

# 二维正交光楔列阵大焦斑均匀照明光学 测试系统的研究\*

郑建洲\*\* 蔡邦维 吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都 610064)

**摘 要** 为了检测列阵式靶面均匀照明光学系统的聚焦特性, 成功地开发了测定微米量级光强度起伏干涉斑纹投影放大的新技术。报道了测定聚焦光斑一维、二维大尺度不均匀性及小尺度干涉斑纹的实验方法、结果及误差分析。

**关键词** 均匀照明, 二维正交光楔列阵, 投影放大, CCD 像机。

## 1 引 言

迄今, 国内外已经发展了多种用于产生平顶分布焦斑轮廓和消除小尺度强度调制的均匀照明技术方案<sup>[1]</sup>。列阵系统是惯性约束聚变(ICF)靶面均匀照明光学系统的主要技术方案之一, 作者提出的二维正交光楔列阵光学系统(SWA)可将非均匀分布的入射激光束变换为尺寸连续可调、分布均匀的方形光斑。列阵系统的优点是能得到接近平顶分布的焦斑, 并能有效地抑制旁瓣产生。同时它可以很方便地结合其它技术, 如随机位相板、偏光控制、感生空间非相干、光谱色散、非相干源等。列阵均匀照明光学系统由于多光束干涉效应, 其焦斑光强大包络内必然存在微米量级的非常细密的小尺度强度起伏。而对如此细密的干涉斑纹的测量, 现有的 CCD 摄像机的分辨率还达不到精度要求。所以还没有合适的仪器直接测定。为此, 作者开发了投影放大测试技术。结果表明, 此技术可以清晰地分辨  $10\ \mu\text{m}$  以内的强度分布情况, 精确地测定相邻两主极大间的距离, 与理论值符合得很好, 测量的相对误差为 1.21%。而且与多光束干涉规律次极大数  $(N - 2)$  相吻合, 令人信服地验证了此技术和结果的可靠性。大焦斑模拟实验的光源为连续单模 He-Ne 激光, 但只要按要求改变设计参数, 原则上亦可用于惯性约束聚变实验中小焦斑的测试。这一技术的开发成功, 为今后改进提高惯性约束聚变靶面均匀照明系统的研究创造了基本的测试条件。

## 2 二维正交光楔列阵系统焦斑大尺度均匀性的测试

按照物理光学原理, 二维正交光楔列阵系统焦斑光场应是单元列阵口径的衍射和多光束

\* 该项工作得到国家高技术惯性约束聚变主题项目的资助。

\*\* 现在河北师范大学物理系工作。

收稿日期: 1996 年 7 月 17 日; 收到修改稿日期: 1997 年 1 月 20 日

干涉的卷积，即在平顶光强分布大尺度包络内有高频调制斑纹，两者相辅相成。前者为粗结构，先测定，后者为精细结构，用投影放大技术测定。

二维正交光楔列阵系统系统聚焦特性粗结构测试装置如图 1 所示，单模 He-Ne 激光经扩束器后成为口径  $\Phi = 100 \text{ mm}$  的平行准直光，垂直射入两组相互垂直的单元数为  $N$  的二维正交光楔列阵系统，被等分为  $N^2$  个正方形子光束，各子光束在重迭焦面上完全重迭会聚，非球面透镜再将其成像到靶面上，使光强分布不均匀的子束相互补偿，在靶面上得到强度分布均匀的方形光斑<sup>[2]</sup>。通过 MTV-1881EX1/2" CCD 像机摄得靶面上方形光斑的强度分布。CCD 将信号输出至 CA 540 图像卡后进行快速 A/D 转换并采集存入自身的缓冲内存中，通过计算机进行数据处理，可由监视器实时显示激光焦斑的一维、二维光强分布及焦斑的等强度图。

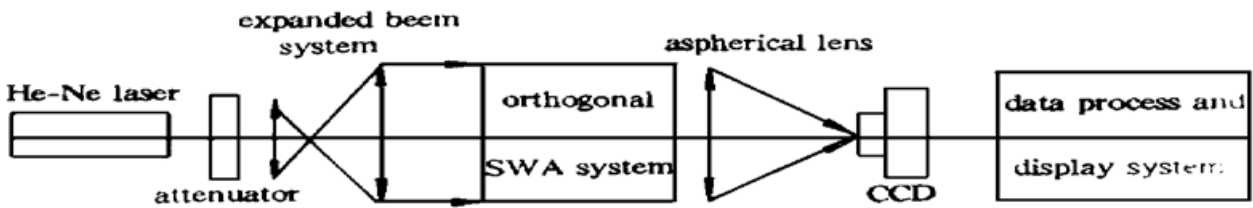


Fig. 1 Testing block diagram of the property of focal spot generated by orthogonal SWA system for uniform illumination

用本测试系统对研制的七单元二维正交光楔列阵系统的聚焦特性进行了实验测试。系统的有效通光口径为  $\Phi = 100 \text{ mm}$ ，非球面透镜的焦距为  $f = 300 \text{ mm}$ ，光楔列阵单元宽度为  $d = 15 \text{ mm}$ 。摄得焦斑上的一维、二维光强分布如图 2 所示。可见焦斑为正方形，边缘上升下降比较陡峭，无旁瓣，近于平顶光强分布。根据不均匀度的定义：

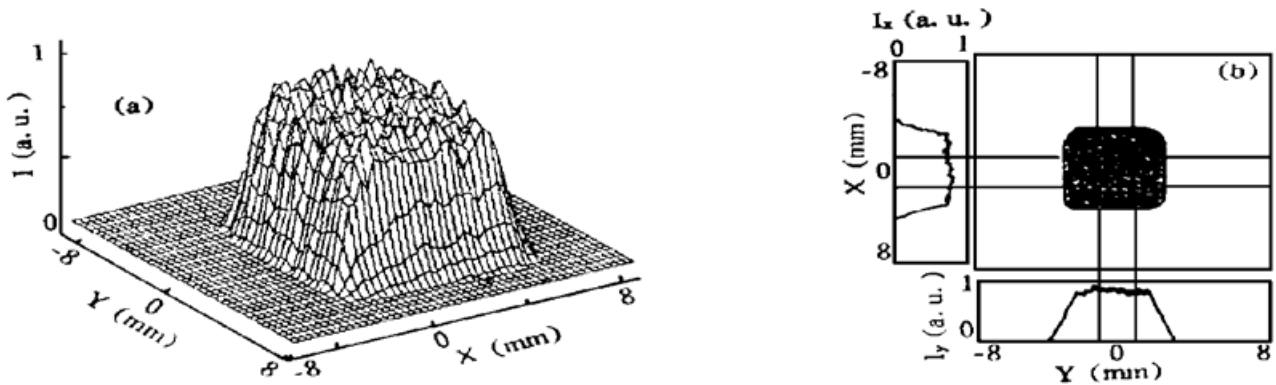


Fig. 2 (a) The 2-D. intensity distribution of the focal spot recorded by a MTV-1881EX1/2" CCD camera, (b) The intensity distribution of the focal spot along  $x$  and  $y$  directions recorded by a MTV-1881EX1/2" CCD camera

降比较陡峭，无旁瓣，近于平顶光强分布。根据不均匀度的定义：

$$\eta = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \tag{1}$$

在曲线上取十点作平均得  $x$ 、 $y$  方向上的不均匀度分别为： $\bar{\eta}_x \approx 4.33\%$ ， $\bar{\eta}_y \approx 4.74\%$ 。可见，本测试系统可以有效、实时、快速、方便地测定二维正交光楔列阵系统的聚焦特性，对焦斑质量能作出量化的评价。

### 3 微米量级的多光束干涉斑纹的测试

列阵均匀照明光学系统由于多光束干涉效应，其焦斑光强包络内还存在微米量级的非常细密的小尺度强度起伏。相邻的多光束干涉斑纹主极大间距的理论值为： $\delta x = \delta y = \lambda / \sin\theta =$

$\lambda z_0/d$ , 其中  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ,  $z_0$  为焦斑位置,  $\theta$  为光楔光线的夹角,  $d$  为光楔列阵单元宽度。采用四单元二维正交光楔列阵系统组成被测系统。由几何光学可得焦斑的位置和焦斑宽度为:

$$z_0 = \frac{L_2 - S_2}{1 + (L_2 - S_2)/f}, \quad l = \frac{d}{1 + (L_2 - S_2)/f} \quad (2)$$

其中  $L_2$  为光楔列阵 2 的重迭焦距,  $S_2$  为光楔列阵 2 到非球面透镜的距离。  $l = 5.270 \text{ mm}$ 。设  $S_2 = 0 \text{ mm}$ , 即光楔列阵 2 与非球面透镜紧贴的情况。由参数计算得:  $z_0 = 196.659 \text{ mm}$ , 多光束干涉斑纹的相邻主极大间距的理论值为:  $\delta x = \delta y = 8.2 \mu\text{m}$ 。如此细密的干涉条纹用现阶段的探测仪器在靶面上直接测量是分辨不出来的。例如, 对于  $10 \mu\text{m}$  范围内的强度不均匀度不大于 2% 的焦斑测量, 现有的 CCD 的分辨率和测量精度均不能满足实验要求, 对于有效像元数为  $752 \times 582$ , 每一像元大小为  $8.6 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$  的 MTV-1881EX1/2" CCD 摄像机同样也无法直接测量微米量级的强度分布。除了选用价格昂贵的高分辨率高精度的科学级 CCD 外, 另一可行的方法是, 采用高质量的光学系统将焦斑有效放大后进行测量。“高质量”是指: 1) 具有 10 倍以上放大率和足够高的分辨率, 使放大的焦斑像上能够清晰地分辨微米量级的强度分布情况; 2) 放大的焦斑像内各点的强度分布相对保持不变。通过实验研究证实, 投影放大测试技术能够满足精确地测定微米量级的多光束干涉空间周期的需要。

以图 1 为基础, 投影放大测试原理如图 3 所示。非球面透镜、投影物镜和屏构成投影系统, 在接收屏上可得到放大的系统焦斑上的细微干涉斑纹。在实验中同轴准直调整光路, 通过多维精密调节架(精度为  $0.01 \text{ mm}$ ) 调整投影物镜, 使二维正交光楔列阵系统的焦斑在投影物镜的焦点上, 即投影物镜的工作距  $s$  等于其焦距, 即  $s = f_0$ 。放大率  $\beta = -s'/s = s'/f_0$ , 与其像距  $s'$  成正比。用 GS-1 型全息干版(其分辨率为  $2500 \text{ l/mm}$ ) 在接收屏上按  $1:1$  的比例摄得如图 4 所示的照片, 实验测定投影物镜到接收屏的平均值为:  $s' = 3130.00 \text{ mm}$ , 投影物镜的焦距为:  $f_0 = 35.00 \text{ mm}$ 。则放大率  $\beta \approx 89$ 。由 JXW-1 型读数显微镜(测量精度为:  $0.01 \text{ mm}$ ) 标定全息照片的长度平均值  $L = 39.539 \text{ mm}$ , 其间的相邻两主极大个数为: 53 个, 则相邻两主极大平均间距为:  $\overline{\Delta x} \approx \overline{\Delta y} \approx 0.746 \text{ mm}$ , 由此得出焦斑上实际干涉斑纹的平均间距为:  $\overline{\delta x} \approx \overline{\delta y} \approx 8.3 \mu\text{m}$ 。在接收荧屏上的方形光斑的全口径约为  $469 \text{ mm}$ 。测量的相对误差为:  $\delta = |\delta x - \overline{\delta x}|/\overline{\delta x} = 1.21\%$ , 其中  $\delta$  为理论值,  $\overline{\delta x}$  为测量平均值。可见两者符合得很好。由 CCD 在接收屏上摄得的一维多光束干涉强度分布如图 5 所示, 可见, 主极大强度分布对称, 较尖锐, 各强度基本相等, 可清晰分辨两次极大, 与多光束干涉规律次极大数  $(N - 2)$  相吻合, 有力地证实了此技术和结果的可靠性。

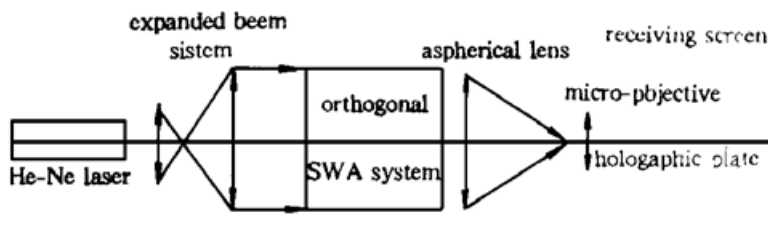


Fig. 3 Testing block diagram of the projection technique

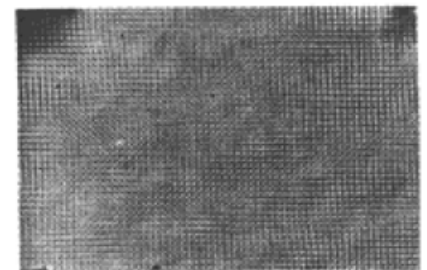


Fig. 4 The picture of multi-beam interference speckle with 4 elements in the orthogonal SWA which was amplified about 89 times

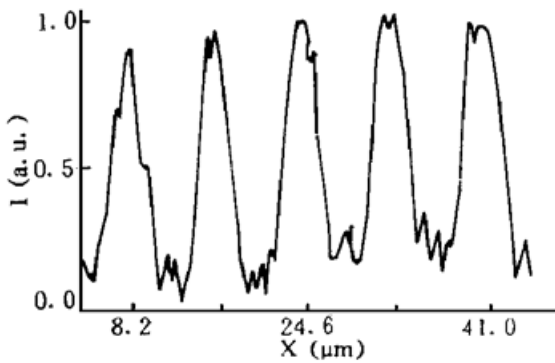


Fig. 5 The intensity distribution of the multi-beam interference speckles in the screen along the  $x$  direction recorded by a MTV-1881EX1/2" CCD camera

实验结果是取放大焦斑的一部分,若要知其全貌,可用扫描和分区域记录等方法。在实验中采取了消除杂光及其它干扰等措施来提高精度。为提高成像质量,采用消像差的投影物镜。误差的主要来源是,由于多维精密调节架调焦时存在误差,用钢尺(精度为: 1.00 mm)测长度和用读数显微镜标定照片上斑纹间距而带来的误差。原则上,这一新的技术可以用于更小焦斑(例如宽度小于 500  $\mu\text{m}$ )均匀性的测量,有关工作正在进行当中。

小 结 1) 用两组相互正交的光楔列阵与非球面透镜组合的光学系统能够实现均匀大焦斑聚焦; 2) 由 MTV-1881EX1/2" CCD 通过计算机软件数据处理组成的测试系统能把焦斑强度分布平面和空间的轮廓描绘出来,实时、直观、完善、定量地分析了二维正交光楔列阵系统的聚焦特性; 3) 成功地开发了微米量级的多光束干涉斑纹的投影放大技术,可以清晰分辨、精确测定非常细密的干涉斑纹的空间周期,为进一步用随机位相,偏光控制和光谱色散等技术改进、提高惯性约束聚变点聚焦靶面均匀照明光学系统的研究创造了测试条件。

### 参 考 文 献

- [1] D. M. Villeneuve, G. D. Enright, H. A. Baldis, Novel laser line focus geometry applied to X-ray laser. *Opt. Commun.*, 1991, **81**(1, 2) : 54~ 58

## A Testing System for Two-Dimensional Orthogonal Segmented Wedge Array Applied to Uniform Illumination of Large Focal Spot

Zheng Jianzhou    Cai Bangwei    Lu Baida

(*Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064*)

(Received 17 July 1996; revised 20 January 1997)

**Abstract** A new projection technique for measuring the intensity undulations by interference speckles caused in the micrometer magnitude has successfully been developed, in order to test the focal property of optical array system for uniform illumination. The experimental method, measurement results and error analysis for testing the large-scale non-uniformity of 1-D and 2-D focal spot and interference speckles of the small-scale have been presented.

**Key words** uniform illumination, two-dimensional segmented wedge array, projection technique, CCD camera.