

软X射线激光背光阴影成像技术的空间分辨研究

王琛 安红海 方智恒 熊俊 王伟 孙今人

Spatial resolution study of soft X-ray laser backlight shadow imaging technique

Wang Chen An Hong-Hai Fang Zhi-Heng Xiong Jun Wang Wei Sun Jin-Ren

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 015203 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171124

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171124>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[分幅变像管动态空间分辨率的标定](#)

Calibration of the dynamic spatial resolution of framing image-converter

物理学报.2016, 65(9): 095202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.095202>

[碰撞等离子体中电中性条件对单探针测量的约束](#)

The electrical-neutrality constraint of single Langmuir probe measurement in collisional plasma

物理学报.2015, 64(11): 115201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.115201>

[高气压均匀直流辉光放电等离子体的光学特性](#)

Optical properties of direct current glow discharge plasmas at high pressures

物理学报.2015, 64(4): 045206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.045206>

[Deduction of temperature and density spatial profile for implosion core by multi-objective optimization](#)

物理学报.2014, 63(12): 125209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.125209>

[软X射线激光探针诊断高Z材料等离子体](#)

Diagnosis of high-Z plasma with soft X-ray laser probe

物理学报.2014, 63(21): 215203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.215203>

软X射线激光背光阴影成像技术的空间分辨研究*

王琛† 安红海 方智恒 熊俊 王伟 孙今人

(上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

(2017年5月17日收到; 2017年10月2日收到修改稿)

软X射线激光阴影成像技术是一种诊断高温稠密等离子体临界面附近阴影轮廓的诊断技术, 具有测量视场大、空间分辨能力高的特点, 具有重要的应用前景. 对该技术的空间分辨具体能够达到什么程度则没有进行过系统研究. 本文分别从光路几何、衍射极限、成像像差三个方面进行了仔细分析, 结果表明目前采用该技术的诊断系统能够达到约 $2\ \mu\text{m}$ 的空间分辨. 主要受限是光路几何因素, 通过增加放大倍数、选择单元尺寸更小的接收元器件等方式, 有希望达到优于 $1\ \mu\text{m}$ 的空间分辨.

关键词: 等离子体诊断, 空间分辨, 软X射线激光

PACS: 52.70.-m, 52.70.La, 42.55.Vc

DOI: 10.7498/aps.67.20171124

1 引言

随着大型激光装置, 如美国的国家点火装置(NIF)、我国的神光(SG)系列装置等的发展, 激光等离子体的研究也越来越受到重视. 诸如激光惯性约束聚变(ICF)^[1,2]、高能量密度物理(HEDP)、激光加速器、天体物理等领域的应用对于科学基础研究、能源开发、国防科技发展均具有十分重要的意义, 具有广泛的应用前景和潜在的经济和社会效益. 在激光等离子体实验研究中, X射线背光技术是一种被广泛采用的诊断技术. 利用该技术, 能够获得等离子体发展的轮廓, 有助于深刻认识激光靶耦合的相关物理过程, 并可用于校验相关的模拟程序, 对激光等离子体的研究具有重要的价值^[3-11]. 目前常用的X射线背光技术往往采用keV能段的硬X射线, 方法有点投影^[9]、针孔成像^[10], Kirkpatrick-Baez (KB)显微成像^[11]等, 技术相对成熟; 而软X射线波段的背光技术则由于合适的背光源稀缺, 研究得比较少.

随着软X射线激光技术的发展, 一种利用软X射线激光作为背光探针源的等离子体阴影成像技

术被发展起来^[12,13]. 相对于硬X射线, 软X射线激光波长正合适, 适用于诊断临界面附近的等离子体^[14]. 所谓临界面, 指的是等离子体电子密度与入射激光相匹配的界面, 此时对应的电子密度称为临界密度. 临界密度与入射激光的波长直接相关, 如基频激光($\lambda = 1053\ \text{nm}$)对应临界密度约为 $10^{21}\ \text{cm}^{-3}$; 二倍频激光($\lambda = 527\ \text{nm}$)对应临界密度约为 $4. \times 10^{21}\ \text{cm}^{-3}$. 入射激光只能在低于临界密度的等离子体中传播, 而不能在高于临界密度的等离子体中传播, 因此在激光等离子体中, 临界面相当于入射激光的反射面. 在临界面附近, 等离子体状态参数变化很大、物理过程非常剧烈, 因此也是相关研究最感兴趣的区域. 另一方面, 在软X射线波段, 多层膜光学元件技术比较成熟^[15], 可以采用近正入射的方式进行成像, 可以大大提高系统的空间分辨. 除此之外, 软X射线激光良好的单色性、方向性、高亮度以及短脉冲的特点也有助于实现待测等离子体的瞬时成像, 同时有助于进行数据的后期处理^[16-18]. 因此, 软X射线激光背光阴影成像技术成为激光靶耦合、等离子体射流、流体力学不稳定性研究等激光等离子体研究中的一种很好的

* 科学挑战专题(批准号: TZ2016005)和国家自然科学基金(批准号: 11075146, 61475146)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangch@mail.shnc.ac.cn

工具 [12,13].

基于神光 II(SG-II) 高功率激光装置驱动产生的波长为 13.9 nm 的类镍银软 X 射线激光, 发展了相应的软 X 射线激光背光阴影成像技术, 能够对临界界面附近的等离子体阴影轮廓进行高空间分辨的诊断. 但这种方法具体的空间分辨能力能达到多少, 尚未进行明确的研究. 本文对该诊断技术的空间分辨进行了仔细研究, 给出了比较明确的诊断空间分辨能力.

2 软 X 射线激光背光阴影成像技术

顾名思义, 软 X 射线激光背光阴影成像技术指的就是利用软 X 射线激光作为背光的阴影成像技术, 典型的方案示意图 1. 软 X 射线激光作为背光, 经过自由发散 L (约 500 mm) 后穿越待诊断等离子体, 其后利用多层膜球面镜 (口径约 $\Phi 10$ mm, 曲率半径约 550 mm, 入射角度约 1.33°) 对待诊断

等离子体进行成像, 像面为电荷耦合元件 (CCD) 的接收面. 软 X 射线激光背光经过一块多层膜平面镜中继和滤片衰减后, 被软 X 射线 CCD 接收记录.

作为背光的类镍银软 X 射线激光波长 13.9 nm, 输出能量约 100 μJ , 脉冲宽度约 30 ps, 发散角约 $3 \text{ mrad} \times 4 \text{ mrad}$. 13.9 nm 的波长, 长短正适合于诊断临界界面附近的等离子体; 约 100 μJ 的输出能量能够保证足够的信号强度; 30 ps 的短脉冲宽度能够很好地冻结等离子体的发展, 获得待诊断等离子体的瞬时图像; 而约 $3 \text{ mrad} \times 4 \text{ mrad}$ 的发散角使得探针发散到达待诊断靶位置时的探针光束截面的空间尺寸约 $1.5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 远大于数百微米的待测等离子体区域, 因此能够测量到感兴趣的全部区域. 正是由于上述这些优点, 使得软 X 射线激光背光阴影成像技术成为一种诊断高温稠密等离子体临界界面附近等离子体阴影轮廓的好方法, 在相关研究中取得了很好的效果 [12-14].

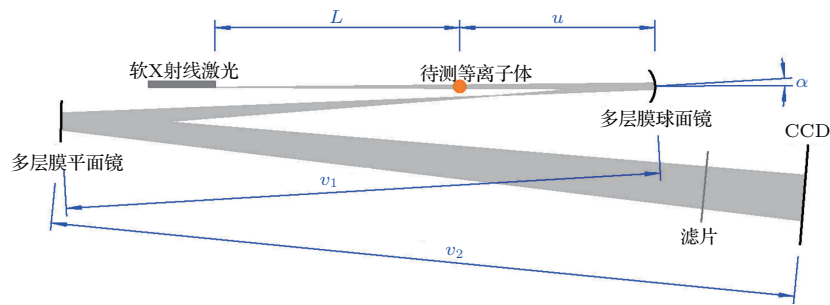


图1 软 X 射线激光背光阴影成像技术方案示意图

Fig. 1. Schematic diagram of soft X-ray laser backlight shadow imaging technology.

3 空间分辨能力的估算

在软 X 射线激光背光阴影成像技术中, 对待诊断等离子体采取了近正入射成像, 比起传统的硬 X 射线点投影或者针孔成像技术而言, 空间分辨大大提高, 但具体提高到什么程度, 则需要进一步深入研究. 空间分辨能力是诊断技术的一个重要指标, 亦即能够清晰分辨待测物的能力, 简言之, 就是在接收面能够分辨出物上多近的两个点. 影响分辨能力的因素主要有三方面, 下面依次进行分析.

3.1 光路几何限制

作为探测器, 比如 CCD 等面元阵列探测器, 每个像素都是一个接收单元, 像素的尺寸即能够接收

到的最小单元尺寸. 考虑物上距离很近的两个物点, 经过成像后得到两个像点. 显然, 如果两个像点落在 CCD 的同一个像素单元上, 显然是不可分辨的; 如果恰好落在相邻的两个像素上, 则能够测量出两个像的强弱, 但仍然是不可分辨的; 只有两个像点分别落在间隔一个像素的单元上, 才能够在两个像点之间产生强度凹陷, 以至于可以完好分辨. 于是就可以得到光路几何的限制 l_1 , 即 CCD 最小像素尺寸的 2 倍除以放大倍数:

$$l_1 = 2p/M, \quad (1)$$

其中 p 为探测器 CCD 的最小像素尺寸, M 为系统放大倍数. 在具体的实验研究中, 分别采用了几种组合, 对应空间分辨的限制各有不同, 如表 1 所列.

表1 不同组合条件光路几何限制下空间分辨能力
Table 1. Spatial resolution limited by optical path geometry with different combined conditions.

放大倍数 M	CCD 像素数	像素尺寸 $p/\mu\text{m}\times\mu\text{m}$	空间分辨/ $\mu\text{m}\times\mu\text{m}$
10	1024 × 1024	24 × 24	4.8 × 4.8
10	1340 × 1300	20 × 20	4.0 × 4.0
10	2048 × 2048	13.5 × 13.5	2.7 × 2.7
20	1340 × 1300	20 × 20	2.0 × 2.0

3.2 衍射极限制 [19]

由于光的衍射特性, 因此对于任何的成像系统, 一个点经过成像后都会形成一个艾里斑. 根据瑞利判据, 当两个点成像形成的艾里斑中心距离等于一个艾里斑半径时, 认为能够勉强分辨, 由此可得系统的最小分辨角 θ_0 :

$$\theta_0 = 1.22\lambda/D, \quad (2)$$

其中, λ 为光束波长, D 为通光口径. 据此就可以计算图 1 类似的显微成像系统的分辨本领. 物上的相距为 l_2 的两点, 经过成像后在像面上交于两像点, 可以计算对于非相干照明下的成像在物上能够分辨的最小距离 l_2 , 即物面分辨能力为

$$l_2 = 0.61 \frac{\lambda}{n \sin \theta}, \quad (3)$$

其中, $n \sin \theta$ 即系统的数值孔径; n 为物空间的折射率, 在真空中 $n = 1$; θ 是成像的边缘光线与系统光轴的夹角, 当 θ 比较小时, 即成像元件有效半径与物距的比. 对于相干照明下的成像, 在物上能够分辨的最小距离为

$$l_2 = 0.82 \frac{\lambda}{n \sin \theta}, \quad (4)$$

可以看出, 在背光束波长不变的条件下, 增加系统的数值孔径, 也就是 θ 或者成像元件的口径, 就能够减小衍射效应对空间分辨能力的限制.

表2 不同照明光源条件下的分辨能力
Table 2. Spatial resolution with different backlight source conditions.

光源	波长 /nm	类型	衍射极限 分辨能力/ μm
白光	~ 550	非相干照明成像	20
He-Ne 激光	632.8	相干照明成像	31
软 X 射线激光	13.9	相干照明成像	0.68

作为例子, 计算了三种不同光束背光照明情况下系统的分辨本领, 计算中采用图 1 的光路, 放大倍数 $M = 10$ 倍, 物距 $u = 300$ mm, 成像元件口径 $\Phi 10$ mm, 结果如表 2 所列. 可以看出采用波长为 13.9 nm 的类镍银软 X 射线激光作为背光源, 衍射极限对空间分辨的限制约 0.68 μm , 远小于白光或 He-Ne 激光等可见光背光源.

3.3 光学成像像差影响

与理想光学系统相比, 实际成像系统总会存在像差, 像差对系统的空间分辨会产生必不可少的影响. 对于单色光成像, 像差共有五类: 球差、慧差、像散、场曲和畸变. 对于轴向物点, 只存在球差, 对于轴外物点, 五种像差都会存在. 图 1 的光路是典型的轴外物点成像, 因此五种像差都会存在. 像差带来的直接影响是使像点发生弥散. 物上的一个无限小的点, 由于存在像差, 实际像点成为一个弥散斑. 考虑距离为 l 的两个物点 P_1, P_2 , 分别成像 Q_1, Q_2 点, 两点之间距离为 L . 通常认为当 Q_1, Q_2 之间的距离达到弥散斑强度 80% 位置时, 两个点勉强可以分辨. 因此, 也可以利用单个像点的弥散斑强度在 80% 位置处的尺寸作为分辨能力的极限.

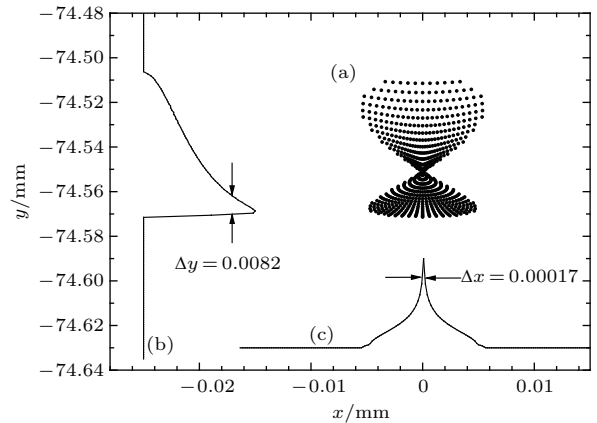


图2 利用光线追击计算的在像面的结果 (a) 光点分布; (b) y 方向强度; (c) x 方向强度

Fig. 2. Results on image plane calculated by ray-chase method: (a) Spot distribution; (b) intensity distribution along y direction; (c) intensity distribution along x direction.

利用解析的方法来分析像差相对比较复杂, 因此这里选择简单明了的光线追击方法来模拟成像的效果. 把球面镜分成 $m \times n$ 个小单元, 物点 P 与每个小单元的连线算作一条光线, 该光线在球面镜表面反射, 反射光线与像面相交, 即可得到一个

像点 $Q_{i,j}$. 计算每一条光线, 综合起来就可以得到在像面上的所有光线的像点, 即弥散斑. 对弥散斑分别进行两个方向的强度积分, 可得到强度分布, 再根据 80% 的位置, 即可计算相应的空间分辨. 图 2 是利用光线追击方法模拟计算在像面位置的结果, 其中 (a) 是所有光线产生的光点 $Q_{i,j}$ 的分布图像, (b) 是沿 y 方向积分强度分布, (c) 是沿 x 方向积分强度分布. 图中还分别标出了 80% 强度强度的位置, 对应的 $\Delta x = 0.00017 \text{ mm}$, $\Delta y = 0.0082 \text{ mm}$, 考虑到光路约 10 倍的放大, 可得像差引起的物面上的空间分辨约为 $0.017 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.82 \text{ }\mu\text{m}$.

4 实验验证

从上述空间分辨能力的分析可以看出, 对于图 1 的背光阴影成像技术的方案, 由于成像像差带来的空间分辨限制约 $0.82 \text{ }\mu\text{m}$; 由于衍射效应带来的限制约 $0.68 \text{ }\mu\text{m}$; 而光路几何限制则由于放大倍数和 CCD 的不同而有所不同, 但是几种组合对空间分辨的限制均达到 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 以上. 由此可以得到结论, 目前系统的空间分辨受限于光路几何因素. 采用更高的放大倍数或更小像素尺寸接收元件, 能够有效地提高系统放大倍数, 直到优于 $1 \text{ }\mu\text{m}$.

利用黑白光栅作为物, 对软 X 射线激光背光阴影成像技术的空间分辨能力进行了实验验证, 光路严格按照图 1 进行精密调整, 放大倍数 M 约 10 倍. 作为物的黑白光栅放置在物面 (即待测等离子体位置), 通过 CCD 记录背光成像的状况. 图 3 是不同背光源和不同周期黑白光栅的阴影成像的结果. 图 3(a) 是利用白光作为背光, 周期 $30 \text{ }\mu\text{m}$ 的黑白光栅作为物的成像图像, 能够隐约看出光栅的周期, 但基本上不能分辨细节. 此时系统空间分辨的受限因素是衍射效应, 极限约 $20 \text{ }\mu\text{m}$, 因此能够勉强看出光栅的模样. 图 3(b) 是利用 He-Ne 激光作为背光, 周期 $30 \text{ }\mu\text{m}$ 的黑白光栅作为物的成像图像. 此时系统空间分辨的受限因素仍是衍射效应, 极限约 $31 \text{ }\mu\text{m}$, 已经大于光栅的周期, 因此基本上得不到光栅的像. 图 3(c) 是利用波长 13.9 nm 的类镍银软 X 射线激光作为背光, 周期 $30 \text{ }\mu\text{m}$ 的黑白光栅作为物的成像图像. 此时系统空间分辨的受限因素已经不再是衍射效应, 而是光路几何限制, 采用的 10 倍放大和最小像素 $20 \text{ }\mu\text{m}$ 的 CCD, 因此空间分辨限

制约 $4 \text{ }\mu\text{m}$. 因此可以非常清晰地观测到光栅的像, 甚至包括光栅的缺陷、沾污等细节. 图 3(d) 是利用波长 13.9 nm 的类镍银软 X 射线激光作为背光, 周期 $6 \text{ }\mu\text{m}$ 的黑白光栅作为物的成像图像. 此时空间分辨与图 3(c) 相同, 约 $4 \text{ }\mu\text{m}$, 在局部能够隐约分辨出周期 $6 \text{ }\mu\text{m}$ 的黑白光栅的像.

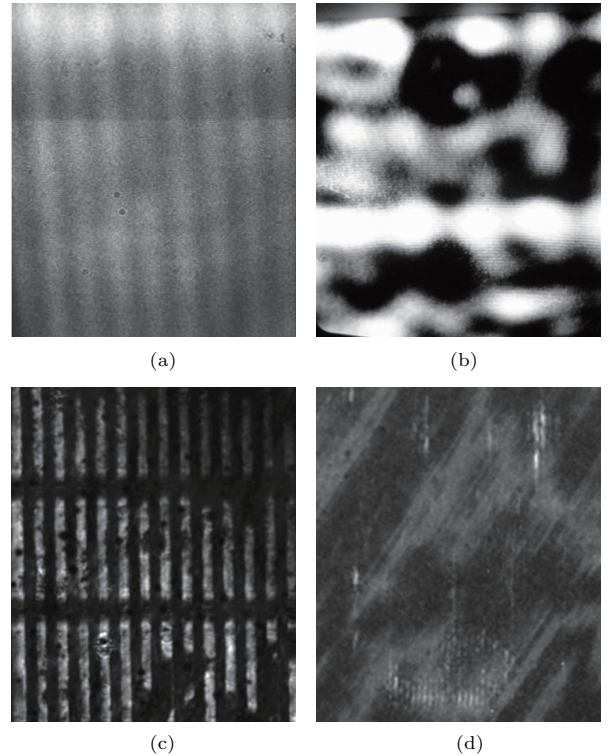


图 3 不同背光源和不同周期光栅的阴影成像图像 (a) 白光 550 nm , 光栅周期 $30 \text{ }\mu\text{m}$; (b) He-Ne 激光 632.8 nm , 光栅周期 $30 \text{ }\mu\text{m}$; (c) 软 X 射线激光 13.9 nm , 光栅周期 $30 \text{ }\mu\text{m}$; (d) 软 X 射线激光 13.9 nm , 光栅周期 $6 \text{ }\mu\text{m}$

Fig. 3. Backlight shadow images with different backlight wavelengths and different period gratings as objects: (a) White light at 550 nm , grating period of $30 \text{ }\mu\text{m}$; (b) He-Ne laser at 632.8 nm , grating period of $30 \text{ }\mu\text{m}$; (c) 13.9 nm soft X-ray laser at 13.9 nm , grating period of $30 \text{ }\mu\text{m}$; (d) soft X-ray laser at 13.9 nm , grating period of $6 \text{ }\mu\text{m}$.

作为验证, 改变光路到放大 20 倍, 这可简单地通过减小物距来实现. 在这个条件下, 光路几何限制减小到约 $2 \text{ }\mu\text{m}$, 而衍射限制也降低 (数值孔径增加), 成像像差的影响略有增加, 但仍有较大的区域能够达到 $1 \text{ }\mu\text{m}$. 因此, 整体而言, 系统的空间分辨能力仍约为 $2 \text{ }\mu\text{m}$. 在这样的条件下, 利用周期 $6 \text{ }\mu\text{m}$ 的黑白光栅重新进行了实验, 结果如图 4 所示. 相比图 3(d), 可分辨细节大大增加, 这就是提高了系统空间分辨最好的证明.

软X射线激光背光阴影成像技术在诊断高温稠密等离子体发展轮廓方面具有很好的应用前景, 目前已经开展了多方面的应用研究, 并取得了很好的应用效果. 图5是用于诊断激光辐照一维调制靶产生的瑞利-泰勒(R-T)不稳定性的实验图像, 采用与图1类似的光路, 放大倍数约20倍, 因此对应

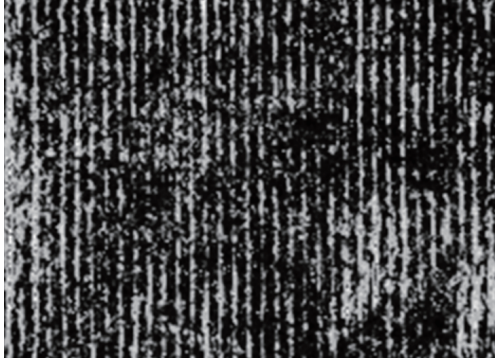


图4 利用软X射线激光背光和光栅周期6 μm的黑白光栅作为物放大20倍时的背光成像图像
Fig. 4. Backlight shadow images magnified by 20 times with a soft X-ray laser as probe and a grating with period of 6 μm as object.

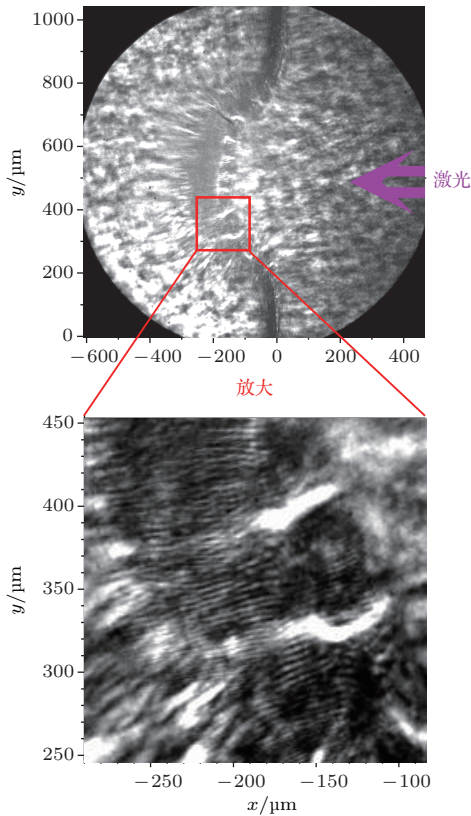


图5 一发典型的R-T不稳定性测量结果, 可以明显地看出等离子体中的微流
Fig. 5. Typical R-T instability measurement results with soft X-ray laser backlight shadow imaging technology. The microflows with scale of several microns in the plasma can be clearly seen.

的空间分辨约2 μm. 激光辐照一维调制靶后经过R-T不稳定性的发展, 在靶正面发展成一个个小鼓包, 而在靶中间和靶背面, 则产生了很多细小的“微流”. 在图5下面局部放大的图像中, 可以明显分辨出微流的结构, 对应的最小的尺度约4 μm, 这表明软X射线激光背光阴影成像技术的确具有很高的空间分辨能力.

5 结 论

软X射线激光背光阴影成像技术是一种诊断高温稠密等离子体临界面附近阴影轮廓的诊断技术, 具有测量视场大、空间分辨能力高的特点, 具有重要的应用前景. 通过对系统空间分辨能力的仔细分析, 证实目前系统诊断的空间分辨能力受限于光路的放大倍数和CCD的最小像素尺寸. 由于条件所限, 目前在诊断等离子体应用方面的诊断的空间分辨能力最好能达到约2 μm. 通过采用更高的放大倍数(由于接收元件尺寸的限制, 更大的放大倍数意味着有效视场的减小)或像素单元更小的接收元器件, 原则上能够达到1 μm以下的空间分辨.

参考文献

- [1] Lindl J 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933
- [2] Lindl J, Landen O, Edwards J, Moses E, NIC Team 2014 *Phys. Plasmas* **21** 020501
- [3] Woolsey N C, Riley D, Nardi E 1998 *Rev. Sci. Instrum.* **69** 418
- [4] Glendinning S G, Dixit S N, Hammel B A, Kalantar D H, Key M H, Kilkeny J D, Knauer J P, Pennington D M, Remington B A, Rotenberg J, Wallace R J, Weber S V 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 1904
- [5] Bradley D K, Landen O L, Bullock A B, Glendinning S G, Turner R E 2002 *Opt. Lett.* **27** 134
- [6] 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
- [7] Reighard A B, Drake R P, Dannenberg K K, Kremer D J, Grosskopf M, Harding E C, Leibbrandt D R, Glendinning S G, Perry T S, Remington B A, Greenough J, Knauer J, Boehly T, Bouquet S, Boireau L, Koenig M, Vinci T 2006 *Phys. Plasmas* **13** 082901
- [8] Huntington C M, Krauland C M, Kuranz C C, Drake R P, Park H S, Kalantar D H, Maddox B R, Remington B A, Kline J 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 10E536
- [9] 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** 604 (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** 604]

- [10] Jia G, Xiong J, Dong J Q, Xie Z Y, Wu J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 095202
- [11] Cao Z R, Ding Y K, Dong J J, Deng B, Li Y K, Mu B Z, Yi S Z, Wu J F, Chen T, Zhang J Y, Yang Z W, Yuan Z, Li J, Hu X, Yang Z H, Miao W Y, Jiang W, Yuan Y T, Huang T X, Chen B L, Chen J B, Zhan X Y, Zhang H Y, Kang D G, Gu J F, Ye W H, Wang Z S, Liu S Y, Jiang S E, Zhang B H, Zhang W Y 2015 *High Power Laser and Particle Beams* **27** 032013 (in Chinese) [曹柱荣, 丁永坤, 董建军, 邓博, 黎宇坤, 穆宝忠, 伊圣振, 吴俊峰, 陈韬, 张继彦, 杨志文, 袁铮, 李晋, 胡昕, 杨正华, 缪文勇, 蒋炜, 袁永腾, 黄天暉, 陈伯伦, 陈家斌, 詹夏雨, 张海鹰, 康洞国, 谷建法, 叶文华, 王占山, 刘慎业, 江少恩, 张保汉, 张维岩 2015 强激光与粒子束 **27** 032013]
- [12] 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]
- [13] Wang C, Zheng W D, Fang Z H, Sun J R, Wang W, Xiong J, Fu S Z, Gu Y, Wang S J, Qiao X M, Zhang G P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4767 (in Chinese) [王琛, 郑无敌, 方智恒, 孙今人, 王伟, 熊俊, 傅思祖, 顾援, 王世绩, 乔秀梅, 张国平 2010 物理学报 **59** 4767]
- [14] Wang C, An H H, Wang W, Fang Z H, Jia G, Meng X F, Sun J R, Liu Z K, Fu S J, Qiao X M, Zheng W D, Wang S J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 125210 (in Chinese) [王琛, 安红海, 王伟, 方智恒, 贾果, 孟祥富, 孙今人, 刘正坤, 付绍军, 乔秀梅, 郑无敌, 王世绩 2014 物理学报 **63** 125210]
- [15] Wang Z S, Wu Y G, Tang W X, Qin S J, Zhou B, Chen L Y 2002 *High Power Laser and Particle Beams* **14** 385 (in Chinese) [王占山, 吴永刚, 唐伟星, 秦树基, 周斌, 陈玲燕 2002 强激光与粒子束 **14** 385]
- [16] DaSilva L B, Barbee T W, Cauble R, Celliers P, Ciarrlo D, Libby S, London R A, Matthews D, Mrowka S, Moreno J C, Ressler D, Trebes J E, Wan A S, Weber F 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3991
- [17] Trebes J E, Brown S B, Campbell E M, Matthews D, Nilson D G, Stone G F, Whelan D A 1987 *Science* **238** 517
- [18] 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
- [19] Born M, Wolf E (translated by Yang J S) 2009 *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light* (7th Ed.) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p382 (in Chinese) [波恩, 沃尔夫 著 (杨葭荪 译) 2009 光学原理: 光的传播、干涉和衍射的电磁理论 (第七版)(北京: 电子工业出版社) 第 382 页]

Spatial resolution study of soft X-ray laser backlight shadow imaging technique*

Wang Chen[†] An Hong-Hai Fang Zhi-Heng Xiong Jun Wang Wei Sun Jin-Ren

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

(Received 17 May 2017; revised manuscript received 2 October 2017)

Abstract

The soft X-ray laser shadow imaging technique is a good tool for diagnosing shadow profiles near the critical surface of high-temperature dense plasma. The short-pulse plasma X-ray laser, driven by high-power laser, is used as the backlight, which spreads freely approximately 500 mm far, passes through the plasma to be diagnosed, and changes its optical path by using a multi-layer spherical lens and multi-layer plane mirror, is attenuated by filters, and is recorded by a soft X-ray charge-coupled device (CCD). The plasma to be diagnosed can be driven by one or multiple laser beams, according to the needs of the physical research being conducted, and is imaged onto the CCD surface through a multilayer spherical lens. The shadow profile image of the plasma to be diagnosed at a particular time is obtained by using the instantaneous photographic mode of short-pulse soft X-ray laser backlight imaging. Compared with the traditional keV hard X-ray backlight technique, the soft X-ray laser shadow imaging technique has two distinct advantages. One is the appropriate wavelength of the probe light, which makes it possible to diagnose plasma near the critical surface, and the other is a better spatial resolution because of the use of mature multilayer optical elements for near-normal incidence imaging. However, there has been no systematic study on the extent to which the spatial resolution of the imaging technology can be achieved. In this study, a careful analysis is carried out considering three aspects: the optical path geometry, the diffraction limit, and the imaging aberration. The results show that a spatial resolution of approximately 2 μm can be achieved. An experiment is carried out to measure the Rayleigh-Taylor instability of plasma from the lateral direction, by using the soft X-ray laser shadow imaging technique. Some microfluids with a width of several microns can be clearly distinguished in the experimental shadow image, indicating that the diagnostic technique has a good spatial resolution. Further analysis reveals that the main factor that limits the spatial resolution is the optical path geometry. It is possible to achieve a spatial resolution of up to 1 μm by increasing the magnification, selecting CCDs with smaller receiving units, etc.

Keywords: plasma diagnosis, spatial resolution, soft X-ray laser

PACS: 52.70.-m, 52.70.La, 42.55.Vc

DOI: [10.7498/aps.67.20171124](https://doi.org/10.7498/aps.67.20171124)

* Project supported by the Science Challenge Project, China (Grant No. TZ2016005) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11075146, 61475146).

[†] Corresponding author. E-mail: wangch@mail.shnc.ac.cn