

X 光焦斑测量方法研究*

成金秀 温天舒 杨存榜

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 高温高密度等离子体实验室, 成都 610003)

摘 要 采用组合型诊断技术获取 X 光辐射时间、空间、能谱相互关联的 3 维信息, 得到了 X 光焦斑随时间和随入射激光能量的变化关系, 并观测到膨胀等离子体、探测器阈值、测量能区以及测试方位对 X 光焦斑测量带来的影响。

关键词 X 光焦斑, 组合诊断, 方法研究。

1 引 言

靶面功率密度是激光等离子体物理研究中的一个重要参数, 而靶面功率密度的精度与激光焦斑的精确测量密切相关。目前, 由于激光焦斑的精确测量存在诸多困难, 国内外同行通常采用测量 X 光焦斑的方法监测激光焦斑尺寸^[1, 2], 采用这种方法, 其优点是测试方法简单, 数据直观, 缺点是测试精度与等离子体的膨胀特性、探测器的工作条件选择关系密切。由于等离子体的膨胀喷射, X 射线辐射区域明显大于激光焦斑尺寸, 当探测器的阈值一定时, 所记录的 X 射线辐射区域随入射激光能量的变化而变化。改变探测器的测量能区, X 射线的辐射区域将随能区的改变而改变。根据激光与物质相互作用特性, 本项目采用了时间、空间组合, 空间、能谱组合以及时间、空间、能谱组合等多种诊断技术测量激光等离子体 X 光辐射时空分辨图像, 观测等离子体运动对焦斑测量造成的影响; 在固定探测器阈值的情况下测量 X 光焦斑随入射激光能量的变化, 了解探测器阈值和激光能量间的关系; 还将诊断设备分别置于靶的法向和切向位置, 了解测量几何方位不同对 X 光焦斑测量造成的影响。

2 实验原理和方法

实验分别采用微通道板(MCP)选通 X 射线皮秒分幅相机获取 X 光辐射时空分辨图像, 用 4 针孔透射光栅阵列与分幅相机组合获取 X 光辐射时间、空间、能谱相互关联的三维信息, 并用针孔相机获取时间积分的 X 光辐射空间图像。微通道极选通 X 射线皮秒分幅相机测量原理见图 1。该相机以高压电脉冲为微通道板快门, 微通道板面板上的 Au 微带为微通道板电极, 同时又为选通管光阴极, 12 个针孔所成的 12 分幅像分别投影到 4 条微带的不同位置上, 并由 4 路选通脉冲分别选通, 实现时空分辨测量^[3]。光栅阵列与分幅相机组合是一全新

* 中国工程物理研究院国防科技预研基金资助。

收稿日期: 1997-04-05; 收到修改稿日期: 1997-09-22

的诊断技术^[4], 可同时提供 60 ps 的时间分辨、0.3 nm 光谱分辨和 60 μm 的空间分辨。光栅的色散方向投影到微带的长度方向上, 微带的宽度方向是光栅的空间分辨方向, 当选通脉冲加到微带上并沿微带传输, 可获得不同时刻 X 光辐射光谱结构, 实现激光等离子体时间、空间、能谱 3 维联合测量。

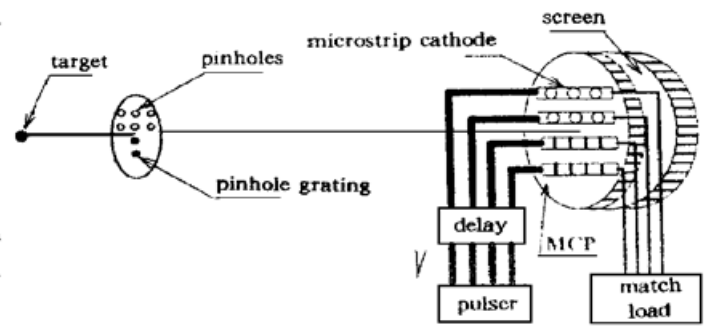


Fig. 1 Schematic diagram of the picosecond gated MCP framing camera

3 实验条件和相机布局

实验在“星光”激光装置上进行, 用微通道板选通 X 射线皮秒分幅相机进行时空分辨测量, 入射激光波长 1.053 μm , 入射激光能量 0.7~93.4 J, 脉宽 600~800 ps, 靶室真空度 6×10^{-3} Pa, 激光分别以 10° 和 45° 入射到大面积 Au 平面靶上, 靶厚度为 25 μm 。

3 维成像测量采用 3ω 激光打靶, 入射光能量 46 J, 脉宽 700 ps, 靶室真空度 7×10^{-3} Pa, 实验采用 Au 双盘靶, 大盘直径为 600 μm , 小盘直径为 300 μm , 两盘间距为 500 μm 。

相机在靶室中的布局如图 2 所示, 微通道板分幅相机(XFC)和 3 维成像系统(TGXFC)被安置在与入射激光呈 45° 的 $\phi 200$ mm 的水平法兰孔上, XFC 时间分辨为 60 ps, 空间分辨小于 20 μm , 放大倍数为 10, 针孔阵列 4×3 , 各微带延迟电缆长度分别为 0.430 m、0.552 m、0.641 m、0.738 m, 测量时间范围为 1650 ps。TGXFC 时间分辨为 60 ps, 空间分辨为 68 μm , 光谱分辨 0.3 nm, 光栅阵列 4×1 , 测量光谱范围 0.6~16.0 nm, 测量时间范围为 832 ps。

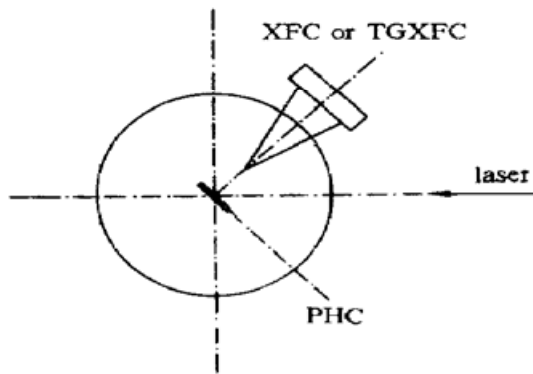


Fig. 2 The schematic diagram of experimental setup

X 射线针孔相机(PHC)获取时间积分的 X 光辐射空间图像, 针孔直径 13 μm , 空间分辨~15 μm , Al 挡光膜厚度为 1 μm , 用天津一型 X 光底片记录, 其测量能区大于 800 eV, 相机置于靶室内, 水平放置, 与入射激光束夹角为 45° , 放大倍数为 9.7。

4 实验结果

图 3 是用分幅相机获得的靶面切向[图 3(a)]和法向[图 3(b)]X 光辐射 12 幅时空分辨像, 各微带间的时间间隔分别为 $t_{1-2} = 610$ ps, $t_{2-3} = 440$ ps, $t_{3-4} = 490$ ps, 同一微带相邻两幅像间的时间间隔为 50 ps。从图中的两张照片可见, 无论是切向或是法向, 第 7 幅和第 11 幅像的空间尺度都明显小于相邻画幅的空间尺度, 其 X 光强度也较弱, 这是由于该两幅像所对应的成像针孔直径比其它针孔直径小 70%~100%。针孔直径小, 使到达探测器上的光照度随之减少, 受探测器阈值的限制, 测量的 X 光焦斑尺寸也明显比其它针孔(相邻针孔)的小, 因此, 针孔阵列加工的非一致性对测量结果会造成较大的影响。定义 X 光强度空间分布曲线的半高全宽(FWHM)为 X 光焦斑尺寸, 将图 3 中的各幅像用 3CS 黑密度计进行黑密度扫描, 便得到以下实验结果。



Fig. 3 Twelve-frame images of laser-produced plasma on the gold planar target

4.1 X 光焦斑随时间的变化

图4是X光焦斑随时间的变化关系，“6”对应的入射激光能量为27.8J，是分幅相机在靶切向获得的实验结果。“6”对应的入射激光能量是23.4 J，是分幅相机在靶法向获得的实验结果。由于图3中的第7幅和第11幅像因针孔直径不同造成的差异，其数据点未归纳在曲线中。

从图4可见，在激光加源初期(测量时间 $t \leq 150$ ps) X光辐射焦斑尺寸较小，其值小于 $80 \mu\text{m}$ 。随着时间的增加，X光焦斑逐渐增大，在激光加源时间快结束时(激光加源时间为600~800 ps)在切线上观测到的X光焦斑小于 $200 \mu\text{m}$ ，法线上观测到的X光焦斑小于 $230 \mu\text{m}$ 。产生这一现象的原因主要是膨胀等离子体的影响，在激光加源期间，激光与等离子体不断相互作用，等离子体不断向低密度区域膨胀喷射，其膨胀速度达 $3 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 。等离子体的膨胀喷射，使X射线的辐射区域随着时间的增加而快速增大，在激光加源时间结束后，等离子体开始逐渐冷却，快离子获得的动能也逐渐减少，等离子体运动对X光发射区域的影响也逐渐减弱，因此在1 ns以后X光焦斑随时间的变化趋势较在激光加源期缓慢。另外从图4中的两条曲线可见，在法向观测到的X光焦斑分布比在切线上观测到的结果偏大，其原因是等离子体喷射方向的法向较强，切向较弱，这种现象在用时间积分的针孔图像中也曾多次观测到^[5]。

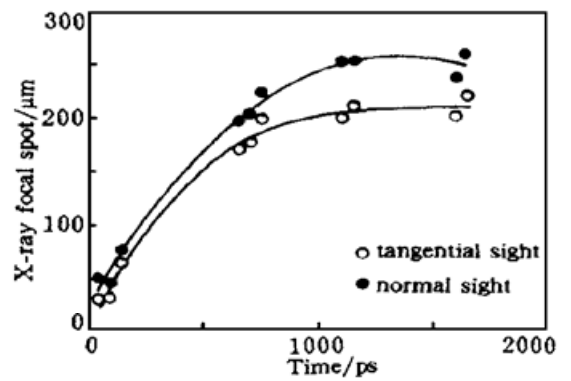


Fig. 4 X-ray focal spot vs time

4.2 X 光焦斑随入射激光能量的变化

图5是X光焦斑随入射激光能量的变化关系。入射激光能量为0.7~93.4 J。图中的数据点是在固定探测器工作条件和胶片冲洗条件下，通过改变入射激光能量获得的实验结果。710 ps对应于12幅像中的第5幅，1100 ps对应于12幅像中的第8幅，该两幅像对应的针孔直径基本相同。从图中可见，当入射激光能量处于低能区($\leq 12 \text{ J}$)时，X光辐射的焦斑尺寸随入射激光能量的增大而迅速增大，当激光能量大于12 J时，X光焦斑随入射激光能量的增加而稍有增大，其变化趋势较缓，产生这一现象的原因主要是由测试探测器的测量阈值引起。入射激光能量低，意味着靶面功

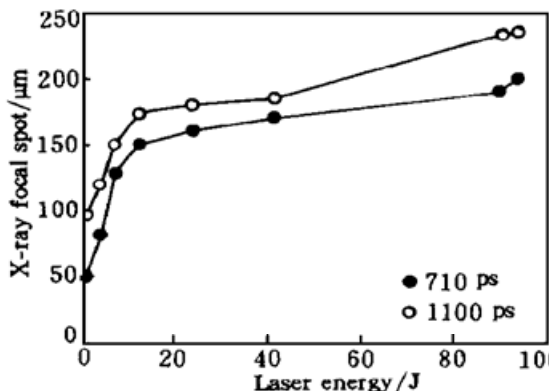


Fig. 5 X-ray focal spot vs laser energy

率密度低,其产生的 X 射线辐射强度弱,当探测器阈值一定时,测得的 X 光焦斑尺寸必然偏小。

4.3 X 光焦斑随探测器能区的变化

图 6(a) 是利用时间积分的三针孔相机获得的不同能区 X 光辐射空间图像,入射激光能量 13 J,相机与靶法线夹角为 15° 。图 6(b) 是单针孔相机获得的实验结果,相机与靶法线夹角约为 40° ,测试能区大于 0.8 keV。

从图中可见,在低能区 ($E_x \geq 0.5$ keV),X 光焦斑尺寸达 $200 \mu\text{m}$,当 $E_x \geq 2.0$ keV 时,焦斑为 $139 \mu\text{m}$,当 $E_x \geq 4.0$ keV 时,焦斑为 $130 \mu\text{m}$ 。由此表明,不同的测量能区其 X 光焦斑尺寸是不同的,在低能区,膨胀等离子体对焦斑的测量影响较大,而在较高能区则影响较小。



Fig. 6 X-ray focal spot distribution on time integral

另外,还用针孔透射光栅阵列和分幅相机组合获得双盘靶 X 光辐射时间、空间、能谱互相关联的 3 维信息,典型结果如图 7 所示。

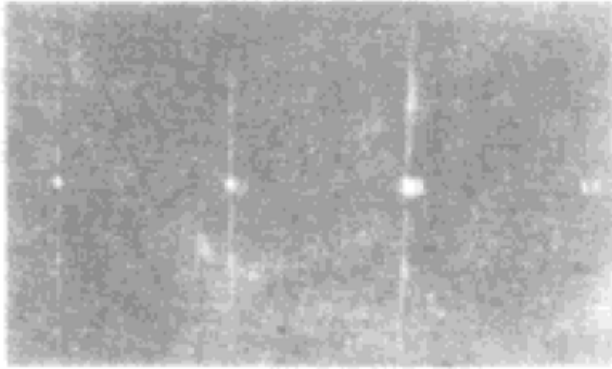


Fig. 7 Three-dimensional distribution X-ray radiative on the gold double-disk targets

图像中心最强部分是光谱零级像,光谱零级反映了等离子体软 X 光发射(各波长的总效应)的空间分布,在激光加源时间快结束时(激光脉宽 698 ps)零级像的空间尺度为 $220 \mu\text{m}$ 。靠零级最近的两个对称分布的带为 X 光辐射 N 带,N 带峰值波长为 1.7 ± 0.2 nm,其对应的空间尺度为 $120 \mu\text{m}$ 。远离零级而对称分布的另外两个带为 X 光辐射 O 带,O 带峰值波长为 4.3 ± 0.1 nm,其对应的空间尺度为 $192 \mu\text{m}$ 。因此在测量 X 光焦斑时,能区选择十分重要,测量能区不同,其测量结果也不同。

5 讨 论

在直接测量激光焦斑出现困难的情况下,通过测量 X 光焦斑监视激光焦斑是目前常采用的测量方法。激光焦斑和 X 光焦斑间有一定的对应关系,但要知道两者间的确切对应关系还需要进行许多细致的实验工作和一定的理论计算。本项目利用时空能组合型诊断技术测量 X 光焦斑时空分布,其目的是寻求精确测量 X 光焦斑的实验方法和技术,研究激光与等离子体相互作用的物理过程对测量结果造成的影响。通过实验,得到以下结论:

1) 等离子体运动影响

等离子体膨胀是影响 X 光焦斑测量的主要因素,在激光加热等离子体过程中,激光首先通过逆韧致和集体相互作用过程,将电子加热到高温,对 $1.053 \mu\text{m}$ 的激光,强度大于 10^{14}

W/cm^2 时,在低密度等离子体中将激发多种电子等离子体波,并产生大量的超热电子,这些超热电子迅速飞散,并产生很强的膨胀鞘势,膨胀的鞘势将加速离子向真空膨胀。因此,在激光加源期,激光与等离子体不断相互作用,等离子体不断向低密度区膨胀,使测得的 X 光发射区域随激光加源时间的增加迅速增大。实验结果表明,测量时间小于 150 ps 时(该时间未同打靶时间关联)等离子体膨胀对 X 光焦斑测量造成的影响较小,在该时间范围内, X 光焦斑小于 80 μm ,该值和激光器光路设计指标基本一致。

2) 测量阈值的影响

小激光能量注入时,由于靶面功率密度低(在激光焦斑一定的情况下),产生的等离子体温度低, X 光辐射强度弱,当探测器阈值一定时, X 光焦斑尺寸随入射激光的增加而增大,直到超过探测器的阈值为止。为减少探测器阈值对测量造成的影响, X 光焦斑测量应在一定的激光能量范围内,使 X 光辐射强度满足探测器的线性工作区。

3) 测量能区选择

X 光焦斑随探测能区的变化而变化,因此选择探测能区十分重要。通常等离子体喷射前沿温度较低,辐射的 X 光能区较软,加适当厚度的滤片,可减少膨胀等离子体辐射造成的影响,通常将能区选择在 $E_x > 1 \text{ keV}$ 的能量范围。

4) 测量方位选择

靶面等离子体喷射方向法线最强,切线最弱,因此在靶切线方向测量 X 光焦斑尺寸,在靶法向方向测量 X 光在靶面的强度分布是常用的实验布局。

参 考 文 献

- [1] Deselberger M, Willi O. Measurement and analysis of Rayleigh-Taylor instability in targets driven by incoherent laser radiation. *Phys. Fluids (B)*, 1993, **5**(3) : 896~ 909
- [2] Nishimura H, Takabe H, Kondo K *et al.*. X-ray emission and transport in gold plasmas generated by 351-nm laser irradiation. *Phys. Rev. (A)*, 1991, **43**(6) : 3073~ 3085
- [3] Cheng Jinxiu, Yang Cunbang, Wen Tianshu. Twelve-frame camera for soft X-ray. *Chinese Science Bulletin*, 1997, **42**(14) : 1215~ 1217
- [4] 成金秀,温天舒,杨存榜等. 激光等离子体时、空、能三维分辨测试系统. 中国科学 A 辑, 1998, **18**(1) : 85~ 89
- [5] 成金秀,温天舒,朱宗元. 激光等离子体喷射空间特性实验观测. 光学学报, 1997, **17**(10) : 1327~ 1331

X-Ray Focus Spot Measurement

Cheng Jinxiu Wen Tianshu Yang Cunbang

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610003)

(Received 5 April 1997; revised 22 September 1997)

Abstract The principle and method of measuring X-ray focus spot are presented. Combination-type diagnostic technique is used to obtain the three-dimensional information about X-ray radiation spot varying with time, space and energy spectra. The relations of radiation spots with time and incident laser energy are obtained. The effects of expanding plasma, detection threshold, measurement energy region as well as the measurement position on the X-ray focus spot measurement are observed.

Key words X-ray focus spot, combination-type diagnostic, method investigation.