

利用 X 射线激光进行激光等离子体射流的诊断*

王 琛¹⁾ 方智恒¹⁾ 孙今人¹⁾ 王 伟¹⁾ 熊 俊¹⁾ 叶君建¹⁾ 傅思祖¹⁾
顾 援¹⁾ 王世绩¹⁾ 郑无敌²⁾ 叶文华²⁾ 乔秀梅²⁾ 张国平²⁾

1)(上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

2)(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2007 年 8 月 13 日收到; 2008 年 7 月 16 日收到修改稿)

射流是激光惯性约束聚变(ICF)、天体物理学等领域中一种普遍存在的非线性现象. 在实验室对射流现象进行模拟、诊断等方面的研究对于理解 ICF、天体物理中的相关现象具有重要参考价值. 采用纳秒激光辐照特殊形状的圆孔靶产生等离子体射流, 利用波长为 13.9 nm 的 X 射线激光作为光源对特定时刻的射流进行阴影成像, 获得了清晰的射流阴影图像, 与理论模拟结果定性一致.

关键词: 射流, X 射线激光, 等离子体诊断

PACC: 5270, 4255V

1. 引 言

射流是自然界中一种普遍的非线性现象, 从天体物理到实验室流体物理研究的广大领域都受到广泛的重视^[1-8]. 在激光惯性约束聚变(ICF)的研究中, 各种不稳定性都可能引起射流现象的产生, 这些现象将会影响到靶丸压缩的效率, 对点火成败产生至关重要的影响. 因此, 射流现象的研究对 ICF 研究同样具有重大价值.

在实验室开展射流现象的研究, 早期通常局限于低马赫数的射流. 高功率激光装置的介入, 使得在实验室开展高马赫数射流以及射流与激波、物质等相互作用的研究成为可能. 实验室研究中对射流现象的诊断, 一般是采用 10^3 eV 量级的硬 X 射线通过阴影成像的方法进行诊断. 这种方法已取得很好的效果, 但缺点是诊断的空间分辨率较低, 一般在几十微米左右. 而 X 射线激光具有方向性好、脉冲短、亮度高和准单色的特点, 经过多年研究已经在等离子体诊断中发挥了一定的作用^[9-14]. 利用 X 射线激光进行激光加速等离子体射流的诊断, 有可能获得空间分辨率达到 $1 \mu\text{m}$ 的诊断结果, 具有很好的研究价值.

本文介绍在“神光 II”激光装置上, 利用 X 射线

激光进行了激光加速射流的实验诊断, 并将所得结果与理论模拟结果进行了初步比较.

2. 实验方案

实验在高功率激光物理国家实验室的“神光 II”激光装置上进行, 利用装置两路百皮秒基频激光驱动的 X 射线激光作为光源诊断装置第九路纳秒激光辐照特殊结构圆孔靶而产生的射流现象, 方案如图 1 所示. 目标圆孔靶材料为 C_8H_8 , 厚度约为 $160 \mu\text{m}$, 在其背面制作出深为 $140 \mu\text{m}$, 直径为 $60 \mu\text{m}$

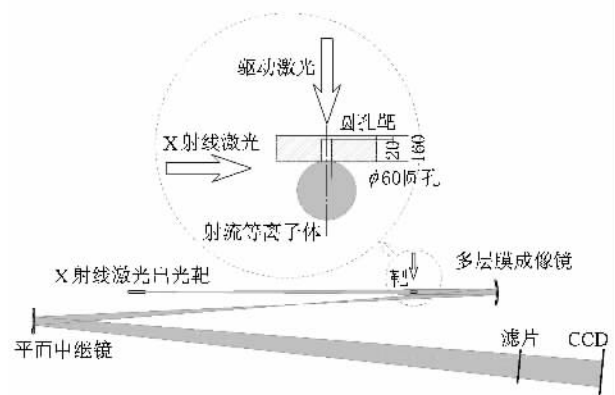


图 1 X 射线激光诊断射流实验方案及圆孔射流靶结构示意图 (图中参数单位为 μm)

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2006AA804701, 2006AA804702)资助的课题.

的圆孔,如图 1 上方所示.第九路驱动激光脉冲宽度约为 2.4 ns,波长为 $0.53 \mu\text{m}$,能量约为 1.5 kJ,以 $400 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ 的均匀焦斑辐照圆孔靶正面.激光烧蚀靶面产生强冲击波,冲击波在后界面卸载,产生反向的反射稀疏波,同时在后界面的圆孔处会产生强烈的向外射流.

利用“神光 II”装置八路中的两路预-主脉冲基频激光(波长为 $1.053 \mu\text{m}$,脉冲宽度约为 90 ps,能量约为 100 J,预脉冲与主脉冲的强度比约为 5%,时间间隔约为 3 ns)线聚焦辐照两块对接的镀银玻璃平板靶产生的波长为 13.9 nm 的饱和输出类镍-银 X 射线激光作为探针. X 射线激光探针侧向穿越待测圆孔靶与射流,并利用软 X 射线多层膜成像元件对待测靶和射流放大成像到 CCD 接收面上.系统的放大倍数约为 10 倍,配合 CCD 的像素尺寸($24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$),诊断的空间分辨率约为 $2.4 \mu\text{m}$.在待测靶位置 X 射线激光探针光束截面的空间尺寸约为 $2 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,远大于待测靶和射流产生区域,因此能够测量到感兴趣的全部区域. X 射线激光的脉冲宽度约为 30 ps,能够很好冻结等离子体的发展,获得射流状

态的瞬时图像.

3. 实验结果与理论模拟比较

目标圆孔射流靶由“神光 II”第九路激光驱动,图 2 中的曲线 a、曲线 b 和曲线 c 是三发实验的驱

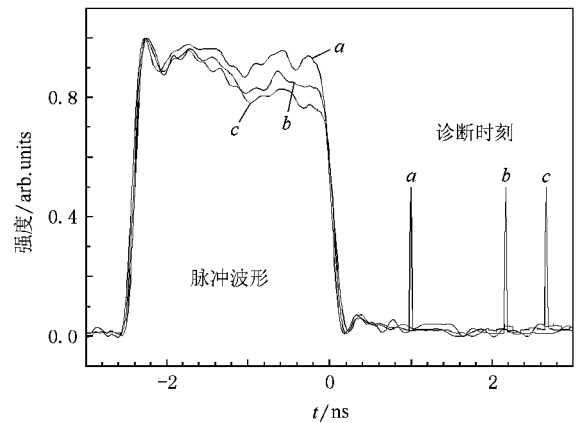


图 2 驱动圆孔靶的激光脉冲波形和相应的 X 射线激光的诊断时刻

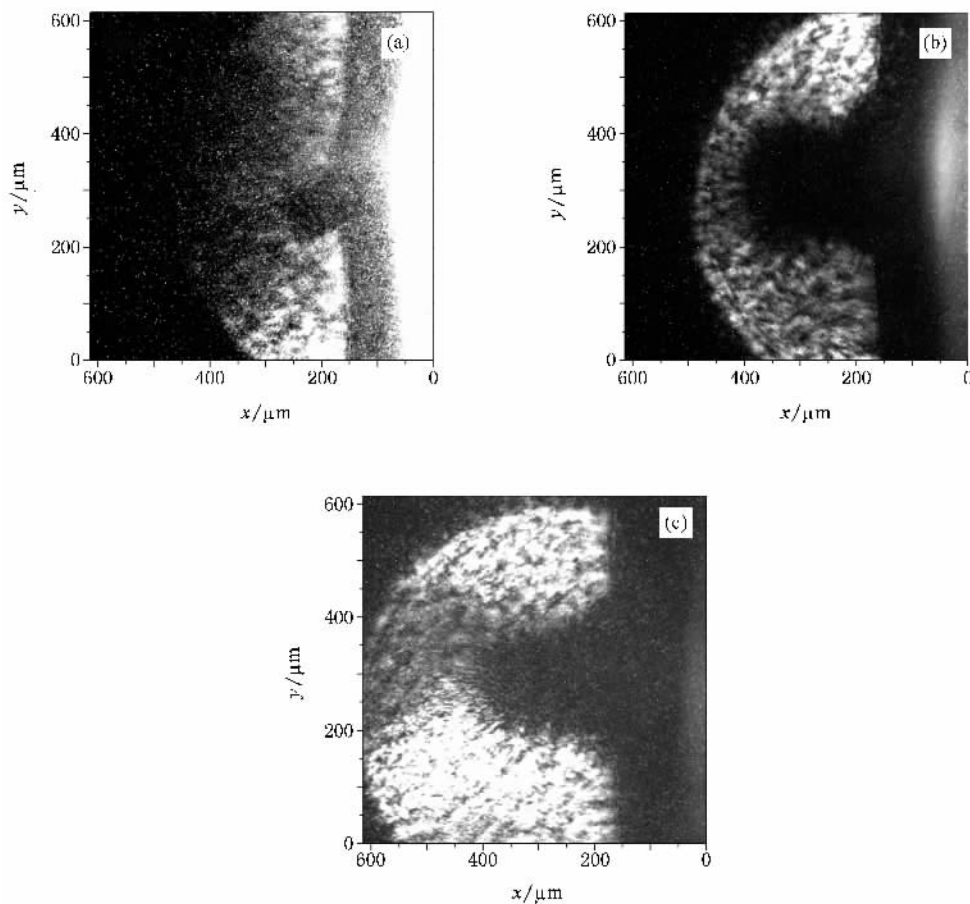


图 3 圆孔靶射流现象的诊断结果 (a)诊断时刻为 1.00 ns, (b)诊断时刻为 2.15 ns, (c)诊断时刻为 2.65 ns

动激光脉冲形状,三条曲线的形状基本一致.取脉冲形状下降沿半高位置为时间零点,分别利用 X 射线激光诊断了其 1.00, 2.15 和 2.65 ns 三个时刻的射流发展图像,结果如图 3 所示.其中 $x = 0$ 位置对应圆孔靶正面的初始靶面, y 方向刻度只表明相对位置.射流喷射出的等离子体温度较低,对波长为 13.9 nm 的软 X 射线激光探针产生强烈的吸收,因此在靶背面会形成明显的阴影,阴影的形状包含了射流的相关信息.从图 3 可以清楚地看到,在靶背面(左侧)形成了长约 400 μm , 宽约 400 μm 的阴影,这就是 X 射线激光穿过射流等离子体后产生的阴影图像.

采用与实验相同的条件,利用 XRL2D 程序进行了模拟计算,图 4 是计算得到的射流等离子体的密

度分布.XRL2D 程序是一套二维非平衡辐射流体力学程序,采用了任意拉格朗日-欧拉(ALE)方法,其中电子、离子能量输运采用限流热传导近似,辐射输运采用多群扩散近似,原子动力学采用平均原子模型,激光吸收仅考虑了逆韧致吸收和共振吸收.关于程序的具体介绍可参见文献[15].计算采用与实验完全相同的条件和靶结构,驱动激光脉冲波形也采用实验中实时测量的波形,即图 2 中三种波形的平均值,强度空间分布取平顶分布.电子热传导限流因子取 $f_e = 0.03$,计算时刻分别对应图 2 右侧所标的 a, b, c 三个时刻.模拟给出的激光吸收系数约为 65%.

驱动激光最先开始烧蚀 20 μm 的 C_8H_8 薄膜,烧蚀面外的热等离子体向靶面外(图中为向右)高速运

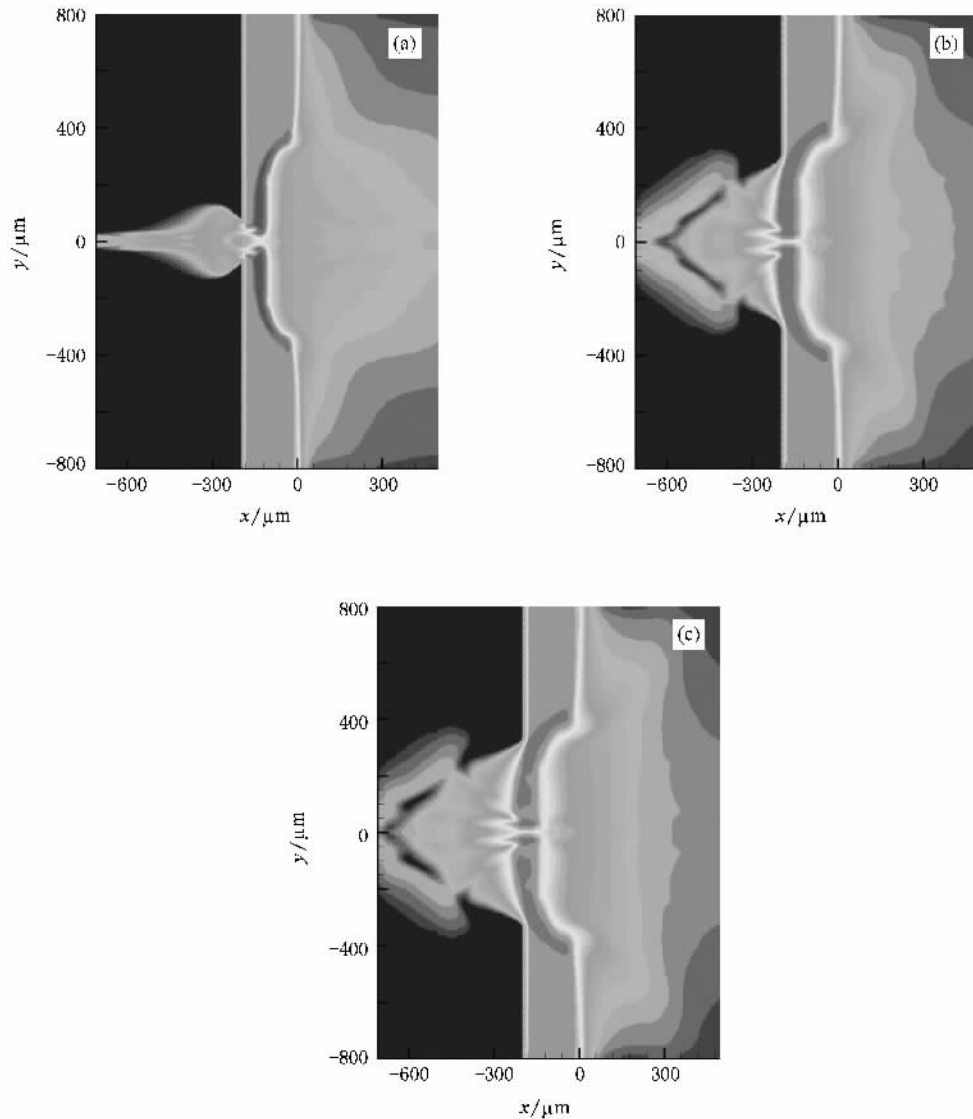


图 4 XRL2D 模拟得到不同时刻射流现象的密度分布 (a) 1.00 ns, (b) 2.15 ns, (c) 2.65 ns

动,同时会形成向靶后(图中向左)传播的冲击波.到 $t \approx -1.8$ ns 时,激波到达自由面,冲击波卸载,一些比较稀薄的 CH 介质(密度 $\rho \approx 10^{-4}$ g \cdot cm $^{-3}$)以高达 5×10^7 cm \cdot s $^{-1}$ 的速度冲击而出.激光持续烧蚀薄膜,为维持动量守恒,冷的 C $_8$ H $_8$ 薄膜被加速并从小孔往左喷射,约在 $t = 0$ ns 时喷出小孔,速度大约为 1.5×10^7 cm \cdot s $^{-1}$,然后自由飞散,稀疏形成冠.随着 20 μ m 的 CH 薄膜被推向孔内,孔边缘以及基底也被烧蚀的 CH 等离子体填补,形成后续喷射.从图 4 中 $t = 2.15, 2.65$ ns 时刻的密度分布可以清楚地看到两种等离子体的界线.最后,基底也被烧出一个“弹坑”.

图 5 是根据模拟结果计算得到的 X 射线激光

穿越后产生的阴影图像. CH 等离子体对 X 射线激光的吸收主要考虑了光电吸收和逆韧致吸收.逆韧致吸收系数(单位为 cm $^{-1}$)为

$$\alpha \approx 2.44 \times 10^{-37} \frac{\langle Z^2 \rangle n_e n_i}{\sqrt{kT_e} (h\nu)^3} \left[1 - \exp\left(\frac{-h\nu}{kT_e}\right) \right].$$

对于光电吸收,在类氢近似下采用 Kramer 光电吸收截面

$$\sigma_{\text{if}}(\nu) = \frac{64\pi^4}{3\sqrt{3}} \frac{e^{10} m_e Z^4 g_{\text{bf}}(\nu)}{h^6 c \nu^3 n^5},$$

其中 $g_{\text{bf}}(\nu) \approx 1.33$ 为 Gaunt 因子.光电吸收系数(单位为 cm $^{-1}$)为

$$\mu = 1.08 \times 10^{-19} N_n \frac{I_n^2}{n} \frac{1}{(h\nu)^3}.$$

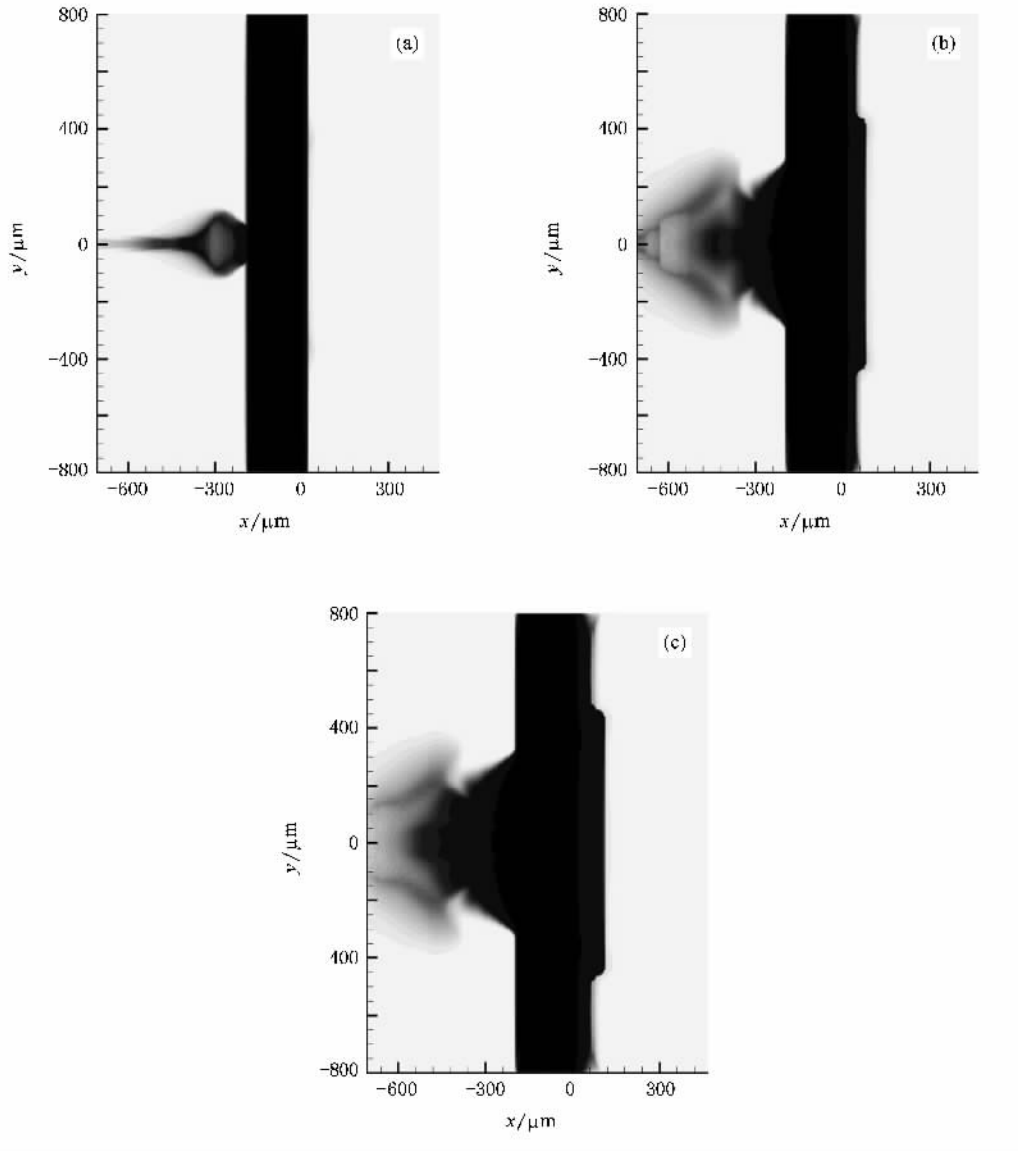


图 5 模拟得到不同时刻 X 射线激光穿越后的阴影图像 (a) 1.00 ns, (b) 2.15 ns, (c) 2.65 ns

由此可以大致估算出类镍银 X 射线激光在 CH 等离子体中的吸收系数为 $3 \times 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. 再考虑喷射等离子体是关于圆孔轴对称的(在此条件下 X 射线激光的折射很小,可忽略),就可得到图 5 中的阴影图像.

比较图 3 和图 5 可以看出,(a),(c)两幅图像在阴影形状、尺度等方面非常一致,而(b)图则只是在尺度上接近,但形状有明显差异.形状差异产生的原因可能包括理论模型参数选取存在问题、驱动激光的条件不同、靶制作误差等各方面.要搞清楚这些差异的来源,需要进行更深入仔细的研究.

对于理想的射流孔靶,是一个纯粹的二维问题,好的实验结果对于二维程序的检验是很有利的.例如采用更硬(即密度更高)的材料来做基底,则上述的后续等离子体喷射将大为减弱,射流的构型将更复杂,更有利于程序的检验等.这类实验的研究,对于进一步优化理论模拟中的物理模型、参数等方面

的研究都将具有很重要的价值.

4. 结 论

利用波长为 13.9 nm 的 X 射线激光作为探针,诊断了纳秒激光辐照特殊圆孔靶产生的激光加速射流现象,所得结果与理论模拟结果定性一致.这表明所用实验方案是可行的,一方面为 ICF 相关研究提供了很好的校验,另一方面也为 X 射线激光在诊断 ICF 感兴趣的等离子体研究方面开辟了新的方向.

感谢同济大学王占山研究小组、长春光学精密机械与物理研究所金春水研究小组和上海光学精密机械研究所蔡研究小组为实验提供所需的各种 X 射线光学元件,同时感谢“神光 II”激光装置运行组的高效运行.

- [1] Ladenburg R, Van Voorhis C C, Winckler J 1949 *Phys. Rev.* **76** 62
- [2] Finley P J 1966 *J. Fluid Mech.* **26** 337
- [3] Farley D R, Estabrook K G, Glendinning S G, Glenzer S H, Remington B A, Shigemori K, Stone J M, Wallace R J, Zimmerman G B, Harte J A 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 1982
- [4] Shigemori K, Kodama R, Farley D R, Koase T, Estabrook K G, Remington B A, Ryutov D D, Ochi Y, Azechi H, Stone J, Turner N 2000 *Phys. Rev. E* **62** 8838
- [5] Ryutov D D, Drake R P, Kane J, Liang E, Remington B A, Wood-Vasey W M 1999 *Astrophys. J.* **518** 821
- [6] Ryutov D D, Remington B A, Robey H F, Drake R P 2001 *Phys. Plasmas* **8** 1804
- [7] Foster J M, Wilde B H, Rosen P A, Perry T S, Fell M, Edwards M J, Lasinski B F, Turner R E, Gittings M L 2002 *Phys. Plasmas* **9** 2251
- [8] Blue B E, Robey H F, Glendinning S G, Bono M J, Burkhart S C, Celeste J R, Coker R F, Costa R L, Dixit S N, Foster J M, Hansen J F, Haynam C A, Hermann M R, Holder J P, Hsing W W, Kalantar D H, Lanier N E, Latray D A, Louis H, MacGowan B J, Maggelssen G R, Marshall C D, Moses E I, Nikitin A J, O'Brien D W, Perry T S, Poole M W, Rekow V V, Rosen P A, Schneider M B, Stry P E, Van Wonerghem B M, Wallace R, Weber S V, Wilde B H, Woods D T, Young B K 2005 *Phys. Plasmas* **12** 056313
- [9] DaSilva L B, Barbee T W, Cauble R, Celliers P, Ciarlo D, Libby S, London R A, Matthews D, Mrowka S, Moreno J C, Ress D, Trebes J E, Wan A S, Weber F 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3991
- [10] Trebes J E, Brown S B, Campbell E M, Matthews D, Nilson D G, Stone G F, Whelan D A 1987 *Science* **238** 517
- [11] DaSilva L B, Trebes J E, Balhorn R, Mrowka S, Anderson E, Attwood D T, Barbee T W, Brase J, Corzett M, Gray J 1992 *Science* **258** 269
- [12] Wang C, Gu Y, Fu S Z, Wu J, Wang W, Sun Y Q, Dong J Q, Sun J R, Wang R R, Ni Y L, Wan B G, Zhou G L, Huang G L, Zhang G P, Lin Z Q, Wang S J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 847 (in Chinese) [王琛、顾援、傅思祖、吴江、王伟、孙玉琴、董佳钦、孙今人、王瑞荣、倪元龙、万炳根、周关林、黄关龙、张国平、林尊琪、王世绩 2002 物理学报 **51** 847]
- [13] Wang C, Wang W, Sun J R, Fang Z H, Wu J, Fu S Z, Ma W X, Gu Y, Wang S J, Zhang G P, Zheng W D, Zhang T X, Peng H M, Shao P, Yi K, Lin Z Q, Wang Z S, Wang H C, Zhou B, Chen L Y, Jin C S 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 202 (in Chinese) [王琛、王伟、孙今人、方智恒、吴江、傅思祖、马伟新、顾援、王世绩、张国平、郑无敌、张覃鑫、彭惠民、邵平、易葵、林尊琪、王占山、王宏昌、周斌、陈玲燕、金春水 2005 物理学报 **54** 202]
- [14] Zheng W D, Zhang G P, Wang C, Sun J R, Fang Z H, Gu Y, Fu S Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3984 (in Chinese) [郑无敌、张国平、王琛、孙今人、方智恒、顾援、傅思祖 2007 物理学报 **56** 3984]
- [15] Zheng W D, Zhang G P 2007 *Chin. Phys.* **16** 2439

Experimental diagnosis of plasma jets by using an X-ray laser^{*}

Wang Chen¹⁾ Fang Zhi-Heng¹⁾ Sun Jin-Ren¹⁾ Wang Wei¹⁾ Xiong Jun¹⁾
Ye Jun-Jian¹⁾ Fu Si-Zu¹⁾ Gu Yuan¹⁾ Wang Shi-Ji¹⁾ Zhen Wu-Di²⁾
Ye Wen-Hua²⁾ Qiao Xiu-Mei²⁾ Zhang Guo-Ping²⁾

1)(*Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China*)

2)(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

(Received 13 August 2007; revised manuscript received 16 July 2008)

Abstract

The supersonic jets and the interaction of strong shock waves are ubiquitous features of the nonlinear hydrodynamics of inertial-confinement fusion, astrophysics, and related fields of high energy-density science, so very important value have their studies in laboratory. A laboratories experimental study on jets is reported. The plasma jets were created by an ns laser pulse irradiating a special circular hole target, and the shadow of jets were recorded by using an X-ray laser probe with wavelength of 13.9 nm. Legible shadow images of plasma jets were obtained. The experimental results and theoretical simulation were in qualitative agreement.

Keywords: jet, X-ray laser, plasma diagnosis

PACC: 5270, 4255V

^{*} Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant Nos. 2006AA804701, 2006AA804702).