

X 射线激光对激光烧蚀薄片靶的阴影成像研究*

王 琛^{1)†} 郑无敌²⁾ 方智恒¹⁾ 孙今人¹⁾ 王 伟¹⁾ 熊 俊¹⁾ 傅思祖¹⁾
顾 援¹⁾ 王世绩¹⁾ 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)

(2009 年 9 月 1 日收到; 2009 年 10 月 14 日收到修改稿)

长脉冲激光辐照烧蚀薄片靶会加速物质进而在靶后表面产生凹坑现象, 通过凹坑的实验诊断, 配合相关的理论模拟, 对理解相关物理过程, 校验理论程序的相关参数具有很好的参考价值. 利用波长 13.9 nm 的类镍银 X 射线激光作为探针, 诊断了纳秒倍频激光辐照 C_8H_8 平面薄片靶产生的等离子体以及加速物质产生的凹坑现象, 并利用 XRL2D 程序对实验现象进行了细致的模拟, 电子热传导限流因子选取为 0.03 时的模拟结果与实验符合比较好. 模拟给出凹坑宽度和深度(即薄片加速距离)与实验观测数据定量符合, 但是模拟结果无法解释远离焦斑区薄片增厚现象.

关键词: 等离子体诊断, X 射线激光, 阴影成像

PACC: 5270, 4255V

1. 引 言

激光惯性约束聚变(ICF)是当今科技界一个非常重要的研究方向, 对于能源、国家安全等各方面都有巨大的经济和社会价值. 受到实验条件和诊断能力不足的限制, 数值模拟一直是 ICF 以及激光等离子体相互作用研究的重要手段. 然而, 在这些高能密度物理研究中, 物理过程本身异常复杂, 人们对其中的物理实质认识目前还有欠缺, 还受到计算能力的限制, 理论模拟在建模、计算方法、参数等方面存在诸多的不完善. 因此利用实验结果来检验程序是整个研究必不可少的重要环节. 如果能够设计一些简单的实验, 在大多数条件和参数都确定的情况下, 排除干扰因素, 通过实验测量结果与理论模拟结果进行仔细比对, 一方面可以检验参数和物理建模, 另一方面也能够加深对物理过程的认识, 具有很好的实际意义.

在利用 X 射线激光为探针光, 诊断激光烧蚀不稳定性发展的实验研究中发现, 高功率激光辐照烧蚀平面薄片靶, 将会在靶后产生凹坑. 经过大量发次的验证, 凹坑形状、深度等有相当的稳定性和可

重复性, 为此我们专门设计了利用纳秒倍频激光驱动平面薄片靶这一简单的实验来和理论模拟进行比对. 这一实验的几何结构非常简单, 更特别的是薄片靶制作的足够窄, 以至于均匀辐照焦斑能够完全覆盖靶, 这样产生的将不是凹坑而是凹槽. 利用激光探针对此凹槽进行侧向阴影成像, 将会得到关于凹槽的具体信息, 包括形状、加速距离等. 通过与相同驱动条件下理论模拟结果比较, 将会对校验理论程序有很好的价值.

一般情况下, 实验室研究中对高温稠密等离子体的阴影诊断, 是采用 keV 量级的硬 X 射线进行的. 这种方法取得了很好的效果, 但缺点是诊断的空间分辨率比较低, 一般在几十微米左右. 目前已经研究比较成熟的软 X 射线激光具有方向性好、脉冲短、亮度高和准单色的特点^[1-13], 已经在等离子体诊断中发挥了一定的作用^[14-20], 其特点就是诊断的空间分辨率非常高, 可达 1 μm . 利用 X 射线激光诊断激光烧蚀薄片靶产生的凹槽现象, 能够提供很好的实验结果.

本文描述了在神光 II 激光装置上, 利用 X 射线激光诊断纳秒激光辐照烧蚀 C_8H_8 薄片靶产生的凹槽现象, 并与理论模拟结果进行了仔细的比较.

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2007AA804701, 2007AA804703)资助的课题.

† E-mail: wangch@mail.shenc.ac.cn

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 射线激光作为探针光源对装置第九路纳秒倍频激光辐照平面薄片靶产生的等离子体进行阴影成像. 方案示意图见图 1. 目标平面靶材料为 C_8H_8 , 厚度约为 $20\ \mu\text{m}$, 在其后约 $450\ \mu\text{m}$ 处放置直径约为 $100\ \mu\text{m}$ 的细丝作为定位, 细丝水平偏离靶中心约 $200\ \mu\text{m}$ 以保证不会影响到靶等离子体的产生. 第九路驱动激光脉冲宽度约为 $2.4\ \text{ns}$, 波长为 $530\ \text{nm}$, 能量约为 $1.5\ \text{kJ}$, 以 $450\ \mu\text{m} \times 450\ \mu\text{m}$ 的均匀焦斑辐照待测平面薄片靶正面, 焦斑区域大于薄片靶宽度, 因此产生的凹坑基本上是一维的. 激光烧蚀靶面产生强冲击波, 加速靶面形成向后的弯曲

形变.

作为探针的 X 射线激光是利用神光 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 $90\ \text{ps}$, 能量约为 $100\ \text{J}$, 预-主脉冲的强度比约为 5% , 时间间隔约为 $3\ \text{ns}$) 线聚焦辐照两块对接的镀银玻璃平板靶产生的波长为 $13.9\ \text{nm}$ 的饱和输出类镍银 X 射线激光. X 射线激光侧向穿越待测平面薄片靶, 并利用软 X 射线多层膜成像元件对待测靶成像到 CCD 接收面上, 系统的放大倍数约为 20 倍, 配合 CCD 的像素尺寸 ($20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$), 诊断的空间分辨率约为 $1\ \mu\text{m}$. 在待测靶位置 X 射线激光光束截面的空间尺寸约为 $2\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$, 远大于待测靶等离子体区域, 能够测量到感兴趣的全部区域. 同时 X 射线激光的脉冲宽度约为 $30\ \text{ps}$, 能够很好地冻结等离子体的发展, 获得等离子体的瞬时图像.

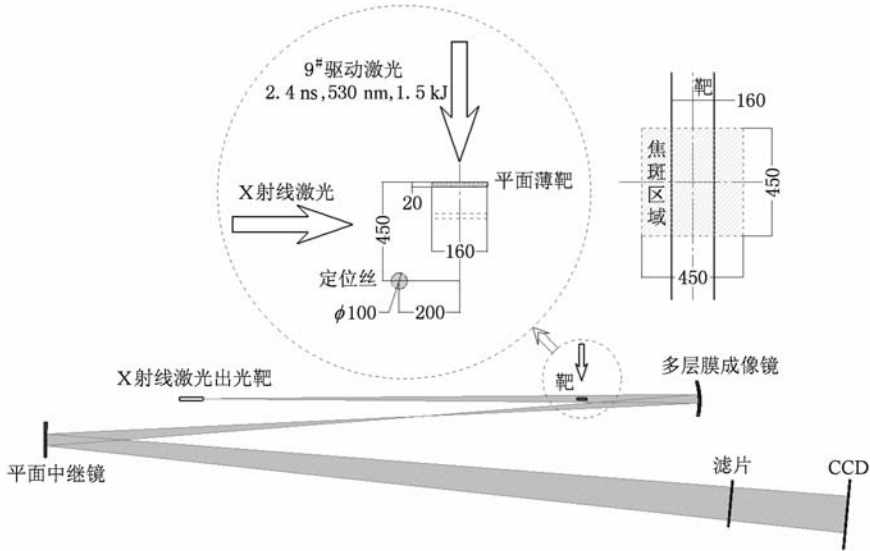


图 1 X 射线激光阴影法诊断平面薄片靶实验方案与靶结构示意图(参数单位: μm)

3. 实验结果与理论模拟比较

图 2 是利用 X 射线激光诊断激光辐照烧蚀平面薄片靶获得的阴影图像, 驱动激光的脉冲波形和 X 射线激光的诊断时刻如图 3 所示. 图 2 中 $x = 0$ 位置对应平面薄片靶正面的初始靶面, $x = 400\text{--}500$ 区域的阴影是定位丝产生的, y 方向刻度只表明相对位置. 第九路驱动激光脉冲波形接近方波, 宽度约为 $2.4\ \text{ns}$, 波长为 $530\ \text{nm}$, 到靶室窗口能量约为 $1.5\ \text{kJ}$. X 射线激光的诊断时刻 $t = 0$ 对应于脉冲下

降沿的中点位置. 从图 2 中可以明显看到, 由于驱动激光的烧蚀, 初始靶面被向后推形成一个凹槽, 中心位置加速距离(从靶的初始迎光面到凹槽迎光密度梯度最大处的距离)约为 $300\ \mu\text{m}$.

采用实验相同的条件, 利用 XRL2D 程序进行了模拟计算. 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[21]. 计算采

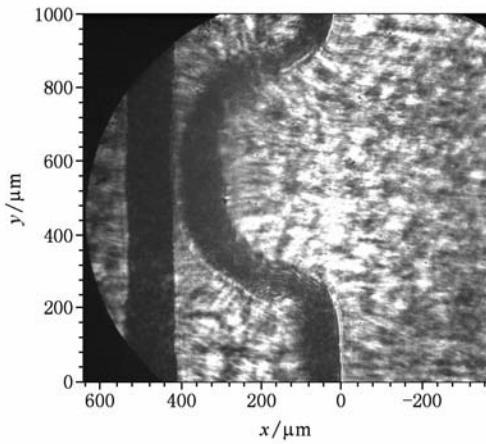


图 2 平面薄片靶等离子体诊断结果 $x=0$ 对应静态靶面位置

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 3 中所示波形,强度空间分布取平顶分布. 电子热传导限流因子取 $f_e=0.03$,激光吸收系数约为 70%.

计算中首先采用网格不动 Euler 方法,计算中网格始终保持为矩形且不动,初始靶面处的网格密,远离初始靶面的网格“等比”加粗. 图 4(a)是模拟计算得到的 $t=0$ ns 即 X 射线激光诊断时刻的密度分布结果,图 4(b)是相应密度分布经 X 射线激光探针照射后的阴影图像. 其中 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轫致吸收. 经过计算后大致得到类镍银 13.9 nm X 射线激光在 CH 等离子体中的吸收系数为 3×10^4 cm^2/g . 再考虑沿着 X 射线激光传播方向,形变是一维的,就可计算得到图 4(b)中的阴影图像.

通过比较图 2 与图 4(b),可以看出在加速距离(约 300 μm)以及凹槽形状等方面与实验结果符合较好. 但是这个计算不够理想,主要原因是采用了网格不动法. 计算中网格始终保持为矩形,随着时间的推移,薄片向左运动,凹槽底部的网格越来越宽,数值扩散增大,计算精度降低,故计算得到的凹槽具有很宽的顶部. 此外,模拟显示 CH 薄片被拉断,在实验图像上尽管也有拉断迹象,但是并不明显.

鉴于上述问题,尝试改进计算方法. 细网格紧随高密度介质随着时间演化,初始的矩形网格慢

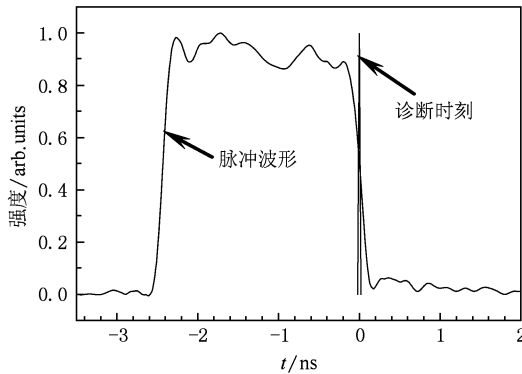


图 3 驱动平面薄片靶的激光脉冲波形和 X 射线激光的诊断时刻示意图

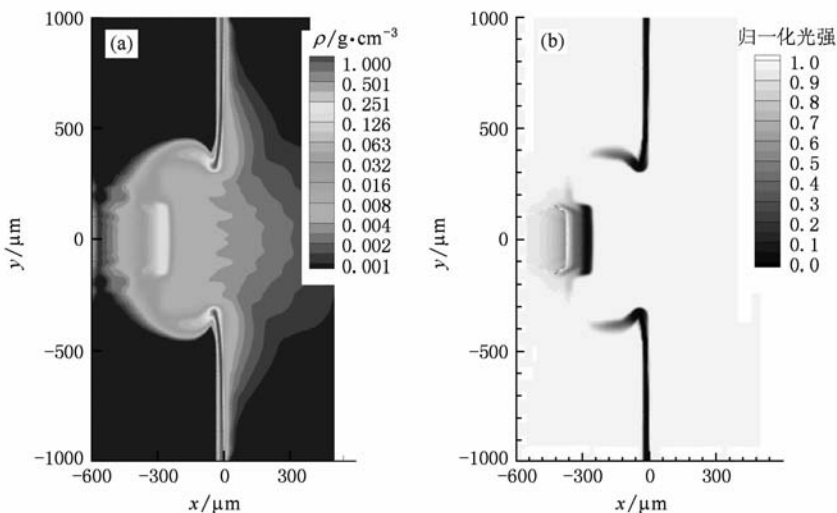


图 4 网格不动方法模拟得到 $t=0$ ns 时刻的密度分布与探针照射后的阴影 (a)密度分布 ρ , (b)探针照射后的阴影

慢变得不再是矩形,如图 5 所示,这样保证凹槽底部处计算网格始终很密,很好地抑制了计算中的数值扩散;另外驱动激光空间分布考虑为 6 次超高斯形,使得激光强度在焦斑边缘产生光滑的过渡. 电子热传导限流因子仍然取 $f_e = 0.03$, 计算结果如图 6 所示. 可以看出,图 6(b) 与实验结果图 2 符合得非常好.

更进一步考察电子热传导限流因子的影响. 计算条件与上面改进后的方法完全相同,仅改变限流因子,计算时刻选取在 X 射线激光的诊断时刻,即 $t = 0$ ns. 图 7 为电子热传导限流因子 $f_e = 0.01, 0.03, 0.05, 0.10$ 时的计算结果,其对应的激光吸收系数分别为 28.0%, 71.0%, 88.7% 和 96.4%.

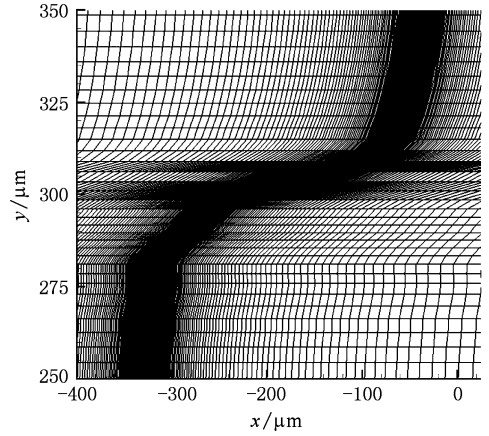


图 5 模拟过程中某时刻的网格图像

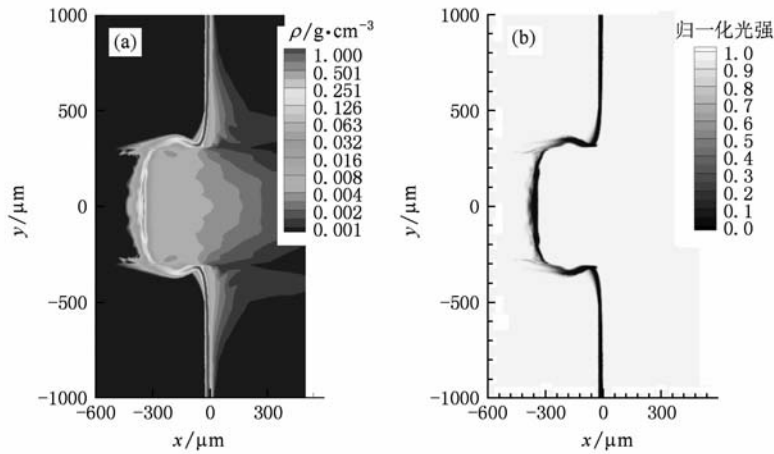


图 6 改进算法后模拟得到 $t = 0$ ns 时刻的的密度分布与探针照射后的阴影 (a) 密度分布, (b) 探针照射后的阴影

限流因子不同,激光吸收系数差别较大,薄片加速距离将有相应的差别. 综合来看,限流因子取 0.03 同实验更接近,即激光吸收 70% 左右是合适的. 计算的 $f_e = 0.03$ 的加速距离约为 330 μm , 与实验观测值 300 μm 基本一致. 略微偏大的原因可能是计算中采用 6 次超高斯的激光强度空间分布,而又保持总驱动能量不变,这会导致凹槽中心驱动功率密度被略微高估.

实验观测到的凹槽口宽度约为 670 μm , 而模拟的该宽度约为 640 μm ($f_e = 0.03$), 二者也符合得比较好.

实验观测与理论模拟有较大差别之处是 CH 薄片不透光的阴影宽度,包括凹槽底部区域和远离焦斑的区域. 平面薄片靶的初始宽度约为 20 μm , 即使考虑成像差、调靶精度等因素的影响,阴影的宽度也应在 30 μm 以内. 但是实验观测值约为 100

μm , 两者存在较大的偏差. 对于凹槽底部区域,迎光面温度比较高,吸收主要为逆韧致吸收,透光率的计算应该比较准确;而凹槽背面温度、密度都比较低,光电吸收系数的计算可能偏小,等离子体对类镍银 13.9 nm X 射线激光探针实际的吸收要大得多. 实验中探针光程为 160 μm , 因此在密度 $\rho > 3.3 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 处,透过率小于 20%,考虑探针强度、本底噪声等因素,凹槽底部阴影宽度增宽到约 100 μm 也是可能的. 对于远离焦斑的区域,从图 2 可以看到,右边边缘很锐,表明有激光辐照,可能是驱动激光在均匀辐照聚焦后在焦斑外的旁瓣能量;而左边 X 射线激光探针强度则有比较宽的渐变区域,可能是由于三维效应而导致冷等离子体卷绕到该区域. 冷等离子体对类镍银 X 射线激光探针的吸收非常强烈,因此造成了这些激光照不到的区域 CH 薄片增厚的现象. 而二维模拟一方面没考虑焦斑外可

能有激光能量的情况,另一方面也不能对冷等离子体三维卷绕现象作出计算,因此目前的二维模拟不

能解释这一现象.具体是否是因为这些原因造成 CH 薄片增厚,还有待进一步的研究.

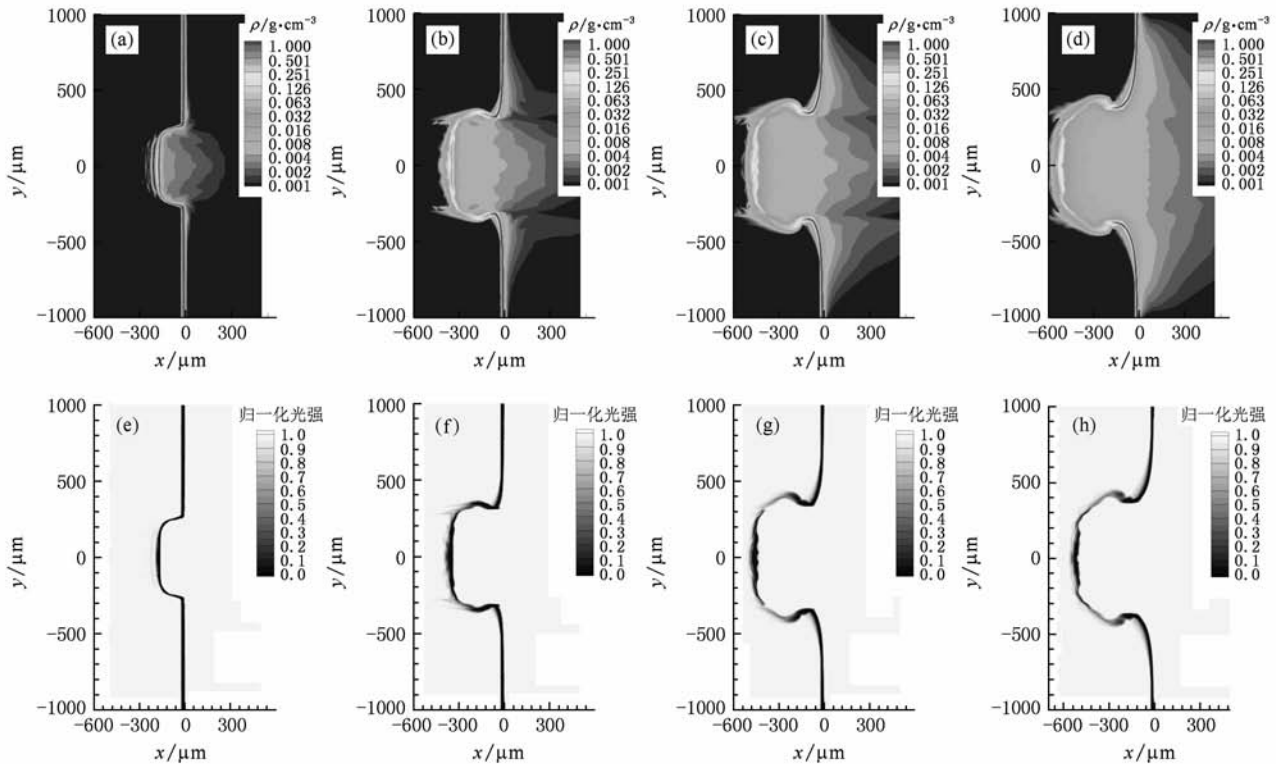


图7 不同限流因子条件下模拟结果 (a),(b),(c),(d)为密度分布;(e),(f),(g),(h)为对应的探针照射后的阴影。(a),(e) $f_e = 0.01$; (b),(f) $f_e = 0.03$; (c),(g) $f_e = 0.05$; (d),(h) $f_e = 0.10$

4. 结 论

利用波长为 13.9 nm 的类镍银 X 射线激光作为探针,诊断了纳秒倍频激光辐照 C_8H_8 平面薄片靶产生的等离子体以及加速物质产生的凹槽现象.利用 XRL2D 程序对实验现象进行了细致的模拟,结果表明,在电子热传导限流因子选取为 0.03 时,模

拟结果与实验观测数据理论符合得非常好.模拟给出凹坑宽度和深度(即薄片加速距离)与实验观测数据定量符合,但是模拟结果还无法解释远离焦斑区薄片增厚现象.

感谢同济大学王占山、陈玲燕、周斌、长春光机所金春水、上海光机所易葵等提供实验所需的各种 X 射线光学元件;感谢神光 II 激光装置运行组的高效运行.

[1] Matthews D L, Hagelstein P L, Rosen M D, Eckart M J, Ceglio N M, Hazi A U, Meddecki H, MacGowan B J, Trebes J E, Whitten B L, Campbell E M, Hatcher C W, Hawryluk A M, Kauffman R L, Pleasance L D, Rambach G, Scofield J H, Stone G, Weaver T A 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 110

[2] Wang S J, Gu Y, Zhou G L, Yu S Y, Fu S Z, Ni Y L, Wu J, Zhou Z L, Han G Q, Tao Z C, Lin Z Q, Wang S S, Chen W N, Fan D Y, Zhang G P, Sheng J T, Peng H M, Zhang T X, Shao Y F 1992 *J. Opt. Soc. Am. B* **9** 360

[3] Carillon A, Chen H Z, Dhez P, Dwivedi L, Jacoby J, Jaegle P, Jamelot G, Zhang J, Key M H, Kidd A, Klisnick A, Kodama R, Krishnan J, Lewis C L S, Neely D, Norreys P, O'Neill D, Pert G J, Ramsden S A, Raucourt J P, Tallents G J, Uhmohibhi J 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 2917

[4] Koch J A, MacGowan B J, DaSilva L B, Matthews D L, Underwood J H, Batson P J, Mrowka S 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 3291

[5] Rocca J J, Clark D P, Chilla L A, Shlyaptsev V N 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 1476

- [6] Zhang J, MacPhee A G, lin J, Wolfrum E, Smith R, Danson C, Key M H, Lewis C L S, Neely D, Nilsen J, Pert G J, Tallents G J, Wark J S 1997 *Science* **276** 1097
- [7] Wang C, Wang W, Wu J, Dong J Q, Sun J R, Wang R R, Fu S Z, Gu Y, Wang S J, Huang G L, Lin Z Q, Zhang G P, Zhang T X, Zheng W D 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3752 (in Chinese) [王琛、王伟、吴江、董佳钦、孙今人、王瑞容、傅思祖、顾援、王世绩、黄关龙、林尊琪、张国平、张覃鑫、郑无敌 2004 物理学报 **53** 3752]
- [8] Wang C, Fang Z H, Wang W, Xiong J, Sun J R, Wu J, Fu S Z, Gu Y, Wang S J, Zhang G P, Zheng W D, Huang G L, Guan F Y, Xie X L, Lin Z Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4156 (in Chinese) [王琛、方智恒、王伟、熊俊、孙今人、吴江、傅思祖、顾援、王世绩、张国平、郑无敌、黄关龙、管福义、谢兴龙、林尊琪 2006 物理学报 **55** 4156]
- [9] Pang H L, Li Y J, Lu X, Zhang J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6382 (in Chinese) [庞海龙、李英骏、鲁欣、张杰 2006 物理学报 **55** 6382]
- [10] Qiao X M, Zhang G P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5248 (in Chinese) [乔秀梅、张国平 2007 物理学报 **56** 5248]
- [11] Qiao X M, Zheng W D, Zhang G P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5639 (in Chinese) [乔秀梅、郑无敌、张国平 2008 物理学报 **57** 5639]
- [12] Meng L M, Teng A P, Li Y J, Cheng T, Zhang J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5436 (in Chinese) [孟立民、滕爱萍、李英骏、程涛、张杰 2009 物理学报 **58** 5436]
- [13] Wang C, Zhang G P, Zheng W D, Qiao X M, Fang Z H, Sun J R, Wang W, Xiong J, Fu S Z, Gu Y, Wang S J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6264 (in Chinese) [王琛、张国平、郑无敌、乔秀梅、方智恒、孙今人、王伟、熊俊、傅思祖、顾援、王世绩 2009 物理学报 **58** 6264]
- [14] 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
- [15] Trebes J E, Brown S B, Campbell E M, Matthews D, Nilson D G, Stone G F, Whelan D A 1987 *Science* **238** 517
- [16] 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
- [17] 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]
- [18] 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]
- [19] 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]
- [20] Wang C, Fang Z H, Sun J R, Wang W, Xiong J, Ye J J, Fu S Z, Gu Y, Wang S J, Zheng W D, Ye W H, Qiao X M, Zhang G P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7770 (in Chinese) [王琛、方智恒、孙今人、王伟、熊俊、叶君建、傅思祖、顾援、王世绩、郑无敌、叶文华、乔秀梅、张国平 2008 物理学报 **57** 7770]
- [21] Zheng W D, Zhang G P 2007 *Chin. Phys.* **16** 2439

Shadow imaging studies on laser-ablated foil target by using an X-ray laser^{*}

Wang Chen^{1)†} Zheng Wu-Di²⁾ Fang Zhi-Heng¹⁾ Sun Jin-Ren¹⁾ Wang Wei¹⁾ Xiong Jun¹⁾
Fu Si-Zu¹⁾ Gu Yuan¹⁾ Wang Shi-Ji¹⁾ 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 1 September 2009; revised manuscript received 14 October 2009)

Abstract

There is a “pit” phenomenon in the target surface when long pulse laser ablates the foil target and speeds up the material of target. Laboratory diagnosis and theoretical simulation of the pit can help us understand the relevant physical processes and check relevant parameters of the procedures. We use 13.9 nm Ni-like Ag X-ray laser as a probe to diagnose the plasma and the pit phenomenon, which is produced by 2ω nanosecond laser irradiation of C_8H_8 foil target. XRL2D code is used to simulate the experiments. Results show that, when the limiting factor of electron thermal transmittance is 0.03, the simulated pit width and depth (the distance of thin foil accelerated) agree with the results of experiment, but the foil thickening phenomenon in the area far away from the focal spot region cannot be explained the simulation.

Keywords: plasma diagnosis, X-ray laser, shadow imaging

PACC: 5270, 4255V

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2007AA804701, 2007AA804703).

[†] E-mail: wangch@mail.shenc.ac.cn