

基于神光 III 原型装置的新型针孔点背光实验

晏骥 郑建华 陈黎 涂绍勇 韦敏习 余波 刘慎业 江少恩[†]

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2012年8月18日收到; 2012年9月24日收到修改稿)

在神光 III 原型装置上发展和改进了新型针孔点背光技术. 通过 1600 J/1 ns/351 nm 激光与 3 μm 钛背光靶相互作用产生 4.75 keV 的点光源, 利用该点光源成像获得了高质量的钨丝以及靶丸图像, 并通过多种诊断设备获取了较为完整的背光源参数. 实验结果表明, 新型的针孔点背光具备高亮度、高空间分辨等优点, 可以广泛应用于高能密度物理研究中.

关键词: 高能密度物理, 惯性约束聚变, 背光照相, 针孔点背光

PACS: 52.57.-z, 52.50.Jm, 52.38.-r, 52.38.Ph

DOI: 10.7498/aps.62.045203

1 引言

背光照相是通过强激光与背光靶相互作用产生激光等离子体 X 光源, 利用该光源辐照待测量样品从而获取物理图像. 背光照相的方法由于其光源能点可控、感兴趣时间可自由选择、光源亮度高、图像质量好等优点, 是当前高能密度物理、惯性约束聚变研究中极其重要的诊断方法. 目前背光照相方法已广泛应用于内爆物理、流体力学不稳定性、不透明度等重要课题研究中^[1,2].

背光照相的关键在于利用激光与靶物质相互作用获取性能良好的点光源. 目前一般采用面背光结合针孔成像的方式来获取高空间分辨 (约为 10 μm) 的物理图像, 但是面背光成像方式存在着背光均匀性差、成像视场受限的缺点, 不利于开展精密物理实验. 国外研究人员于 2001 年开始在欧米茄 (OMEGA) 装置上开展大量针孔点背光成像技术的实验研究, 为精密化的物理研究提供了支持^[3,4]. 国内从 2008 年开始在神光 II 装置上开展相关研究, 初步发展了针孔点背光技术^[5,6], 但是其中仍然存在噪声屏蔽等关键问题亟待解决, 为此需要开展针孔点背光技术的进一步研究.

本文在神光 II 背光源实验研究的基础上改进了针孔点背光技术, 发展并优化了新型针孔点背光.

在神光 III 原型装置上通过新型针孔点背光对样品成像获得了高质量的图像, 同时通过多种诊断设备获取了较为完整的背光源参数. 实验结果表明, 新型的针孔点背光具备高亮度、高空间分辨等优点, 可以广泛应用于高能密度物理和惯性约束聚变的研究中.

2 新型针孔点背光设计

针孔点背光首先是激光与靶物质相互作用产生高温等离子体并发射近似各向同性的 X 光源, 这样的 X 光源尺度与激光焦斑基本相同 (约为几百微米), 在背光靶附近放置孔径约为 10 μm 的高 Z 针孔板 (孔径大小基本决定了成像系统的空间分辨率) 用于约束 X 光源形成次级点光源, 然后利用该点光源对待测量样品投影成像. 针孔点背光存在多种结构来实现, 如图 1 所示. 图 1(a) 为早期针孔点背光研究中采用的设计^[3,5,6], 该设计存在着噪声屏蔽差的致命缺陷, 很难获得高信噪比的图像 (这里的噪声主要是指部分等离子体翻越针孔板发光直接进入成像记录面上). 在图 1(a) 基础上为了能够更好地屏蔽噪声的影响, 改进为图 1(b) 的设计. 图 1(b) 基本原理是将背光靶与针孔板结合为一体, 使得激光注入面与成像记录面能够被完全隔离开, 从而达到屏蔽噪声的目的.

[†] 通讯作者. E-mail: jiangshn@vip.sina.com

图 1(b) 的设计中存在几个关键点: 首先, 该设计是利用背光靶靶后 X 光, 由于中高 Z 靶材料对 X 光源的强吸收, 所以背光靶材料需要选择较低 Z 材料降低背光靶自吸收的影响; 其次, 由于背光靶和针孔板是结合一体设计, 烧蚀等离子体会对针孔板产生堵孔的效应, 所以需要在背光靶和针孔板之间添加低 Z 材料层来过渡. 图 1(b) 所示的新型针孔点背光的基本结构如图 2 所示. 在当前功率密度为 10^{14} — 10^{15} W/cm² 的激光注入条件下, 背光靶选择厚度为 3 μm 的 Ti (通过较薄的背光靶提高转换效率以及降低靶的自吸收从而提高光源亮度 [7,8]); 选择了厚度为 25 μm 的 CH 作为过渡层, 主要作用包括防止等离子体堵孔, 降低冲击波对针孔板的影响, 降低超热电子的影响; 针孔板选择了厚度为 20 μm 的高 Z 材料 Ta 片, 针孔孔径为 15 μm ; 屏蔽片选择了尺寸为 8 mm \times 8 mm 的 Cu 片.

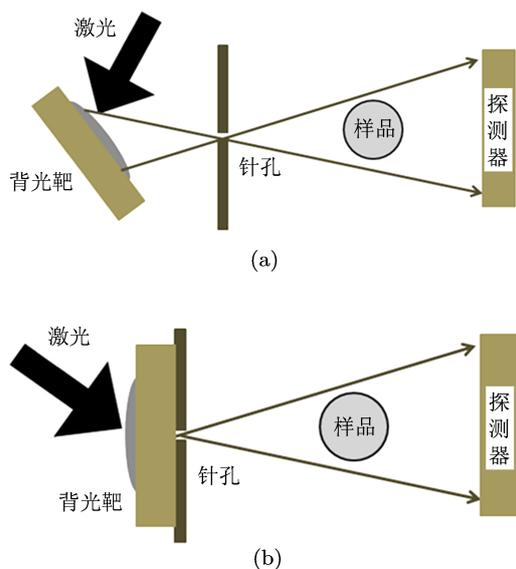


图 1 针孔点背光典型设计排布 (a) 早期设计; (b) 改进后设计

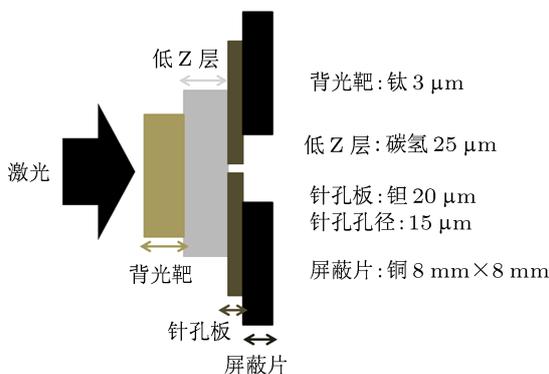


图 2 改进的针孔点背光靶结构示意图

3 实验排布

本次实验在神光 III 原型装置上开展. 实验排布如图 3 所示, 注入激光选择原型装置 N₁, N₃ 两路激光 ((2×800) J/1 ns/聚焦焦斑 200 μm) 与背光靶法线方向成 30° 夹角入射, 激光与 Ti 背光靶相互作用产生以 4.75 keV 为主的光源; 针孔相机 (PHC) 放置于激光注入面, 用于监测背光靶等离子体发光情况; 两台 X 光探测器 (XRD) 放置于激光注入面 (位置分别为上极点 67.5°, 西经 180°; 上极点 78.7°, 西经 146.25°) 与背光靶的法线方向夹角均约为 15°, 用于获取 Ti 背光靶类 He 线 (约为 4.75 keV) 的发光强度以及时间行为, 从而获取转换效率信息.

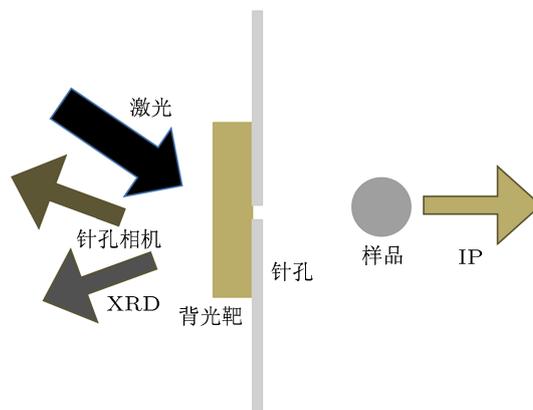


图 3 实验排布图

成像样品选择钨丝加靶丸. 其中 40 μm 粗, 间距 300 μm 的钨丝均匀分布在样品框内, 同时在钨丝上装配内径 300 μm , 球壳总厚度 20 μm 的靶丸. 记录介质采用了成像板 (IP, 型号为 SR, 扫描仪为 BAS5000 型, 扫描时间为曝光后 30 min, 成像板单个像素元大小为 25 $\mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$), 对 Multi-keV 的 X 光源响应为 2%—8%, 滤片选择 200 μm Be 结合 5 μm Ti, 对 4.75 keV 背光源透过率约为 70%, 其中 Be 滤片用于防止烧蚀碎片和滤除软 X 光噪声, Ti 滤片用于准单能化背光源. 针孔板与样品距离为 3.5 cm, 针孔板与记录面距离为 30 cm, 成像系统放大倍数 M 为 8.6.

4 光源性能优化

针孔点背光实验研究中对杂散光的屏蔽是最为关键的问题, 这里的杂散光主要是发光的背光靶等离子体朝外喷射翻越针孔板直接被成像板所记录, 形成强干扰噪声. 早期针孔点背光实验采用的

多种方法并没有从根本上解决该问题, 本次实验中采用的新型针孔点背光从原理上可以完全屏蔽杂散光的影响, 但是实验过程中仍然出现了该噪声的干扰.

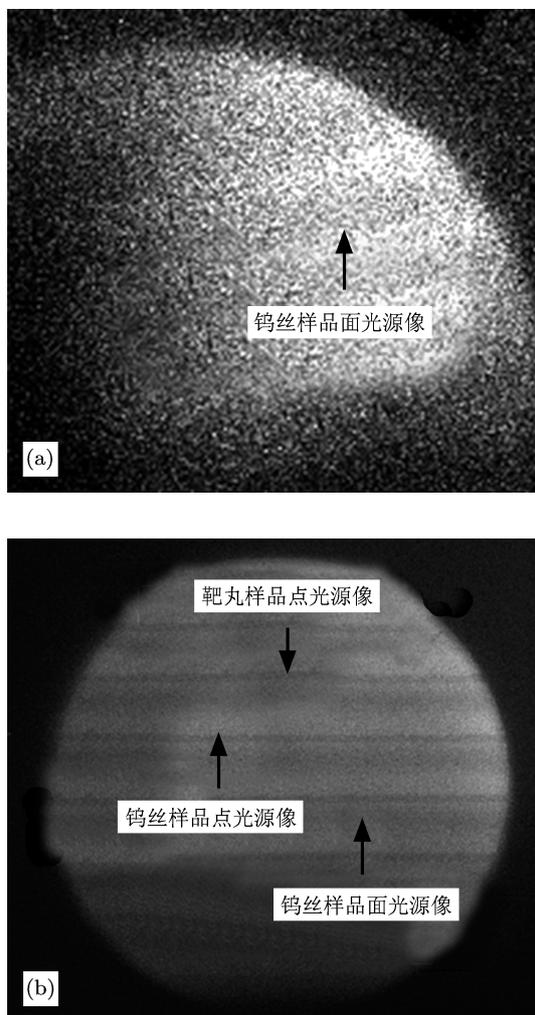


图4 (a) 强面光源干扰成像; (b) 弱面光源干扰成像

在基于图2的靶设计中为了方便靶场定位瞄准在距离背光靶点2 mm处开了尺寸为200 μm 的定位槽, 实验结果如图4(a)所示. 从结果只能看到非常粗的钨丝像(尺寸约为200 μm), 表明了面光源噪声强度非常强, 大大影响了点光源成像的效果, 同时该噪声源尺寸与定位槽尺寸相符合, 判断为该定位槽产生的噪声. 为此在后续实验中屏蔽掉该定位槽, 之后实验结果如图4(b)所示. 从图4(b)可以看到粗细分布的钨丝像(尺寸分别为100 μm , 40 μm), 表明除了针孔处产生的次级点光源成像之外, 还存在一个空间上与针孔距离较近、强度较弱、尺寸约为百微米的面光源噪声同时对样品成像. 通过对打靶后靶架回收的分析, 推断出该面光

源噪声为穿过针孔的高温碳氢等离子体烧蚀靶架表面产生的噪声光源, 为此在后续实验中靶架表面均涂抹软胶降低该噪声源, 最终获得了高信噪比的清晰图像, 如图5所示.

本次实验结果表明, 对于新型的针孔点背光设计, 为了杜绝等离子体翻越针孔板产生额外光源噪声, 首先需要添加尺寸为8 mm的大屏蔽片挡光, 同时形成次级点光源的针孔与靶架表面需要有一定距离(大于1 mm), 并且在靶架表面涂软胶防止针孔后等离子体烧蚀再发光.

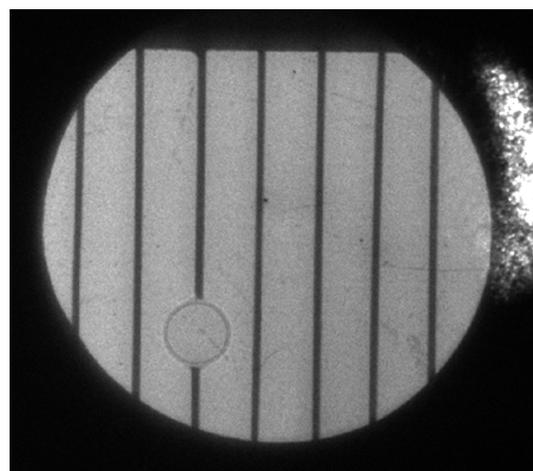


图5 点光源获取样品的理想图像

5 光源性能分析

随着惯性约束聚变研究的深入, 背光照相诊断不仅仅满足于获取物理图像, 而是需要从物理图像中提取相关物理信息. 在这样的前提下, 需要对光源的参数进行全面的考核, 为此, 本轮实验中通过XRD和针孔相机获取光源的时间行为和强度信息; 通过IP成像板获取光源均匀性和空间分辨、信噪比等信息; 还利用靶丸样品考核了靶丸样品相衬成像性质.

5.1 时间行为

背光源与激光的时间关系是光源的重要参数之一, 它表征了背光源持续时间与强度分布. 在这里选取其中一发数据进行分析, 结果如图6所示(图6中将激光信号与XRD信号起始点对齐). 从图6可以看到, 两台XRD获取的信号波形与激光脉冲信号完全一致, 表明了产生的X光源强度与注入激光的强度基本成正比关系; 另一方面, 图6中X光

信号的持续时间约为 870 ps, 激光的持续时间约为 1170 ps, 表明了激光注入到背光靶上到靶物质被电离化形成高温等离子体并发出硬 X 光存在一个响应时间, 而当激光结束时高温等离子体将很快冷却, 停止发射硬 X 光, 所以激光比 X 光信号的持续时间稍长。

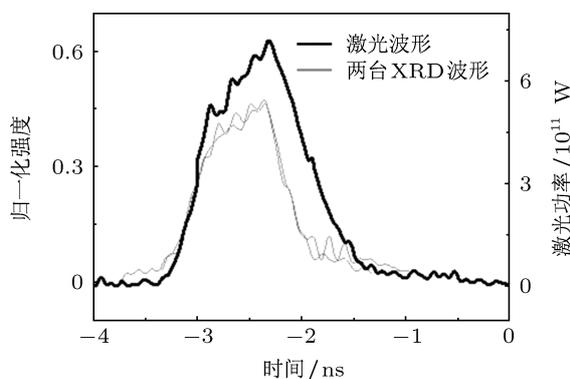


图 6 XRD 信号与激光波形时间行为对比

5.2 光源通量 (亮度)

光源通量 (即亮度) 是光源最关键的参数, 本节中首先利用一维流体数值模拟程序给出当前激光功率密度下背光靶材料产生的等离子体温度密度, 数值模拟结果如图 7 所示. 其中令注入激光功率密度为 $1 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 脉宽为 1 ns, 波长为 351 nm; 靶材料选择厚度为 10 μm 的 Ti, 图 7(a) 表明当前 Ti 等离子体的温度约为 1000 eV, 同时还可以得到等离子体密度约为固体密度的千分之一 (图中未画出密度分布); 再基于局域热动平衡假设通过模型计算给出在当前等离子体状态下的能谱及发射强度分布, 结果如图 7(b). 根据图 7(b) 再结合实际激光状况可以估算出总共发射的 4.75 keV 光子, N_c 满足公式

$$N_c = \frac{I \cdot t \cdot V \cdot \Gamma}{h\nu} = \frac{(5 \times 10^{15}) \cdot 10^{-9} \cdot (2 \times 10^{-2}) \cdot 5}{4.75 \times 10^3 \times 1.6 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 2.6 \times 10^{17},$$

其中 I 是发射强度 (单位为 $\text{J} \cdot (\text{s} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{eV})^{-1}$), $h\nu$ 是单个光子能量 (单位为 eV), t 是发光时间 (单位为 s), V 是发光体积 (近似为激光焦斑, 单位为 cm^3), Γ 是谱线宽度 (一般来说, keV 级的谱线其宽度约为其能点的千分之一, 单位为 eV), 通过模拟计算得到发射的总光子数约为 10^{17} 量级。

本轮实验利用 XRD 获取光源强度的信息, 其激光与背光靶相互作用产生的光子数 N_c 满足公式:

$$N_c = \frac{E_L \cdot \eta(4\pi)}{h\nu} = \frac{1617 \times 1.5\%}{4.75 \times 10^3 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 3.16 \times 10^{16}(\text{个}),$$

其中 E_L 为激光能量 1617 J, η 为转换效率 (XRD 测量结果为 1.5% (4π 立体角, 不确定度为 30%)), $h\nu$ 为光源单个能量 4.75 keV (这里将类 He 的 Ti 光源近似为单色光源). 对比可以发现, 实验结果比计算结果低近一个数量级, 其中最主要的原因在于模拟计算过程采用的是局域热动平衡假设, 在激光直接驱动过程中该假设与真实情况偏离较大, 尤其是 Ti 等离子体自身的离子分布. 另一方面来说, 采用的多种数值模拟工具相结合的方法与实验结果在一定程度上还是可以相互比对的。

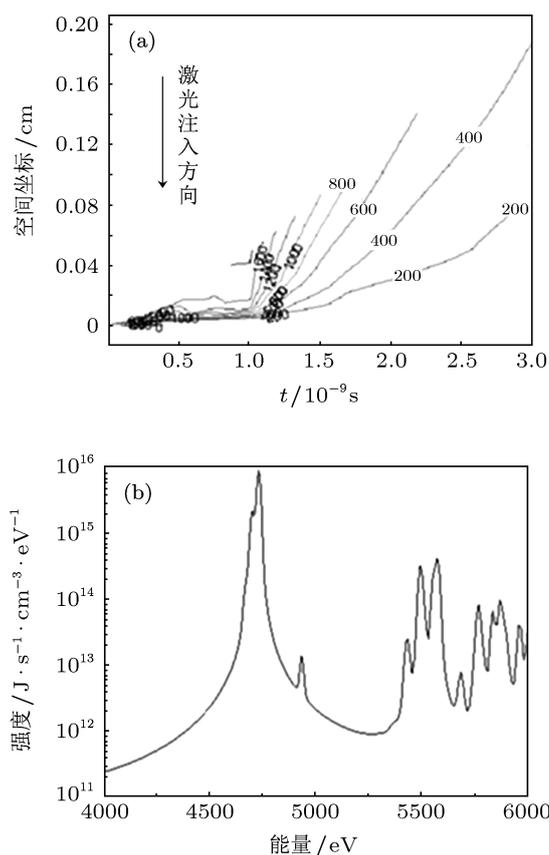


图 7 (a) 一维流体模拟等离子体状态分布, 等高线为等离子体温度 (单位为 eV); (b) 发光光谱及强度分布

从针孔相机监测 Ti 背光总发光面的直径为 250 μm , 而针孔孔径为 15 μm (针孔孔径尺寸即为实际光源利用到的部分), 综合考虑背光发光中间强边缘弱, 近似认为穿过针孔形成次级点光源的光子数占总光子数的 10% (见图 8). 同时, 实际对成像产

生作用的光源只有 2π 立体角. 为此, 真实的点光源光通量满足公式:

$$\Phi = \frac{N_e P}{2 \times 4\pi} \approx 1 \times 10^{14} (\text{sr} \cdot \text{ns})^{-1}$$

其中 P 为成像光子份额的 10%, 4π 为立体角, 光通量单位为 $\text{sr}^{-1} \cdot \text{ns}^{-1}$. 对比国内同步辐射光源光通量 (约 $10^{13} \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 强激光驱动等离子体光源的光通量有着本质的提升, 这样的超强超快高分辨的点光源对于新兴前沿的纳秒皮秒级超快过程研究具有重要意义.

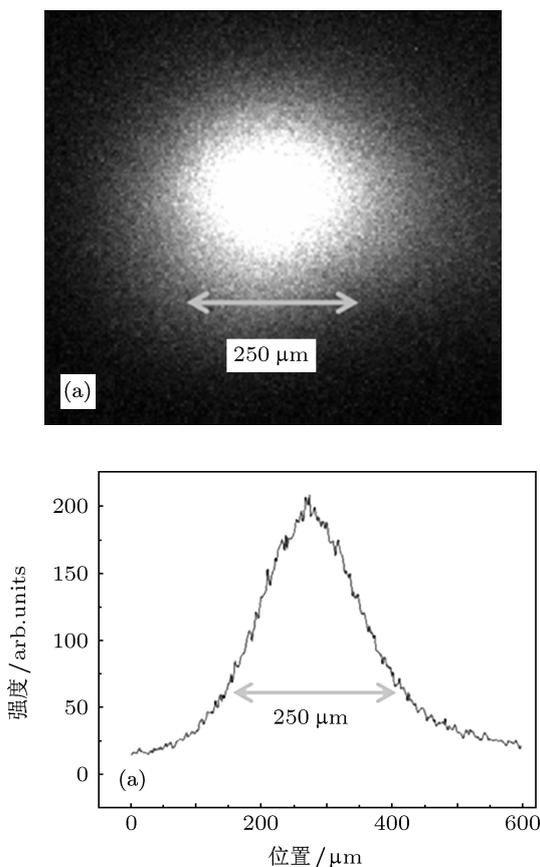


图8 针孔相机监测背光靶发光结果 (a) 注入焦斑图像; (b) 背光发光强度分布

在该光通量下, 成像面与光源的距离 R 为 30 cm, 单个像素元大小 S 为 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$, 且型号为 SR 的 IP 成像板对于 4.75 keV 光子的响应 r 约为 5%^[9,10], 采用滤片透过率 T 为 70%, 那么 IP 成像板上单个像素元计数 N 满足公式:

$$\begin{aligned} N &= \Phi \frac{S}{R^2} r \cdot T \\ &\approx 10^{14} \times \left(\frac{25 \times 10^{-6}}{30 \times 10^{-2}} \right) \times 5\% \times 70\% \\ &\approx 2.8 \times 10^4 \text{ (个)}. \end{aligned}$$

从图 5 的结果中 IP 成像板记录到的信号每个像素元计数约为 5×10^4 , 与推导的结果基本符合, 表明采用该方法估算光源的强度是合理的.

5.3 空间分辨

空间分辨能力是点光源重要参数, 针对图 5 中粗细为 $40 \mu\text{m}$, 间距为 $300 \mu\text{m}$ 的钨丝像进行数据处理, 利用求导匀滑傅里叶变化获得其调制传递函数 (MTF) 函数 (见图 9(b)). 为了能够分辨其物理图像, MTF 值需大于 0.05, 在该条件限制下其空间分辨为 81.7lp/mm , 即空间分辨达到 $12.5 \mu\text{m}$, 略好于 $15 \mu\text{m}$ 的针孔孔径.

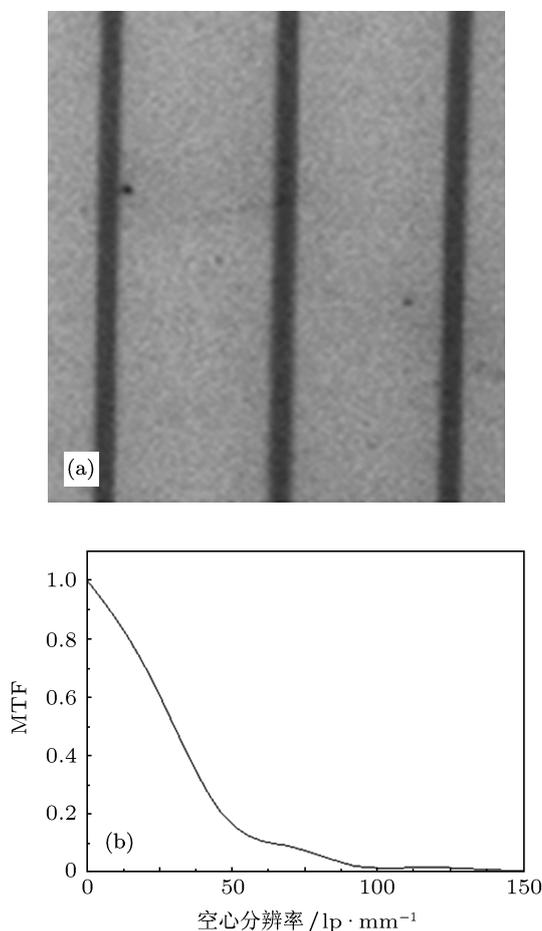


图9 点光源成像结果 (a) 钨丝样品图像; (b) 钨丝样品的 MTF 函数

在一般情况下, 点光源成像系统的空间分辨极限应当不会优于其点光源焦斑, 但是在针孔点背光的设计中为了回避烧蚀碎片的影响, 将针孔板倾斜 15° 放置, 使得实际的点光源焦斑变小从而空间分辨能力提升, 同时也降低了光源的通量, 可以说是牺牲光源亮度来提高空间分辨. 当然针孔板加工过

程中孔径会存在 1—2 μm 的误差, 使得实际针孔小于设计值, 也会造成空间分辨提高的效果。

5.4 背光均匀性

在对图像进行相关物理量提取的过程中背光源的均匀性是获取可靠物理信息的前提, 传统的面背光成像中由于背光源自身分布极其不均匀, 使得提取的物理量可靠度降低, 是当前精密物理实验中需要回避的问题. 针孔点背光由于其自身是一个次级点光源, 在光源的均匀性上得到了保障. 从图 5 结果分析获得其光源强度分布 (见图 10), 可以看到其光源强度分布均匀, 相比较于面背光有本质的提升 (见图 8(b)), 为获取精密的物理信息提供了基础。

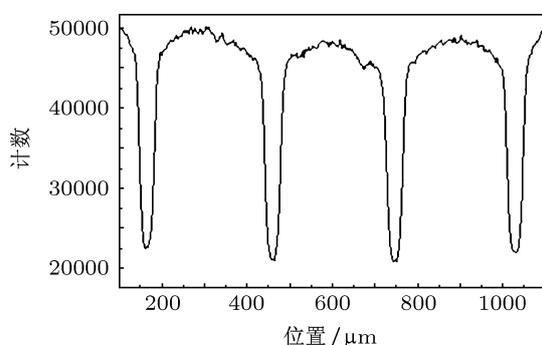


图 10 图 9(a) 钨丝像的强度分布图

5.5 相衬成像性能

在惯性约束聚变 (ICF) 研究中, 填充氘氚聚变燃料的靶丸样品均为轻物质组成且结构复杂, 为此需要发展针对靶丸样品成像的新型技术. 相衬成像可以提高轻物质分界面对比度, 获取更为清晰的物理图像, 是诊断靶丸样品的重要方法, 而相衬成像研究的前提即需要利用激光驱动等离子体获取性能良好的 X 射线点光源. 在本次实验中, 将相衬成

像条件同步考虑, 从而获取了清晰的靶丸样品图像 (见图 11), 靶丸烧蚀层内外表面观察到明显的亮暗光环现象^[11,12], 该现象对于 ICF 研究中内爆压缩过程诊断具有重要的意义. 另一方面, 由于 IP 成像板单个像素元较大 (25 μm) 同时成像放大倍数较小 ($M = 8.6$), 所以靶丸烧蚀层分层结构并不明显。

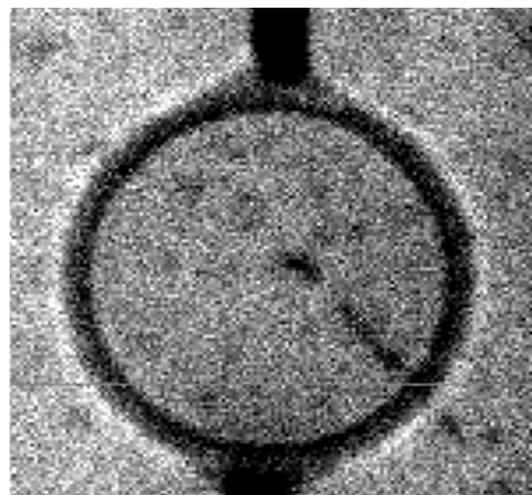


图 11 轻物质靶丸样品相衬成像性能

6 结论

本文在神光 III 原型装置上开展了进一步的针孔点背光实验研究, 通过优化靶设计解决了面光源噪声干扰问题, 获得了干净的点光源. 同时通过多种诊断设备对该光源性能进行了较为全面的考核, 获得了光源时间行为、空间分辨、光通量等重要参数, 为提高精密化实验能力打下基础. 实验结果也表明新型的针孔点背光相比较于传统的面背光成像和早期的针孔点背光在多项光源性能参数上均存在明显的优势, 可以广泛应用于高能量密度物理和 ICF 研究中。

- [1] Kirkwood R K, Milovich J, Bradley D K, Schmitt M, Goldman S R, Kalantar D H, Meeker D, Jones O S, Pollaine S M, Amendt P A, Dewald E, Edwards J, Landen O L, Nikroo A 2009 *Phys. Plasmas* **16** 012702
- [2] Zhang J Y, Yang J M, Xu Y, Yang G H, Yan J, Meng G W, Ding Y N, Wang Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 985 (in Chinese) [张继彦, 杨家敏, 许琰, 杨国洪, 颜君, 孟广为, 丁耀南, 汪艳 2008 物理学报 **57** 985]
- [3] Bullock A B, Landen O L, Bradley D K 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 690
- [4] Blue B E, Hansen J F, Tobin M T, Eder D C, Robey H F 2004 *Rev. Sci.*

Instrum. **75** 4775

- [5] Dong J Q, Fu S Z, Xiong J, Wang R R, Huang X G, Shu H, Gu Y, Wang Z S 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 3 (in Chinese) [董佳钦, 傅思祖, 熊俊, 王瑞荣, 黄秀光, 舒桦, 顾援, 王占山 2008 光学学报 **28** 3]
- [6] Yan J, Jiang S E, Lin Z W, Chen L, Yin Z J 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 10 (in Chinese) [晏骥, 江少恩, 林稚伟, 陈黎, 阴泽杰 2011 强激光与粒子束 **23** 10]
- [7] Hu G Y, Zhang J Y, Zheng J, Shen B F, Liu S Y, Yang J M, Ding Y K, Hu X, Huang Y X, Du H B, Yi R Q, Lei A L, Xu Z Z 2008 *Laser Part. Beams* **26** 661

- [8] Hu G Y, Zheng J, Shen B F, Lei A L, Liu S Y, Zhang J Y, Yang J M, Ding Y K, Hu X, Huang Y X, Du H B, Yi R Q, Xu Z Z 2008 *Phys. Plasmas* **15** 023103
- [9] Maddox B R, Park H S, Remington B A, Chen C, Chen S 2011 *Phys. Plasmas* **18** 056709
- [10] Izumi N, Snavely R, Gregori G, Koch J A, Park H S, Remington B A 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 10E325
- [11] Gureyev T E, Mayo S C, Myers D E, Nesterests Y, Paganin D M, Pogany A, Stevenson A W, Wilkins S W 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 102005
- [12] Koch J A, Landen O L, Koziowski B J, Izumi N, Dewald E L, Salmonson J D, Hammel B A 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 113112

The experimental research of pinhole point backlight based on Shenguang-III proto-type facility

Yan Ji Zheng Jian-Hua Chen Li Tu Shao-Yong Wei Min-Xi Yu Bo
Liu Shen-Ye Jiang Shao-En[†]

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 18 August 2012; revised manuscript received 24 September 2012)

Abstract

A new type of pinhole-assisted point backlighter developed and optimized based on experimental research performed on Shenguang-III proto-type facility is presented. High quality images of tungsten micro wires and capsule are acquired with a 4.75 keV X-ray point source produced by 1600 J/1 ns/351 nm laser interaction with 3 μm Ti target. Detailed parameters of this backlighter are also obtained using a multiple diagnostic device. The results indicate that pinhole-assisted point-projection backlighter has advantages of high intensity and high spatial resolution, and can be widely used in high energy density physics research.

Keywords: high energy density physics, inertial confinement fusion, back light image, pinhole point back light

PACS: 52.57.-z, 52.50.Jm, 52.38.-r, 52.38.Ph

DOI: 10.7498/aps.62.045203

[†] Corresponding author. E-mail: jiangshn@vip.sina.com