

# 针孔点背光技术实验\*

江少恩 黄翼翔 胡 昕 于燕宁 于瑞珍

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

**摘 要** 在“星光 II”装置上进行针孔点背光技术的演示实验。利用激光辐照  $\phi 50\mu\text{m}$  的小孔产生的堵孔效应使 X 光的脉宽缩短, 起到类似于短脉冲点背光源的作用。另外利用成像方法, 实验演示了由面背光方式获得点背光技术, 称之为点针孔背光技术。实验结果表明: 结合堵孔效应和点背光方式, 能获得与点背光同样的结果, 这样可以避开点背光对激光器较为苛刻的要求。

**关键词** 堵孔效应; 针孔点背光; 背光技术

**中图分类号** O536; O434 **文献标识码** A

## 0 引言

激光或辐射烧蚀引起的 R-T 流体力学不稳定性是惯性约束聚变(ICF)中十分重要的现象<sup>[1~4]</sup>。在 ICF 中, 球形壳靶形成的等离子体以及滞止阶段和燃料之间密度和压力梯度方向是相反的, 加速度的方向由轻流体指向重流体, 这是流体力学不稳定的, 此即瑞利-泰勒(R-T)不稳定性。R-T 不稳定性的产生与发展, 会造成不对称压缩、燃料和壳层的混合, 甚至球壳破裂, 导致内爆效率降低, 甚至完全失败。R-T 不稳定性的增长周期和幅值不大, 由自发射不能较好地测量这两个量, 只有采用 X 光背光技术才能对 R-T 不稳定性进行较好的研究。

观测 R-T 不稳定性最常用的方法是采用背光技术<sup>[5~7]</sup>。背光技术一般有两种方式即: 面背光和点背光。这两种方式各有优势, 但是面背景 X 光源必须有足够的空间均匀性, 这要求驱动背光靶的激光装置有很好光束质量和大面积( $600\mu\text{m}$ )的空间均匀性, 而“神光 II”装置在直接离焦大焦斑条件下是很不均匀的, 实验中通过针孔得到的大焦斑图像是环状的、中心部分是空的, 所以现有条件下的“神光 II”装置单束光是不能满足面背光源技术要求的。点背光源是面背光源的一个替代方式, 对激光器没有均匀性的要求, 但是要求激光脉宽很短( $15\text{ps}\sim 100\text{ps}$ ), 一定的能量( $20\text{J}\sim 200\text{J}$ ), 同步准确度很高( $\pm 15\text{ps}$ ), 焦斑很小(焦斑小于  $50\mu\text{m}$ )。这给激光器提出很高的要求, 其中要求激光器有很强的聚焦能力, 例如点背光靶一般很小( $10\mu\text{m}\sim 50\mu\text{m}$ ), 要求靶场瞄准能力必须提高达到  $10\mu\text{m}$ 。

为了解决上述困难, 需要研究和用于点背

光源的等离子体开关技术。利用等离子体堵孔效应, 可以初步获得短脉冲的 X 光背光源。另外点源可以采用针孔点背光技术, 就是在背光源靶与样品间放置针孔, 针孔成像, 起着点源的作用。

## 1 开展点背光技术探索实验, 利用堵孔效应缩短脉宽

为了在现有 ns 激光装置上产生短脉冲点背光源, 激光作用于背光靶产生的等离子体, 等离子体在针孔产生的堵口效应, 使后续的 X 光不能通过针孔, 缩短背光源的穿过样品的时间, 形成等离子体开关技术, 小孔的烧蚀堵孔效应, 可以由长脉冲激光产生短脉冲的比较理想的点背光源。

实验在星光 II 装置上进行, 激光能量约为  $80\text{J}$ , 脉宽  $700\text{ps}$ , 激光波长为  $0.35\mu\text{m}$ 。实验用靶为在  $25\mu\text{m}$  厚的金上开  $50\mu\text{m}$  的孔靶, 激光以正入射和斜  $45^\circ$  入射两种方式聚焦打在孔靶中心位置, 激光焦斑大小约  $200\mu\text{m}$ 。X 光条纹相机(XSC)在孔靶的后向观测<sup>[8~11]</sup>, 测量方向与激光入射方向成  $45^\circ$  角, 放大倍率为 66 倍。

图 1 为激光与孔靶成  $45^\circ$  角入射, 由 X 光条纹相机从孔靶的正后向观测的图像。由图看出, 孔的两个边缘有明显的堵孔效应。由图 1 的横向扫描可

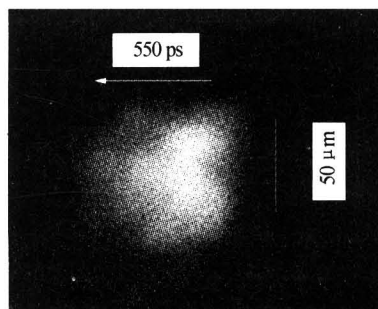


图 1 激光  $45^\circ$  入射, X 光条纹相机正向观测的图像  
Fig. 1 Streak image of pinhole irradiated by laser at  $45^\circ$  with the target normal line

\* 高温高密度等离子体国家实验室基金(51480020103ZS7701)和中国工程物理研究院科学技术基金(20030214)资助  
Tel: 0816-2494592 Email: jiangshn@vip.sina.com  
收稿日期: 2004-09-27

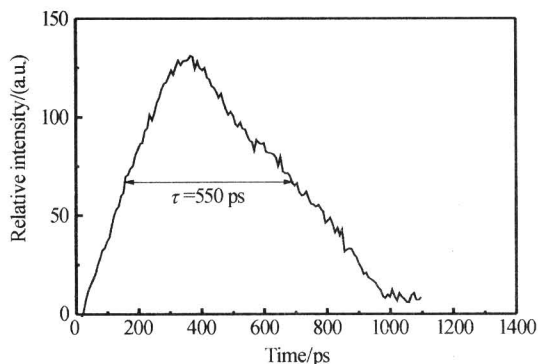


图 2 图 1 的时间扫描曲线  
Fig. 2 The temporal evolution for Fig. 1

以绘制出 X 光时间曲线见图 2. 由图知道, 脉冲的半高宽约为 550 ps, 而星光 II 的激光脉冲半宽度约 700 ps, 而由激光与靶相互作用产生的 X 光持续的时间约为 1000 ps. 可见 X 光经过孔靶的堵孔效应使 X 光持续时间缩短至 550 ps.

图 3 为激光正入射到孔靶上由 X 光条纹相机从孔靶的后向 45° 观测的图像. 从斜向观测的图像没有看到孔的两个边缘收缩的过程, 仅仅观测到一边的收缩, 这是由于孔靶厚度太大, 而 X 光条纹相机是斜向观测的, 只能看到远端孔缘的图像, 而近端的孔缘被靶背面遮挡, 所以只能观测到一边孔缘的图像. 由图 3 的横向扫描可以绘制出 X 光时间曲线, 见图 4. 由图可知, 脉冲的半高宽为 319 ps, 可见

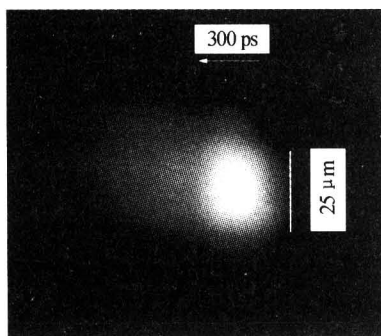


图 3 激光正入射, X 光条纹相机 45° 斜向观测的图像  
Fig. 3 Streak image of pinhole irradiated by laser at 45° with the target normal line

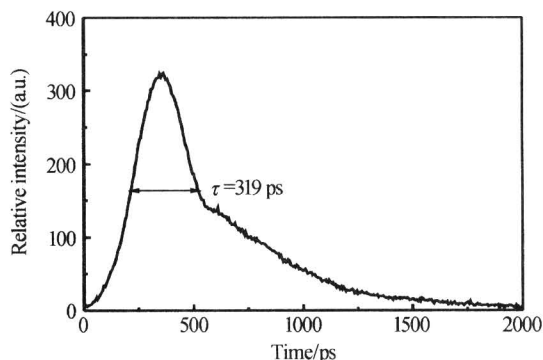


图 4 图 3 的时间扫描曲线  
Fig. 4 The temporal evolution for Fig. 3

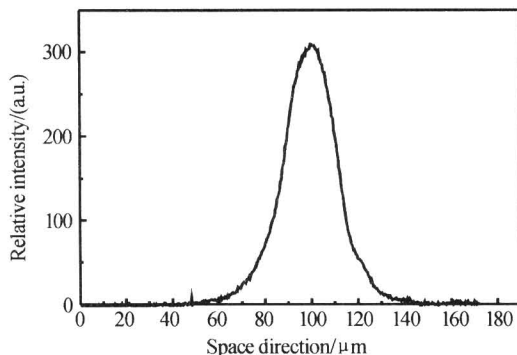


图 5 图 3 的空间方向曲线  
Fig. 5 The spatial distribution for Fig. 3

激光正入射产生的堵孔效应更加明显, 与图 1 相比, 持续时间缩短了更多. 由图 3 的纵向扫描可以绘制出 X 光空间曲线, 见图 5, 空间半高宽为 24.5 μm, 这与孔的半径十分接近. 于是可以得到堵孔的速度为  $24.5 \mu\text{m}/319 \text{ ps} = 7.7 \times 10^6 \text{ cm/s}$ .

## 2 采用成像方法, 演示点针孔成像技术

本实验是作原理性的演示实验, 针孔换成狭缝, 且将靶与狭缝放置距离很远, 以避免打靶时产生的靶碎片击坏. 实验排布见图 6. 针孔点背光技术与面背光技术不同, 面背光技术中, 是在背光靶和针孔间, 放置样品, 针孔起成像作用. 点背光技术, 是利用激光辐照小直径的纤维靶产生的等离子体辐射的 X 光作为背光源, 因纤维靶很小, 所以探测设备不需要成像系统.

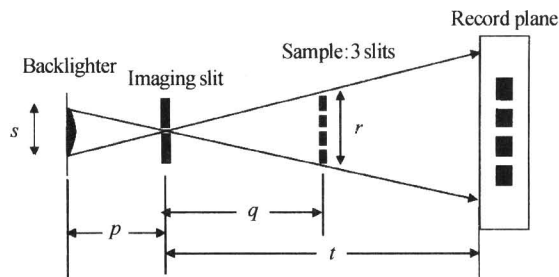


图 6 针孔点背光技术原理示意图  
Fig. 6 Schematic of pinhole-assisted point-projection backlighting

实验在“星光 II”装置上进行, 激光能量约 80 J, 三倍频, 脉宽 0.7 ns 左右. 利用蝇眼透镜阵列的平滑技术对激光束进行匀滑, 产生的激光焦斑直径约 300 μm 采用平面靶进行实验, 靶材料为金. 背光狭缝 (slit) 缝宽  $D=10 \mu\text{m}$ , 样品三狭缝的缝宽为 10 μm, 缝与缝之间的距离为 1 mm, 记录方式采用 X 光条纹相机或 X 光胶片. 设计靶与背光狭缝间的距离  $p=3 \text{ cm}$ , 背光狭缝与样品间的距离  $q=30 \text{ cm}$ , 背光狭缝与记录面间的距离  $t$  为 90 cm. 在记录面上会得到缝间距为  $H=ht/q=1 \text{ mm} \times 90 \text{ mm} \div 30 \text{ cm} =$

3 mm 的图像,式中  $h$  为三狭缝的间距.  $q$  大小的确定条件要求满足

$$r < s \frac{q}{p} \Rightarrow q > p \frac{r}{s} \quad (1)$$

式中  $s$  为背光靶的大小,  $r$  为样品的尺寸. 上面的数值满足上式的关系.

激光正入射, XSC 从靶的前向观测, XSC 测量方位与激光入射方向成  $45^\circ$  角, 得到的实验结果见图 7. 由图可以清楚地看出三个放大的狭缝图像. 原因可能是: 由于三狭缝两个最外侧的缝间距为 2 mm, 而束匀滑后的激光焦斑为  $300 \mu\text{m}$ , 但是 XSC 与靶面成  $45^\circ$  角, 因此  $300 \mu\text{m}$  的激光焦斑相对于 XSC 只有  $300 \times \cos 45^\circ = 212 \mu\text{m}$ , 这刚好覆盖视场为 2 mm 的三狭缝, 几乎没有富余, 两边的空间只有  $6 \mu\text{m}$ . 但是由于对光瞄准不是太好, 而且靶室抽真空时靶会产生一定的移位, 所以激光在金平面靶上的焦斑并不与对光时所放置靶球位置完全重合. 因此, 只要三狭缝的中缝与激光焦斑的中心位置有所偏离, 就有可能不能同时得到三个缝的图像. 激光靶场瞄准准确度为  $30 \mu\text{m}$ , 抽真空时会产生移位估计在  $50 \mu\text{m}$  以上, 采用激光经纬仪瞄准准确度估计在  $50 \mu\text{m}$ , 所以可能产生的最大偏离可能有  $130 \mu\text{m}$ , 这样就有可能开始只有一个狭缝的图像, 随着激光加热金平面靶, 在靶面上会喷射等离子体并因此发光, 高出靶面位置较高的 X 光会落在三狭缝的范围内, 且每个狭缝的图像出现时间有早晚, 所以从图上看三个狭缝出现的时间是不同的. 从图 7 看, 确实只有最下面的狭缝落在激光焦斑上, 而上面的两个条纹是靶面上喷射的等离子体产生的 X 光形成的. 解决这个问题有两种方法: 一是增大激光的焦斑, 二

是提高  $q/p$  的值. 对于第一个方法, 增大焦斑一般可以采用离焦方法, 但是必须不降低焦斑的均匀性, 这难以办到. 对于第二个方法, 可以增大  $q$  或减少  $p$ , 实验中  $p$  难以再小, 只有增大  $q$ , 即拉大三狭缝与单成像狭缝的距离. 但是由于星光 II 靶室较小,  $q$  增大有限.

### 3 结论

本次实验采用激光辐照小孔的方法, 产生堵孔效应使 X 光脉宽缩短. 激光脉宽为 700 ps, X 光脉宽约为 300 ps. 如果采用更小的针孔, 有可能进一步缩短 X 光脉宽, 接近点背光源的短脉宽的要求. 另外利用成像技术, 由面背光方式成功地获得点针孔背光技术.

致谢: 感谢星光 II 激光装置运行组的大力支持和配合. 张继彦博士和丁耀南研究员提供了有益的建议, 在此表示衷心地感谢.

#### 参考文献

- 1 Takabe H, Mima K. Self-consistent growth rate of the rayleigh-taylor instability in an ablatively accelerating plasma. *Phys Fluids*, 1985, **28**(12): 3676~3682
- 2 Remington B, Haan S, Glendinning S, et al. Large growth, planar Rayleigh-Taylor experiments on Nova. *Phys Fluids*, 1992, **B4**(4): 967~978
- 3 Kilkenny J, Glendinning S, Haan S, et al. A review of the ablative stabilization of the Rayleigh-Taylor instability In regimes relevant to inertial confinement fusion. *Phys Plasmas*, 1994, **1**(5): 1379~1389
- 4 Lindl J, Amendt P, Berger R, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility. *Phys Plasmas*, 2004, **11**(2): 339~491
- 5 Landen O, Farley D, Glendinning S, et al. X-ray backlighting for the national ignition facility. *Rev Sci Instrum*, 2001, **72**(1): 627~634
- 6 Bullock A, Landen O, Bradley D. Relative x-ray backlighter intensity comparison of Ti and Ti/Sc combination foils driven in double-sided and single-sided laser configuration. *Rev Sci Instrum*, 2001, **72**(1): 686~689
- 7 Bullock A, Landen O, Bradley D. 10 and 5 mm pinhole-assisted point-projection backlit imaging for the national ignition facility. *Rev Sci Instrum*, 2001, **72**(1): 690~693
- 8 牛慈笨, 张焕文, 杨勤劳, 等. 变象管皮秒分幅和飞秒扫描相机的实验研究. *光子学报*, 1992, **21**(1): 11~19  
Niu H B, Zhang H W, Yang Q L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1992, **21**(1): 11~19
- 9 屈军乐, 杨勤劳, 牛慈笨, 等. 一种长狭缝软 X 射线扫描相机系统. *强激光与粒子束*, 1997, **9**(1): 114~120  
Qu J L, Yang Q L, Niu H B, et al. *High Power Laser*

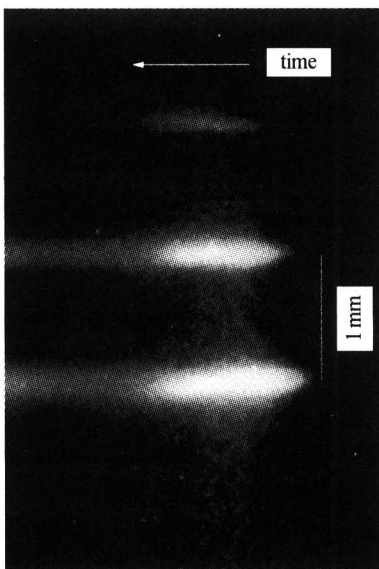


图 7 三狭缝的条纹图像  
Fig. 7 Streaked image for three slits

- and Particle Beams*, 1997, **9**(1): 114~120
- 10 赵宝升, 陈敏. 采用多狭缝条纹管实现激光三维成像. *光子学报*, 2004, **33**(12): 1425~1427  
Zhao B S, Chen M. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1425~1427
- 11 郭宝平, Cunin G, 牛憨笨. 高重复频率触发模式皮秒扫描相机. *光子学报*, 2005, **34**(3): 442~444  
Guo B P, Cunin G, Niu H B. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 442~444

## Experiments of Point-projection Backlighting Using Pinholes

Jiang Shaoen, Huang Yixiang, Hu Xin, Yu Yanning, Yu Ruizhen

*Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621900*

Received date: 2004-09-27

**Abstract** X-ray backlighting is a powerful tool for diagnosing a large variety of high-density phenomena. In pinhole-assisted point-projection backlighting, pinholes are placed a small distance away from the backlighter source to produce images with large field of view. The techniques of point backlighting using pinhole was experimentally demonstrated on Xingguang- II facility (XG- II) with 80 J, 1 ns, 351 nm laser pulse. The pinhole drilled on gold in diameter of 50  $\mu\text{m}$  was irradiated by laser beam and pinhole closure was produced in order that x-ray pulse width was shortened, and then the function similar to point backlighting was obtained. The experimental results shown that the pinhole-assisted point-projection backlighting was feasible.

**Keywords** Pinhole closure; Pinhole-assisted point-projection backlighting; Backlighting technique



**Jiang Shaoen** was born in 1964. He received M. S. Degree from University of Electron Science and Technology in 1989. Since then, he has been working in Chinese Academy of Physics Engineering (CAEP). He received Ph. D. Degree from the graduate school of CAEP in 1999. Now, he is a professor. His fields of research are the diagnostics and experiments on inertial confinement fusion (ICF).