

## 针孔辅助点投影诊断方法实验研究

董佳钦<sup>1, 2</sup> 傅思祖<sup>1</sup> 熊俊<sup>1</sup> 王瑞荣<sup>1</sup> 黄秀光<sup>1</sup> 舒桦<sup>1</sup> 顾援<sup>1</sup> 王占山<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国工程物理研究院 上海激光等离子体研究所, 上海 201800; <sup>2</sup> 同济大学物理系, 上海 200092)

**摘要** 针孔辅助点投影背光成像是近几年国外新兴的等离子体诊断技术,在惯性约束聚变相关物理实验诊断中具有重要的应用前景。为验证这一诊断方法的实用性,在神光 II 第九路平台上开展了演示实验。利用激光驱动平面 Ti 靶获得约 4.7 keV 的 Ti K 壳层 X 射线,在十几微米的针孔约束下作为次级点源并对 Au 栅格样品投影成像,并用 CCD 记录。实验成功获得了清晰的样品二维空间分辨的时间积分图像,空间分辨力优于 16.1  $\mu\text{m}$ 。实验结果表明针孔辅助点投影具有较高的空间分辨力、较大的视场、较高的图像对比度,将成为瑞利-泰勒不稳定性研究、激光状态方程研究等物理实验的重要诊断方法之一。

**关键词** X 射线光学; 背光照相; 针孔辅助点投影; 激光等离子体; 惯性约束聚变

**中图分类号** O434.12 **文献标识码** A

### Experimental Research on Pinhole-Assisted Point Projection Diagnostic Scheme

Dong Jiaqin<sup>1, 2</sup> Fu Sizu<sup>1</sup> Xiong Jun<sup>1</sup> Wang Ruirong<sup>1</sup> Huang Xiuguang<sup>1</sup>  
Shu Hua<sup>1</sup> Gu Yuan<sup>1</sup> Wang Zhanshan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China)  
<sup>2</sup> Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** Pinhole-assisted point projection (PAPP) backlight scheme is a newly developed diagnostic technique for laser-plasma experiments in foreign laboratories, which will play an important role in diagnostic experiments of inertial confinement fusion (ICF) physics. Experiments have been carried out on the additional beam of “Shenguang-II” laser facility, to test the practicability of PAPP scheme. The K-shell X rays ( $\sim 4.7$  keV) emitted from laser-produced planar Ti targets pass through the pinhole aperture with diameter of 10~40  $\mu\text{m}$ , then cast the shadow of the Au sample on CCD. Time-integrated two-dimensional (2D) pictures of the samples are obtained in the experiments with the resolution better than 16.1  $\mu\text{m}$ . The merits, such as high resolution, large field-of-view, high contrast, have been found in the experimental results, and PAPP will become one of the most important diagnostic methods for Rayleigh-Taylor instability research, equation of state (EOS) research and so on.

**Key words** X-ray optics; backlight photography; pinhole-assisted point projection; laser plasma; inertial confinement fusion

## 1 引言

激光驱动的惯性约束聚变(ICF)实验中,常需要高强度高光子能量的 X 射线背光,对高收缩比、高密度的样品进行诊断。由于几 keV 能区的 X 射线光学成像元件的制造相当困难,X 射线针孔照相

一直是主要的背光诊断方法。

近年来,随着高功率激光装置的发展和惯性约束聚变物理实验研究的深入,被诊断对象的尺度和密度也随着增大,这就要求诊断光源具有更大的视场和更高的光子能量。这对于针孔照相而言,一方

收稿日期: 2007-07-17; 收到修改稿日期: 2007-10-10

基金项目: 国家 863 计划(2007AA804107)资助课题。

作者简介: 董佳钦(1977—),男,浙江嵊州人,助理研究员,硕士研究生,主要从事激光等离子体实验方面的研究。

E-mail: qbcat@netease.com

导师简介: 王占山(1963—),男,吉林辽东人,教授,博士生导师,主要从事极紫外与软 X 射线光学及技术等方面的研究。

E-mail: wangzs@mail.tongji.edu.cn

面需要通过增大驱动激光均匀辐照区域的面积来获取大视场,另一方面需要使用更高  $Z$ (原子序数)材料的照明靶及更高的驱动激光功率密度。这两方面都对驱动诊断光源的激光光束的能量提出了极高的要求,因而传统的 X 射线针孔照相诊断方法遇到了很大的困难。

针孔辅助点投影(PAPP)背光成像<sup>[1]</sup>是近年来兴起的一种 X 射线背光诊断方法,通过小口径的针孔将等离子体辐射的 X 射线导出一小束,针孔就成为一个等效的点源,用来对被诊断对象进行投影成像。与传统的针孔成像相比,针孔辅助点投影法拥有以下优点:1)驱动激光可使用点焦,从而大幅度地减小对激光能量的需求的同时获得较高的驱动激光功率密度,以满足较高光子能量的 X 射线产生;2)获得相对较大的诊断区域(视场),且 X 射线在诊断区域内的辐照相对均匀,不依赖于驱动激光光束均匀化技术;3)获得诊断图像的亮度更高,允许的放大倍数更大。

美国的研究人员在 OMEGA 等装置上开展了一系列验证实验<sup>[2~4]</sup>,验证了针孔辅助点投影方法的可行性、有效性和实用性,并已逐步将这种诊断方法应用于高能高密度物理实验的诊断<sup>[5]</sup>。本文简要叙述了针孔辅助点投影的工作原理,介绍针孔辅助点投影在神光 II 第九路平台上的应用演示实验进展,并较为细致地讨论这种诊断方式的特点。

## 2 针孔辅助点投影原理

图 1 为典型的“针孔辅助点光源投影”方案的示意图<sup>[3]</sup>, $p$  为物距, $q$  为像距,针孔与照明靶距离为  $l$ ,针孔孔径为  $D$ 。纳秒级脉冲的驱动激光聚焦成百微米尺度的焦点并驱动照明靶产生热等离子体。等离子体所发射的 X 射线被针孔光阑约束在十微米

尺度内,构成了等效的点发射源,并将样品投影在相机上,放大倍数  $M$  可由为:

$$M = q/p, \quad (1)$$

在激光焦斑尺寸维持不变的前提下,照明靶与针孔的距离  $l$  决定了视场角, $l$  越小则视场角越大,诊断区域内 X 射线探测光强的分布越均匀。

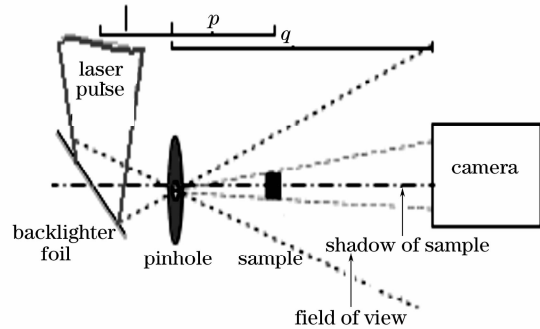


图 1 针孔辅助点投影

Fig. 1 Pinhole-assisted point projection

点投影诊断方式的空间分辨力与针孔成像类似,系统能达到的最高空间分辨力  $\sigma$  主要取决于针孔的口径,可以表述为几何项和衍射项的均方根:<sup>[6]</sup>

$$\sigma^2 = \left[ \frac{(M+1)}{M} D \right]^2 + \left[ 2.44\lambda \frac{p}{D} \right]^2. \quad (2)$$

## 3 实验描述

实验在神光 II 装置第九路上进行<sup>[7]</sup>,光路如图 2 所示。所用的驱动激光波长为  $0.53 \mu\text{m}$  ( $2\omega$ ),脉冲宽度约 2 ns,激光能量约 1200 J,激光经非球面透镜聚焦后的焦斑尺寸约  $\phi 230 \mu\text{m}$ 。采用厚  $8.5 \mu\text{m}$  的平面 Ti 箔作为照明靶,通过两支正交的平行光管监控靶面的位置。靶面法向与激光入射方向保持夹角  $\theta$ ,以保证较多的 X 射线进入诊断光路。用季戊四醇(PET)平面晶体谱仪<sup>[8]</sup>测量 Ti 等离子体发射的 X 射线谱,测谱范围约 3.4~6.1 keV。

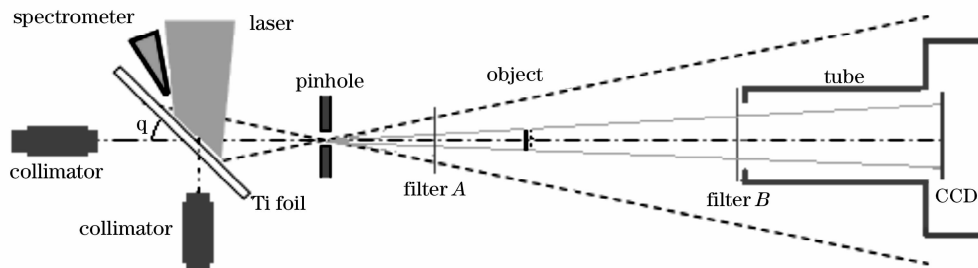


图 2 实验排布示意图

Fig. 2 Schematic view of the experimental configuration

针孔离靶点约 5~15 mm,针孔基板为厚约  $15 \mu\text{m}$  的 Au,针孔孔径在  $10\sim 40 \mu\text{m}$  范围内。被诊

断的样品(物)为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  区域内 4 块不同周期的栅格,距离针孔约 160 mm,由中国科技大学制

作完成<sup>[9]</sup>。栅格由厚  $2\ \mu\text{m}$  的金箔经过光刻制作而成,带有  $1\ \mu\text{m}$  CH 衬底。金栅条与间隙的宽度比为 1:1。样品前方放置几十微米的 Ti 箔滤片 A,一方面可防止打靶产生的碎片对样品的破坏,另一方面可对入射的 X 射线进行过滤,抑制  $2\ \text{keV}$  以下及  $5\sim 8\ \text{keV}$  部分。

驱动激光作用于 Ti 靶,产生了具有一定面积的高温等离子体。这种等离子体辐射的 X 射线向  $4\pi$  方向发射,在针孔板的约束下有一小束 X 射线通过针孔进入诊断光路。由于针孔的尺寸要远小于等离子体发光区域,针孔就可等效为一个极小的 X 射线点源。这个“点源”经过滤片 A 准单色化之后将样品投影在 CCD 接收面上。该 CCD 相机具有  $1024\times 1024$  个像素,每个像素尺寸为  $24\ \mu\text{m}\times 24\ \mu\text{m}$ ,响应范围覆盖可见光到  $10\ \text{keV}$  左右的 X 射线。由于该 CCD 对可见光有较高的响应效率,漫射的驱动激光和其他可见光将构成严重的干扰信号,因此需在光路中引入滤片 B ( $8.5\ \mu\text{m}$  厚 Ti 箔)和固定于插板阀上的套筒,以隔离可见光。

#### 4 实验结果与分析

实验中有 9 发实验记录到了样品图像,下文以编号为 200702020 发次的实验为例。对实验结果作简要叙述和分析。该发实验中驱动激光能量约  $1600\ \text{J}$  ( $2\omega$ ),功率密度约为  $1.6\times 10^{15}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。靶面法向与入射激光的夹角  $\theta$  约为  $2^\circ$ 。所用辅助针孔的口径为  $D=14\ \mu\text{m}$ ,针孔离靶距离  $l\approx 5\ \text{mm}$ ,物距  $p\approx 168\ \text{mm}$ ,像距  $q\approx 790\ \text{mm}$ ,成像放大倍数  $M\approx 4.7$ 。

此发实验所用的 Ti 滤片为总厚度为  $34\ \mu\text{m}$ ,图 3 的虚线为计算得到的透射率曲线,实线为  $2\ \mu\text{m}$  的 Au(样品)透射率曲线。可以发现,Ti 箔对 X 射线形成了  $4\sim 5\ \text{keV}$  的准单色通道。而在此激光驱动条件下,约  $4.7\ \text{keV}$  的 Ti 的  $\text{He}\alpha$  线为这个通道中最强的线辐射,经过  $34\ \mu\text{m}$  Ti 的透射率为  $20\%$ ,而经过  $2\ \mu\text{m}$  Au 透射率约为  $4.5\%$ 。

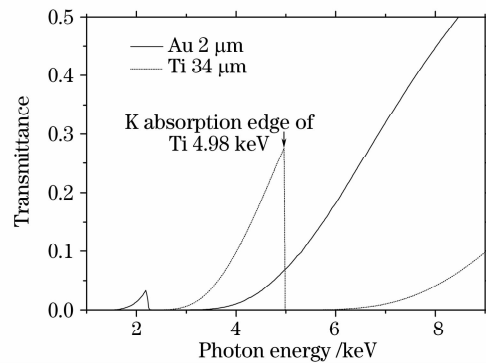


图 3 不同光能量下 Ti 和 Au 的透射率曲线  
Fig. 3 Transmission of Ti and Au for different photon energy

图 4(a)为样品在显微镜下的图像,测得其 A、B、C、D 四个区域的栅格周期依次为  $40.2\ \mu\text{m}$ 、 $24.0\ \mu\text{m}$ 、 $16.1\ \mu\text{m}$ 、 $10.0\ \mu\text{m}$ 。从点投影实验测得的图像[图 4(b)、图 4(c)]看到,A(周期  $40.2\ \mu\text{m}$ )、B(周期  $24.0\ \mu\text{m}$ )、C(周期  $16.1\ \mu\text{m}$ )三个区域可以较清晰的被分辨。而 D 区域中部由于样品受力变形使周期产生了缺陷,部分条纹间隔大于设计值因而隐约可见条纹,而 D 的边部区域变形小,栅格周期保持在  $10\ \mu\text{m}$  左右,因而未见明显的条纹。

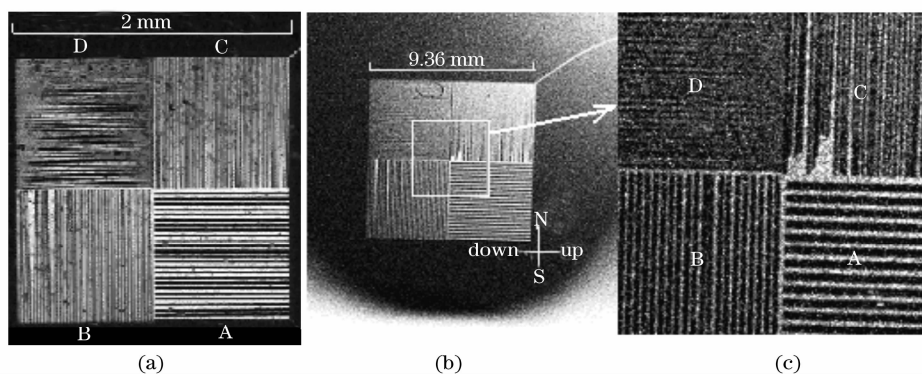


图 4 样品在显微镜下的图像(a), 2007020201 发次记录到的图像(b)及其中部的放大像(c)

Fig. 4 Images of the sample under microscope (a), from shot 2007020201 (b) and the enlarged central region (c)

图 5 给出了四个区域的强度分布曲线,图中可以反映出各个区域图像条纹不同周期。其中 D 区域的强度分布没有明显的周期性,表明样品的 D 区域已经不能被清晰分辨。因此可以得出结论,系统

的实际分辨力应介于  $10\ \mu\text{m}$ (D 区周期)和  $16.1\ \mu\text{m}$ (C 区周期)之间。

通过图 5 的强度分布曲线,还可以计算出像上各个区域的调制度  $m(i)$ ,并计算出调制传递函数。

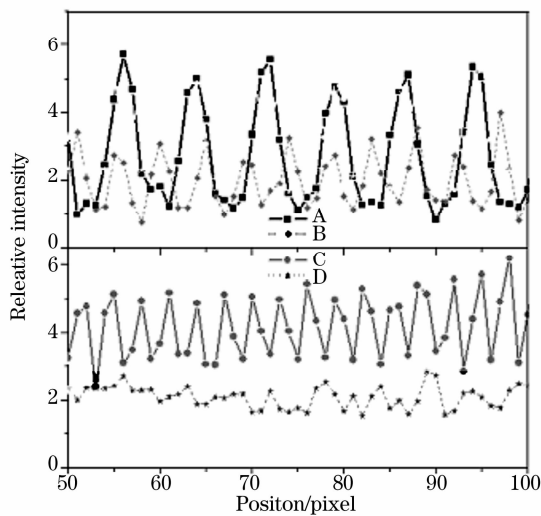


图 5 2007020201 发次实验图像中四个区域的相对强度分布曲线

Fig. 5 Relative intensity distribution of the four regions extracted from the picture of shot 2007020201

$$m(i) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (3)$$

$$f_{\text{MT}} = \frac{m(i)}{m(o)}, \quad (4)$$

由图 3 可得到 Au 对 4.7 keV 光子的透射率为 4.8%，从而得到物的调制度  $m(o) = 0.908$ 。进而可以得到大致的调制传递函数曲线(图 6)。如果以调制传递函数大于 5% 为空间分辨力极限，则可得出系统的分辨力约在 67 line pair/mm(可分辨的最小周期为 14.9  $\mu\text{m}$ )。

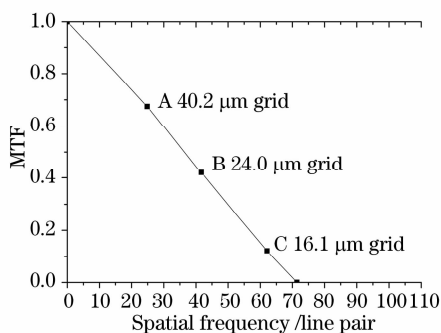


图 6 调制传递函数曲线

Fig. 6 Modulation transfer function curve

(2)式的第一项为几何分辨力的贡献,第二项为衍射引起的物理分辨力的贡献。由此计算得到综合的分辨力为 18.6  $\mu\text{m}$ ,反而比实验中测得的分辨力要差。主要原因有以下两点:1)显微镜在测量针孔孔径的过程中有  $\pm 2 \mu\text{m}$  的读数误差;2)高强度 X 射线对针孔的辐照引起了堵孔效应(Pinhole closure)<sup>[3]</sup>,使得针孔口径缩小,空间分辨力提高。

其中后者可能是最主要的原因。

除了空间分辨力这一重要因素之外,X 射线辐照区域的均匀性对 X 射线诊断实验起着重要的作用。特别是在对实验结果的定量分析时,辐照均匀性是至关重要的因素。从本次实验的结果看来,点投影方法可以在样品位置上的提供毫米尺度的均匀辐照面积。实验中还发现,在其他条件不变的前提下,缩小针孔与照明靶之间的距离  $l$  能够显著提高 X 射线背光在样品位置处的辐照均匀性。

## 5 结 论

利用几 keV 的 X 射线背光,通过针孔辅助点投影诊断方法,获得了较高亮度、衬比度的样品靶二维空间分辨图像,空间分辨力优于 16.1  $\mu\text{m}$ 。相比针孔成像诊断方法,点投影方法具有更好的均匀性,更大的视场,得到图像的亮度更高。针孔辅助点投影将成为瑞利-泰勒不稳定研究<sup>[10]</sup>、激光状态方程研究<sup>[11~13]</sup>等物理实验的重要实验方法。

## 参 考 文 献

- O. L. Landen, D. R. Farley, S. G. Glendinning *et al.*, X-ray backlighting for the national ignition facility [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72**(1): 627~633
- J. Workman, J. R. Fincke, P. Keiter *et al.*, Development of intense point X-ray sources for backlighting high energy density experiments[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(10): 3915~3920
- A. B. Bullock, O. L. Landen, B. E. Blue *et al.*, X-ray induced pinhole closure in point-projection X-ray radiography [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**: 043301-1~044301-7
- Keiter Paul A, Workman Jonathan. High-energy point-projection radiography of a driven, shielded Hohlraum [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(2): 10E324-1~10E324-3
- C. C. Kuranz, B. E. Blue, R. P. Drake *et al.*, Dual, orthogonal, backlit pinhole radiography in OMEGA experiments [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(2): 10E327-1~10E327-4
- Jeffrey A. Koch, Otto L. Landen, Troy W. Barbee *et al.*, High-energy X-ray microscopy techniques for laser-fusion plasma research at the national ignition facility [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(10): 1784~1795
- Wang Yanhai, Wang Jiangfeng, Li Xuechun. Laser pulse shaping and modification techniques in front-end of high-power laser facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 477~481
- 王艳海, 王江峰, 李学春. 高功率激光装置前端系统激光脉冲的时间整形及修正技术 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 477~481
- Wang Ruihong, Wang Wei, Wang Chen *et al.*, Spectral characterization of double-driven X-ray laser plasmas [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(3): 556~560
- 王瑞荣, 王伟, 王琛等. 双驱动 X 射线激光等离子体能谱特性研究 [J]. *物理学报*, 2003, **52**(3): 556~560
- 傅绍军, 洪义麟, 陶晓明. 自支撑软 X 射线针孔透射光栅研究 [J]. *光学学报*, 1994, **14**(1): 112
- Wu Junfeng, Ye Wenhua, Zhang Weiyuan. Numerical simulation of hydrodynamic instability in direct-drive cylindrical implosion [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(3):

- 373~376  
吴俊峰, 叶文华, 张维岩. 直接驱动柱内爆流体力学不稳定性数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(3): 373~376
- 11 Huang Xiuguang, Fu Sizu, Shu Hua *et al.*. Experimental measurements on equation of state of gold by using high power laser driving shocks[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(6): 743~747  
黄秀光, 傅思祖, 舒桦等. 利用高功率激光驱动冲击波进行金属材料状态方程实验测量[J]. 中国激光, 2007, **34**(6): 743~747
- 12 Shu Hua, Fu Sizu, Ma Mingxun *et al.*. Calculation on laser driven shock wave stability of propagation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(2): 253~256  
舒桦, 傅思祖, 马民勋等. 激光驱动冲击波传播稳定性的计算分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(2): 253~256
- 13 Zhou Bin, Wang Jue, Shen Jun *et al.*. Surface perturbation target for the study of Rayleigh-Taylor instability[J]. *Chin. J. Lasers*, 1999, **A26**(10): 878~882  
周斌, 王珏, 沈军等. 研究瑞利-泰勒流体力学不稳定性的实验用靶[J]. 中国激光, 1999, **A26**(10): 878~882