布置如图5所示，透镜阵实物如图6所示，透镜之间联结物质是石膏。当透镜数量多时，把小透镜装配在精密加工好的金属框内更为方便。

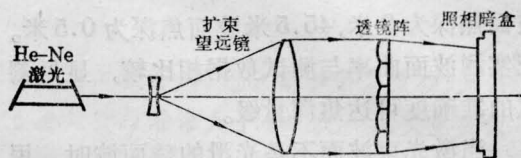


图5 透镜阵精测激光波面曲率实验装置

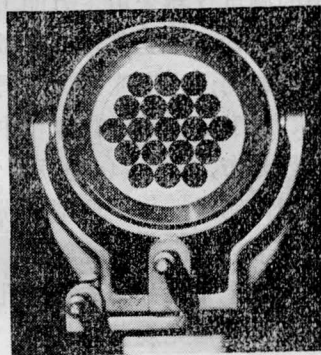


图6 透镜阵照片

(该透镜阵是 应兴祥 工程师装配的)

实验中调节望远镜目镜的前后位置，可发出不同波面曲率的球面波(光束口径为100毫米)，然后把透镜阵置于光路中，在透镜阵的焦平面上拍照焦点阵列并进行测试。这里摘录的一组数据是两种不同曲率的会聚波面在一排透镜焦点上的测试结果，测试数据如表所示。

在波面 I 时透镜阵的焦距 $f_I = 1.93$ 米，在波面 II 时 $f_{II} = 1.88$ 米，焦距 f 用米尺测量，以焦点图象最清楚为准。波面曲率半径用关系式 $R = lf/(l-L)$ 计算，有效数字为三位。

为了验证测量的数据是否接近真值，我们用米尺度量会聚波面象点位置距望远镜出口处的距离，实测波面 I 的曲率半径为 $112 \pm$

标准焦点间距 l (毫米)	波面 I 焦点间距 L (毫米)	波面 I 曲率半径 R (米)	波面 II 焦点间距 L' (毫米)	波面 II 曲率半径 R' (米)
$l_{12}=19.93$	$L_{12}=19.59$	$R_{12}=113$	$L'_{12}=19.11$	$R'_{12}=45.6$
$l_{23}=20.36$	$L_{23}=20.01$	$R_{23}=112$	$L'_{23}=19.54$	$R'_{23}=46.6$
$l_{34}=20.02$	$L_{34}=19.68$	$R_{34}=114$	$L'_{34}=19.19$	$R'_{34}=45.3$
$l_{45}=20.19$	$L_{45}=19.84$	$R_{45}=111$	$L'_{45}=19.36$	$R'_{45}=45.7$

1.5 米, 波面 II 的曲率半径为 45.5 ± 0.2 米。按焦深公式 $\Delta L = 4\lambda \left(\frac{F}{D}\right)^2$ 计算, 112 米波面焦深为 3 米, 45.5 米波面焦深为 0.5 米。把实测波面曲率与测试数据相比较, 显见测试的准确度可达焦深量级。

当激光束波面不是光滑的球面波时, 用透镜阵可测出波面曲率沿径向的变化曲线。

实验中的测试仪器采用了万能工具显微镜或二维黑密度计, 精度都可达到微米级。

实验中观察到, 当激光波面光滑无畸变时, 焦点形状为艾里斑衍射图, 即在中心亮区周围有衍射环分布, 如图 7(a) 所示。当激光波面振幅无规调制时, 一个典型的模拟实验是在一个光学平板上涂感光乳胶层, 用照相技术制成有很多个无规分布的透光孔, 平滑激光束通过这种振幅无规调制板后, 则聚焦光束的焦点形状如图 7(b) 所示。焦斑中心仍有亮区, 周围是颗粒结构^[3], 这种情况仍可以较准确地测试波面曲率。

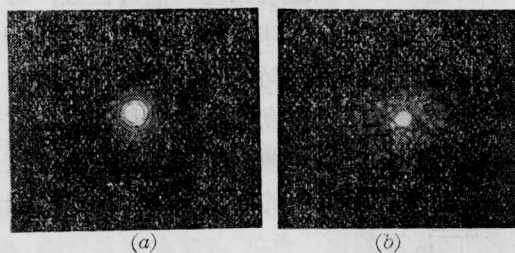
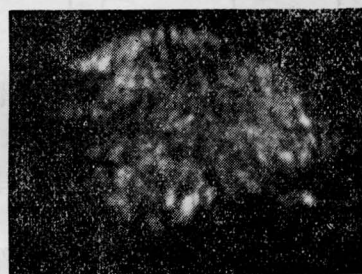


图 7 焦斑形状

对六束高功率激光器系统上^[4]的激光束进行了波面测试, 在激光束质量不好, 例如当激光束存在象散、球差、振幅不规则等时, 要比较准确地测试波面曲率, 用剪切干涉法就显得困难了, 图 8(a) 是用剪切干涉仪^[5]拍摄的激光波面横向剪切干涉图, 由于波面破坏

得厉害, 致使波面相干性很差, 无法判读条纹间距。而同样的激光束用透镜阵进行波面测试, 尽管焦斑形状不规则, 但焦斑中心仍有亮区, 如图 8(b) 所示。经测试表明, 判读焦点位置的精度还可达到 20 微米以内, 比完好的球面波激光束焦点的定位精度低 1 倍, 仍能达到较准确地测试波面曲率的目的。



(a)



(b)

图 8 对 1.06 微米激光的横向剪切干涉图(a)和焦点列阵照片(b)
(光束口径: 60 毫米; 光脉冲宽度: 0.1 毫微秒; 光能量 11 焦耳)

参 考 文 献

- [1] K. Paturski; *Opt. and Laser Tech.*, 1979, 11, No. 2, 91.
- [2] 梁向春等; 《光学学报》, 1982, 2, No. 2, 113~121.
- [3] [法] M. 弗朗松著; 顾世杰译; “衍射光学中的相干性”, 科学出版社, 1974, 42.
- [4] 邓锡铭等; 《光学学报》, 1981, 1, No. 4, 289~298.
- [5] 梁向春等; 《激光》, 1980, 7, No. 7, 41.