

多点光源相衬成像法应用于内爆背光照相实验

晏骥 郑建华 陈黎 胡昕 黄天珺 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11月3日收到; 2013年2月1日收到修改稿)

针对常规内爆背光照相中存在的光源均匀性差、靶丸图像烧蚀层与气体层界面不清晰、瞄准精度差等关键问题设计了新型的背光照相靶. 在神光 II 大型激光装置上采用阵列点光源结合相衬成像的方式获取了清晰的靶丸烧蚀层与气体层界面信息, 同时具备光源均匀性好, 成像视场大的优点; 采用诊断狭缝限光的方式大大提高了瞄准精度使得整体图像质量优于常规靶设计. 实验结果表明, 激光驱动等离子体产生的点光源结合相衬成像方法在精密物理诊断中具有重要的作用, 可以广泛应用于惯性约束聚变以及高能量密度物理研究.

关键词: 惯性约束聚变, 背光照相, 针孔点背光, 相衬成像

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

DOI: 10.7498/aps.62.125203

1 引言

惯性约束聚变 (ICF) 是目前实现可控核聚变的两种途径之一. 获取高精度可靠的物理信息是 ICF 实验研究中实现点火的关键. 国外科研工作者通过诊断设备精密标定、激光参数优化等方式已经将一些关键物理量如内爆速度, 内爆对称性的测量不确定控制在 5%^[1]; 同时国外研究也表明, 为了精确控制物理参数, 这些物理量的测量不确定需要达到 2%^[2], 显然这是目前实验能力所达不到的. 另一方面内爆速度偏低是 ICF 研究实现点火的两大困难点之一, 内爆背光照相方法是获取内爆速度的唯一可靠途径. 当前的内爆背光照相一般采用面背光结合针孔成像获取高空间分辨图像, 这样的图像存在着背光均匀性差, 靶丸烧蚀层与气体层分界面不清晰等缺点, 使得获取的物理图像很难达到物理设计的精度要求^[3,4].

基于国外相关研究工作面临的困难, 国内从 2009 年起开展了一系列相关的研究工作. 首先是在面背光照相的基础上结合国外同期研究发展了针孔点背光技术, 解决了 ICF 研究中背光照相均匀性差的问题^[5,6]; 其次是独立发展了相衬成像技术, 并将其应用于 ICF 研究中获得了清晰的轻物质靶丸界面图像^[7-10]; 这两项技术的发展从原理上解决

了内爆背光照相图像质量不高的问题. 另一方面, 由于国内 ICF 发展正处在起步阶段, 其主要的靶丸样品在尺寸上远远小于国外点火研究靶丸, 对于实验现场的瞄准精度要求过高, 为此需要新的靶设计降低瞄准精度要求.

本文在神光 II 大型激光装置上采用阵列点光源结合相衬成像的方式获取了清晰的靶丸烧蚀层与气体层界面信息, 同时具备光源均匀性好、成像视场大的优点; 采用诊断狭缝限光的方式大大提高了瞄准精度, 使得整体图像质量优于常规靶设计. 实验结果表明, 激光驱动等离子体产生的点光源结合相衬成像方法在精密物理诊断中具有重要的作用, 可以广泛应用于惯性约束聚变以及高能量密度物理研究.

2 新型内爆背光照相靶设计

传统的内爆背光照相靶设计主要分为两个部分: 背光部分采用面背光结构, 即激光直接注入在背光靶薄膜表面产生尺寸略大于激光焦斑, 能点约为几 keV 的 X 光光源, 光源在获取了样品信息后通过一个孔径约为 10 μm 的小孔最终成像在记录面上; 样品部分为了避免间接驱动中高 Z 的 Au 黑腔壁对光源的强吸收, 而在黑腔中心位置开两个尺寸略大于靶丸样品的诊断孔 (图 1(a)). 这样的设计在

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

内爆物理研究的初期立足于获取物理图像是能够满足需求的,但是随着研究的深入,暴露出越来越多的弊端.首先,通过面背光成像获取的物理图像均匀性非常差,在物理信息提取过程中往往人为拟合出背光源强度分布,这是不利于获取高精度物理数据的;其次,基于吸收成像的原理使得轻物质组成的靶丸样品的烧蚀层和气体层分界面并不清晰,在内爆流线信息提取中引入较大的误差;最后,人为调节条纹相机的阴极狭缝来获取靶丸弦长位置存在着 30—50 μm 的瞄准偏差,这样的偏差对于当前神光系列的小尺寸靶丸(约为 300 μm)而言可以说是致命的.

本文针对传统内爆背光照相实验设计存在的问题进行优化和改善,新型靶设计如图 1(b),首先

背光源方面采用了新型的针孔点背光^[5],激光注入在背光靶薄膜表面,从靶后的针孔处形成次级的点光源,并利用投影直接对样品成像.利用点光源的均匀性以及相衬成像性能可以获取均匀以及高对比度的靶丸图像^[7-10];其次在靠近背光靶一侧将诊断孔改为了诊断狭缝,诊断狭缝作用等同于光阑,使得光源只能获取靶丸弦长部分信息,这样所有的偏差全归结于腔靶样品的装配误差上,大大降低了实验现场操作引起的误差.同时为了进一步降低记录系统的瞄准要求,采用了多针孔点光源结构,同时存在 3 个点光源对靶丸样品成像;这样对诊断设备的瞄准精度要求从 10 μm 降低至 1 mm,且必然能获得靶丸弦长位置.

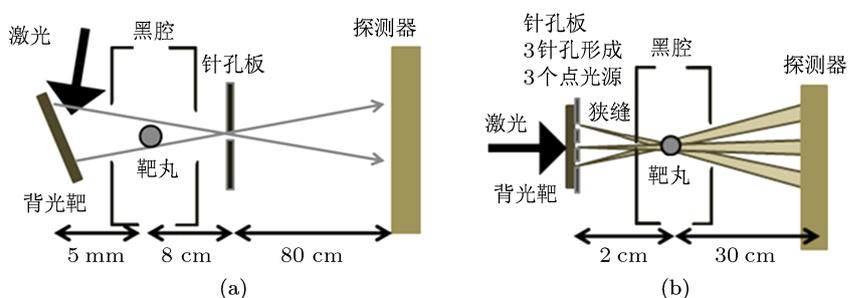


图 1 内爆背光照相设计 (a) 传统设计; (b) 新型设计

3 实验描述

实验在神光 II 装置第九路激光器上进行.实验靶设计及诊断设备排布如图 2 所示,第九路激光(1200 J/1 ns/351 nm) LA 束匀滑斜入射到背光靶面中心(焦斑 450 $\mu\text{m} \times 450 \mu\text{m}$),采用厚 5 μm 的钛作为背光靶材料,产生以 4.75 keV 为主的 X 光背光源.背光靶靶后紧接厚度为 15 μm 的高 Z 钽片并在钽片上均匀排布孔径 9 μm 的三个针孔,针孔之间距离 110 μm ,形成 3 个次级点光源同时对样品辐照.样品采用神光 II 标准黑腔(1350 $\mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$,注入口 380 μm),黑腔中心放置内径 300 μm ,球壳

20 μm 的靶丸,其中球壳部分包括 3 μm 玻璃层以及 17 μm CH 层.在靠近背光靶一侧黑腔中心开 400 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 的诊断狭缝用于限光,从而使得光源只获取靶丸中心弦长位置的信息.为了避免腔内等离子体堵孔在狭缝外表面贴一层 5 μm CH,内表面涂抹软胶.在靠近记录面一侧黑腔中心开 400 $\mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ 的诊断孔.实验中通过针孔相机(PHC)监测激光注入到背光靶上的情况,通过成像板(IP)记录成像信息,成像板滤片采用 200 μm Be 加 5 μm Al.背光源到样品的距离为 2 cm,样品到记录面的距离为 30 cm,放大倍数 16 倍.

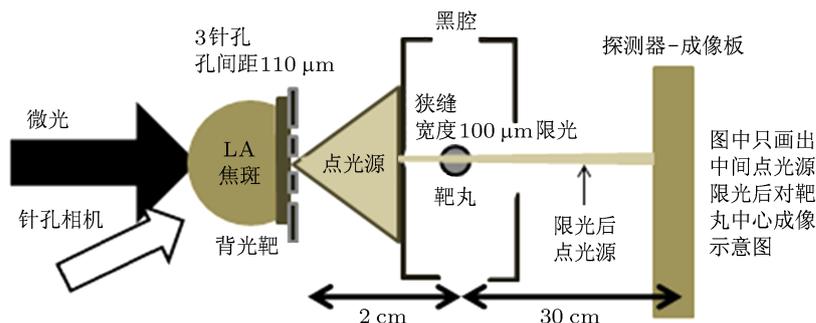


图 2 实验设计结构图

4 实验结果与分析

4.1 针孔点光源性能

光源均匀性是面光源结合针孔成像方式中存在的致命问题, 采用新型点光源结合投影成像, 该问题在原理上得到解决. 实验结果采用 IP 板静态成像的方式获取了光源强度分布, 见图 3. 图 3(a) 为光源辐照的黑腔样品 (黑腔中心的亮粗线是定位槽), 样品像周围出现的重影模糊是由于 3 个点光源同时成像叠加所造成的, 并非空间分辨不够引起的半影模糊现象. 其强度分布图如图 3(b) 所示, 可以看到光源在非常大的区域内是完全平整的, 同时透过 200 μm Be 滤片部分的光强度相对于 200 μm Be 加 5 μm Al 滤片高 30% (Ti 背光 4.75 keV), 这样的结果与 XOP, Geant4 计算结果一致. 另一方面, 点光源还获得了非常大的任意可调的成像视场 (圆形的视场是由于前端屏蔽筒的 2 mm 小孔所限制的).

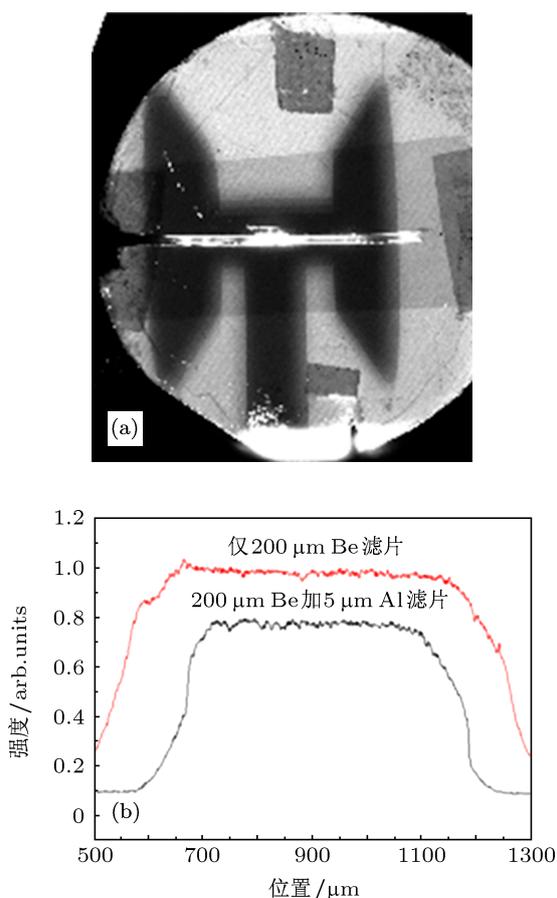


图 3 点光源性能分析 (a) 黑腔样品成像结果; (b) 不同滤片区域光源强度分布

在该发次中激光采用的蝇眼透镜 (LA) 束匀滑注入, 激光注入背光靶结果如图 4. 图 4(a) 为针孔相

机监测激光注入背光靶表面的光斑图像, 图像为宽度 450 μm 的方形焦斑, 该图像即为传统的面背光照相的光源. 图 4(b) 为该面光源的强度分布图, 从强度分布可以看到面光源的均匀性非常的不理想, 同时面光源还限制了样品的尺寸 (样品尺寸不能大于光源的尺寸), 在灵活性上差于点光源.

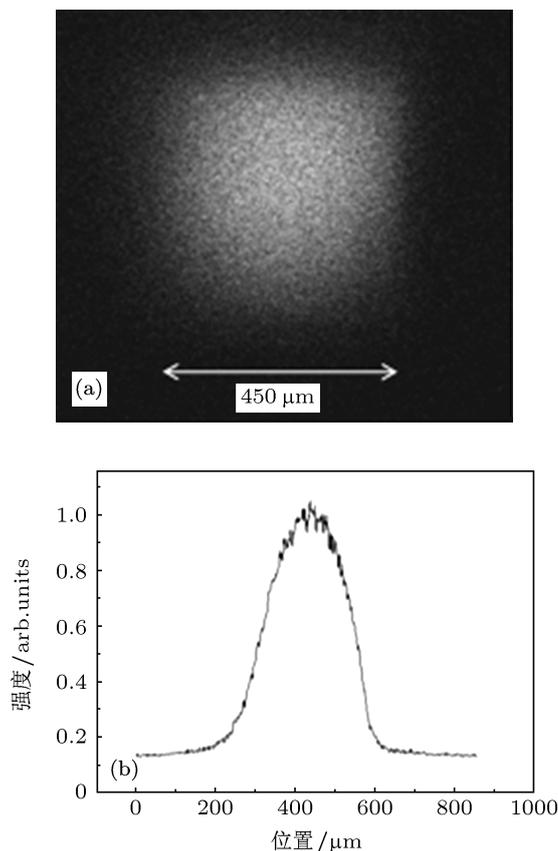


图 4 LA 束匀滑结果 (a) 针孔相机成像结果; (b) 焦斑光强分布

4.2 诊断狭缝性能

当前内爆背光照相实验中存在着卡弦长问题. 所谓卡弦长问题就是测量所采用的记录设备条纹相机 (或者分幅相机) 在瞄准上存在一定的偏差, 再耦合上靶装配发与发之间的偏差, 使得投影到记录面的图像并非靶丸的直径部分. 在靶丸直径较小的情况下, 这样的偏差甚至会导致最终获取的物理图像偏离实验设计. 长期的经验表明, 这样的偏差一般能够控制在 30—50 μm . 对于初始直径约为 300 μm 的靶丸样品而言, 随着内爆压缩靶丸尺寸的减小, 瞄准偏差使得获取的物理图像将严重地偏离真实物理过程. 为了解决该问题, 本文实验中设计了新型的靶型, 其基本结构如图 2 所示, 针孔板具备 3 个针孔, 激光注入条件下同时获得 3 个点光源

同时辐照靶丸成像. 黑腔靠近背光靶一面的诊断孔采用诊断狭缝的形式 ($100 \times 400 \mu\text{m}$), 利用狭缝作为光阑限光将多个点光源的像在记录面上区分开来. 由于采用了狭缝限光, 最终在记录面上获得的图像是对齐狭缝位置的靶丸部分而与相机自身的瞄准偏差无关, 仅仅需要在装配靶丸样品的过程中保证靶丸中心与狭缝对齐即可获得准确的弦长位置. 特别地, 这样的靶型设计存在一个潜在的问题, 即狭缝堵孔现象. 为了回避这样的影响, 在诊断狭缝的内壁涂沫软胶, 外壁贴 CH 薄膜. 实验结果如图 5 所示.

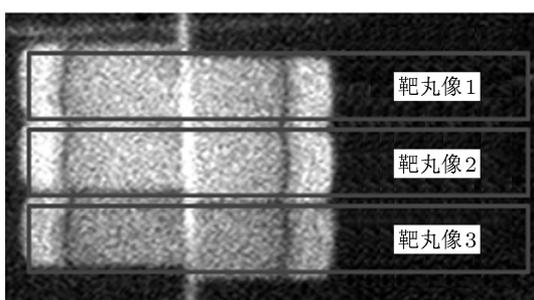


图 5 新型内爆背光照靶设计实验结果

从图 5 可以看到三个点光源对靶丸中心弦长位置独立成像, 在记录面上获得了三个并排的独立靶丸像; 图像正中出现的亮线是黑腔拼接过程中出现的宽度约 $10 \mu\text{m}$ 的拼接缝; 图像出现的上下偏差是由于黑腔拼接过程中出现的 $10\text{--}20 \mu\text{m}$ 的装配偏差. 这些现象是以往的物理实验中均未曾观察到的, 表明新型靶设计可以获得更细节的图像. 另外可以看到截取的球壳部分均处于靶丸直径弦长位置, 且左右对称性较好, 解决了实验现场调节瞄准精度不高的限制. 另一方面, 由于具备多个点光源成像获得了超大的视场, 瞄准精度需求从 $10 \mu\text{m}$ 降低至 1mm .

4.3 相衬成像性能

相衬成像技术本质上是利用不同轻物质在界面处存在的密度梯度使得 X 射线在传播过程中发生折射, 最终在记录面上轻物质的分界面会出现亮暗光环. 这样的亮暗光环结构会使得获取的物理图像 (尤其是物质的界面) 更清晰. 针对本文的靶丸样品, 其烧蚀层 (碳氢与玻璃) 与气体层 (氘氚) 分界面会出现暗环结构, 从而提高图像对比度 [9].

实验结果如图 6(a) 所示. 实验中为了降低吸收

对成像的影响, 选择了能点较高的 4.75 keV 的 X 光源对碳氢球壳靶丸样品成像, 光源到样品的距离固定为 2 cm , 样品到记录面的距离 30 cm , 实际放大倍数 16 倍. 从图 6(a) 可以看到, 靶丸样品内径约为 $300 \mu\text{m}$, 相衬成像引起的分界面暗区宽度 $8 \mu\text{m}$, 外部碳氢烧蚀层 $18 \mu\text{m}$; 由于选择的能点较高, 导致烧蚀层碳氢材料的透过率偏高, 因此烧蚀层图像并不是特别清晰, 但是由于相衬成像的折射效果, 使得物理研究中重点关注的烧蚀层和气体层之间的分界面出现了非常明显的暗环结构. 解析理论结果表明, 相衬成像引起的分界面的暗区宽度满足公式 $W_d = k \left(f \delta \sqrt{R/2} \right)^{2/3}$, 其中 k 为常数约等于 3, f 为成像系统的焦函数, R 为样品尺寸, δ 为物质的折射率 (在 4.75 keV 条件下碳氢约为 9×10^{-6}), 计算结果表明暗区宽度应为 $5 \mu\text{m}$, 而实验测量中宽度偏大

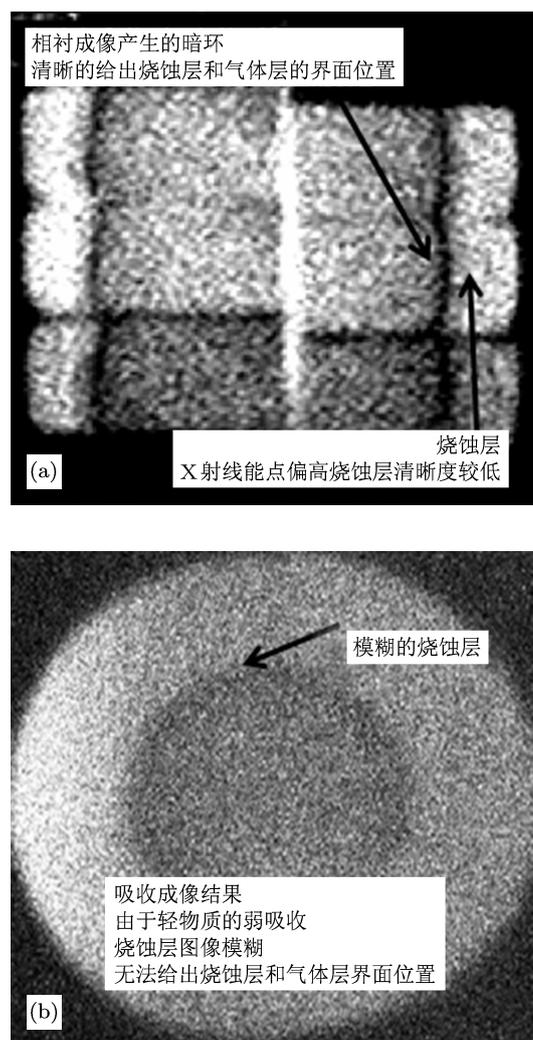


图 6 两种成像原理对比结果 (a) 相衬成像结果; (b) 吸收成像结果

可能是 $3\ \mu\text{m}$ 的玻璃层吸收较强造成的^[9]; 另一方面由于成像板的空间分辨较差也使得从图中读出的宽度误差较大(误差约 $2\ \mu\text{m}$).

另一方面为了突出相衬成像的优点, 将相同结构的靶丸样品吸收成像结果给出. 图 6(b) 为激光打靶过程中采用 $3.14\ \text{keV}$ 的面背光 X 光源辐照, 并通过 CCD 记录的静态靶丸样品图像, 靶丸样品内径 $210\ \mu\text{m}$, 烧蚀层包括 $2\ \mu\text{m}$ 玻璃与 $10\ \mu\text{m}$ 碳氢. 对比图 6(a) 和 (b) 可以看到, 采用相衬成像可以清晰地获取轻物质分界面的位置, 对于内爆流线轨迹等物理问题研究具有重要的意义; 而吸收成像由于碳氢样品的弱吸收使得其烧蚀层和气体层的分界面非常模糊, 很难获取准确的界面位置.

5 结论

在神光 II 装置上将新型针孔点背光与相衬成像技术相结合, 解决了惯性约束聚变背光照相研究中光源均匀性差、轻物质图像衬度低的问题, 为获取高质量的物理图像并从图像中提取高精度的物理信息提供了帮助; 同时采用针孔阵列以及狭缝限光的方式可以获得大视场的准确的靶丸弦长图像, 使得物理图像获取更加稳定可靠, 为实验的可重复性提供了帮助. 实验结果表明, 激光驱动等离子体产生的点光源结合相衬成像方法在精密物理诊断中具有重要的作用, 可以广泛应用于惯性约束聚变以及高能量密度物理研究.

- [1] Callahan D A, Meezan N B, Glenzer S H, MacKinnon A J, Benedetti L R, Bradley D K, Celeste J R, Celliers P M, Dixit S N, Doppner T, Dzentitis E G, Glenn S, Haan S W, Haynam C A, Hicks D G, Hinkel D E, Jones O S, Landen O L, London R A, MacPhee A G, Michel P A, Moody J D, Ralph J E, Robey H F, Rosen M D, Schneider M B, Strozzi D J, Suter L J, Town R P J, Widmann K, Williams E A, Edwards M J, MacGowan B J, Lindl J D, Atherton L J, Kyrala G A, Kline J L, Olson R E, Edgell D, Regan S P, Nikroo A, Wilkins H, Kilkenny J D, Moore A S 2012 *Phys. Plasmas* **19** 056305
- [2] Hicks D G, Spears B K, Braun D G, Olson R E, Sorce C M, Celliers P M, Collins G W, Landen O L 2010 *Phys. Plasmas* **17** 102703
- [3] Landen O L, Boehly T R, Bradley D K, Braun D G, Callahan D A, Celliers P M, Collins G W, Dewald E L, Divol L, Glenzer S H, Hamza A, Hicks D G, Hoffman N, Izumi N, Jones O S, Kirkwood R K, Kyrala G A, Michel P, Milovich J, Munro D H, Nikroo A, Olson R E, Robey H F, Spears B K, Thomas C A, Weber S V, Wilson D C, Marinak M M, Suter L J, Hammel B A, Meyerhofer D D, Atherton J, Edwards J, Haan S W, Lindl J D, MacGowan B J, Moses E I 2010 *Phys. Plasmas* **17** 056301
- [4] 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
- [5] Kuranz C C, Blue B E, Drake R P, Robey H F, Hansen J F, Knauer J P, Grosskopf M J, Krauland C, Marion D C 2006 *Rev. Sci. Instrum* **77** 10E327
- [6] Yan J, Jiang S E, Lin Z W, Chen L, Yin Z J 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 2653 (in Chinese) [晏骥, 江少恩, 林稚伟, 陈黎, 阴泽杰 2011 强激光与粒子束 **23** 2653]
- [7] Yan J, Zheng J H, Chen L, Lin Z W, Jiang S E 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 148701 (in Chinese) [晏骥, 郑建华, 陈黎, 林稚伟, 江少恩 2012 物理学报 **61** 148701]
- [8] Yan J, Jiang S E, Yin Z J 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 2047 (in Chinese) [晏骥, 江少恩, 阴泽杰 2010 强激光与粒子束 **22** 2047]
- [9] Yan J, Jiang S E, Chen L, Lin Z W 2012 *High Power Laser and Particle Beams* **24** 1892 (in Chinese) [晏骥, 江少恩, 陈黎, 林稚伟 2012 强激光与粒子束 **24** 1892]
- [10] Yan J, Jiang S E, Su M, Wu S C, Lin Z W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 068703 (in Chinese) [晏骥, 江少恩, 苏明, 巫顺超, 林稚伟 2012 物理学报 **61** 068703]

The multi-point X-ray source and phase contrast imaging used on implosion experiment

Yan Ji Zheng Jian-Hua Chen Li Hu Xin Huang Tian-Xuan Jiang Shao-En[†]

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

(Received 3 November 2012; revised manuscript received 1 February 2013)

Abstract

Traditional implosion backlight imaging experiment has disadvantages of nonuniform X-ray source, low contrast ablator interface and high requirement for diagnostic device tuning precision. A novel design of multi-point X-ray source combined with phase contrast imaging developed and optimized based on experimental research performed on Shenguang-II facility is presented. The novel design can obtain high-quality experimental result with uniform X-ray source, clear interface between ablator and inner DD gas and large image view. At the same time, the new design using diagnostic silt instead of diagnostic hole improves tuning precision. The experimental result proposes that novel design of laser driven plasma point x-ray source combined with phase contrast imaging has advantage of area X-ray source combined with absorb imaging and can be widely used in inertial confinement fusion and high energy density physics.

Keywords: inertial confinement fusion, backlight imaging, pinhole-point backlight, phase contrast imaging

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

DOI: 10.7498/aps.62.125203

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