

文章编号: 1001-4322(2008)03-0387-04

斜辐照激光等离子体辐射 X 光子特性*

王瑞荣^{1,2}, 陈伟民¹, 谢东珠³

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044 ;
2. 上海激光等离子体研究所 高功率激光物理国家重点实验室, 上海 201800 ;
3. 上海师范大学 数理信息学院, 上海 200234)

摘 要: 在神光 II 高功率激光装置上, 实验研究了激光斜辐照形成的激光等离子体辐射 X 射线光子的特性及真空喷射热等离子体流的方向。采用针孔 X 射线相机测量了钽玻璃激光(基频 1.053 μm)辐照铝靶形成的激光铝等离子体辐射的 X 射线光子的空间分布, 并针对正入射和入射激光斜辐照情况下测得的 X 射线光子量及特性进行了分析和比较。结果发现: 入射激光斜辐照固体平面靶产生的向真空喷射热等离子体流的方向是垂直靶面(即法线方向); 正入射和斜入射激光叠加驱动靶时, 一定程度上能改善激光辐照的均匀性, 但等离子体源辐射的 X 射线光子数并未发现显著地增加; 当激光斜辐照与靶相互作用时, 激光能量被等离子体吸收下降。

关键词: 斜辐照; 等离子体喷射; 均匀性; X 射线光子

中图分类号: TL632 **文献标识码:** A

强激光与等离子体相互作用包含着丰富的物理过程并具有极其广泛的用途。激光可分多种方式与等离子体相互作用, 理论研究和实验已证实^[1]: 激光在等离子体中通过逆韧致吸收过程可以把大部分激光能量转换为等离子体热量, 剩余部分的激光能量不是通过逆韧致, 而是通过激光作为一种电磁波与等离子体中电子、离子无碰撞相互作用(或称集体相互作用), 转换成电子等离子体波和离子声波等。激光-靶耦合过程中在靶的表面形成向外膨胀的高温等离子体, 高温等离子体通过电子热传导和辐射热传导可以将能量传至高密度的区域, 激光等离子体中被热电子加热的一薄层烧蚀区是一个极强的 X 射线发射源^[2-4], 同时形成高压产生向激光方向喷射的热等离子体流, 从而通过动量守恒产生向靶内部传播的强冲击波, 可以进行高压状态方程的研究。激光烧蚀产生的冲击波压力^[5] $p = aI^\alpha \lambda^{-\beta}$, 其中 I 为激光吸收功率密度, λ 为入射激光波长, a 为与靶材料有关的常数, α, β 是大于 0 又小于 1 的常数(通常取 α 为 0.7, β 为 0.25)。要想增大冲击波压力, 必须提高驱动激光的功率密度。要提高激光功率密度, 就目前神光 II 装置来讲, 其固有属性是不可改变的, 采用多路激光叠加驱动是实现提高功率密度最有效的一种途径。因此, 在神光 II 装置上研究激光斜入射辐照靶等离子体辐射 X 射线光子特性具有重要的意义。

在等离子体中被电离的电子会通过韧致辐射发射 X 光(平衡发射)。如果靶材料是低 Z 的, 激光加热区的原子会完全电离, 韧致辐射是物质和辐射场能量交换的主要机制。如果靶材料是高 Z 的, 原子不可能完全电离, 在激光聚变条件下, 电离度一般为 20~50, 第一、二壳层通常不会电离, 第三壳层电离也不多, 此时发射 X 光的机制还有线发射和自由电子的复合发射, 而且线发射是主要的。G. D. Tsakiris^[6] 利用软 X 光扫描相机结合成像狭缝研究了柱形靶内等离子体的膨胀和碰撞过程。由于膨胀的烧蚀和被加热物质的反作用力会形成向内压缩的冲击波, 本实验采用针孔 X 射线相机观察激光斜辐照形成激光铝等离子体辐射 X 射线光子的情况, 观测其发光区辐射 X 射线光子的分布及对称性, 进一步来判断形成高压产生喷射的热等离子体流的方向。

1 实验方法及条件

本实验对激光采用点聚焦和列阵透镜聚焦两种驱动方式, 点聚焦辐照平面固体靶用来测定斜入射激光等离子体辐射 X 射线光子的分布及对称性, 以判断高压产生形成的喷射热等离子体流的方向。用列阵聚焦透镜聚焦激光辐照平面固体靶来观测高强度激光斜入射被等离子体吸收转化为等离子体热量的情况。采用针孔 X 射线相机探测激光等离子体辐射的 X 射线光子。

* 收稿日期: 2007-09-25; 修订日期: 2008-01-28

基金项目: 国家高技术发展计划项目

作者简介: 王瑞荣(1964—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事 X 射线的诊断及谱线研究; Wangrr59@citiz.net。

射线相机探测激光等离子体辐射的 X 射线光子。

实验中针孔 X 射线相机位置如图 1 所示。针孔直径为 $20\ \mu\text{m}$ ，针孔到发射源的距离为 $40\ \text{mm}$ ，针孔到底片距离为 $400\ \text{mm}$ ，放大倍数为 10，空间分辨率为 $22\ \mu\text{m}$ 。入射激光(波长为 $1.053\ \mu\text{m}$)辐照平面铝靶，点焦($\phi=23\ \text{nm}$)，能量控制在约为 $50\ \text{J}$ ，脉宽约为 $100\ \text{ps}$ ；列阵聚焦透镜焦斑($\phi=1\ \text{mm}$)，能量控制在约为 $600\ \text{J}$ ，脉宽约为 $100\ \text{ps}$ 。第 7 路激光沿垂直靶面(法线方向)入射，本文称为正入射。第 6 路激光相对靶面法线逆时针转 42° ，第 8 路驱动激光相对靶面法线顺时针转 42° 照射靶面，本文称为斜入射。测量中用的挡光截断膜为 $5.3\ \mu\text{m}$ 的铝(Al)膜，其透射率如图 2 所示。挡光膜使得光子能量在 keV 以下(即 $\lambda=1.24\ \text{nm}$ 以上)的 X 射线被截断。因此，探测器(底片)记录的信息主要来自激光吸收区临界面附近区域和电子热传导区自发辐射的高能 X 射线。

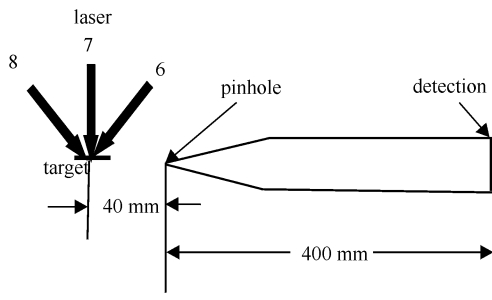


Fig. 1 Schematic of pinhole X-ray camera

图 1 实验布局示意图

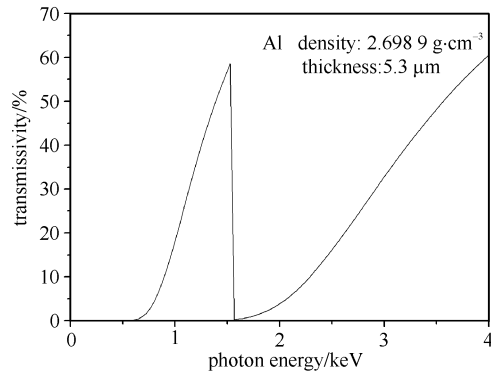


Fig. 2 Transmissivity of aluminum film

图 2 铝膜透射率

2 实验结果

针孔 X 射线相机在侧向测得激光铝等离子体辐射的 X 射线原始记录如图 3 所示，其中水平方向为靶面法线方向，竖直方向为靶面方向。图 3(a)是针孔 X 射线相机探测记录到的第 8 路激光点焦辐照形成的激光铝等离子体发光的图像，激光能量约为 $34\ \text{J}$ (与实验要求偏低)。图 3(b)是针孔 X 射线相机探测记录到的第 8 路激光和第 7 路激光两路点焦叠加辐照形成的激光铝等离子体辐射的 X 射线图像。图 3(c)是针孔 X 射线相机探测记录到的第 7 路激光经列阵透镜聚焦辐照形成的激光铝等离子体辐射的 X 射线图像，图 3(d)是针孔 X 射线相机探测记录到的第 8 路激光和第 7 路两路激光经列阵透镜聚焦叠加辐照形成的激光铝等离子体辐射的高能 X 射线图像。

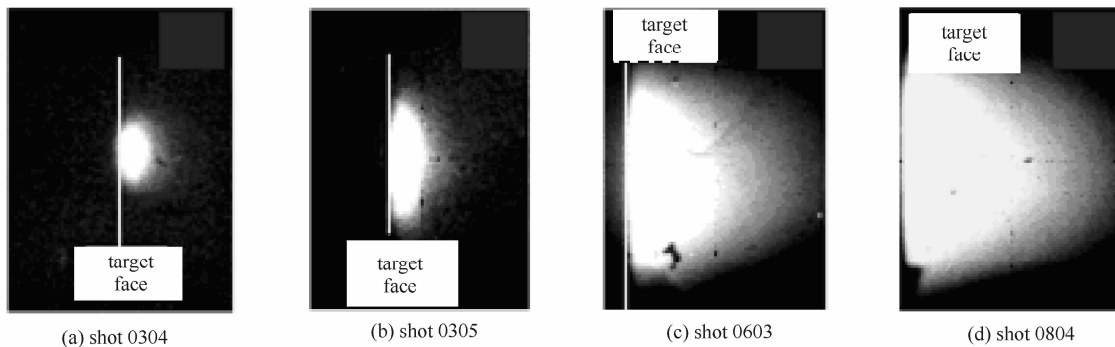


Fig. 3 Photograph of recorded X-ray photons with pinhole X-ray camera

图 3 针孔 X 射线相机探测记录的自发辐射图像

3 结果与讨论

对针孔 X 射线相机摄到的信号进行了处理，把图 3 中的结果沿垂直靶面法线方向积分取平均，在竖直方向建立 x 坐标系，并令靶点是坐标原点，得到针孔 X 射线相机测得的激光铝等离子体辐射的 X 射线相对光子强度(I_x)分布曲线，如图 4 所示。从图 4(a)和图 4(b)中看到，斜入射与正入射激光辐照形成的激光等离子体发射的高能 X 射线空间分布形态差别甚微，可忽略不计，X 射线又主要来自被加热的高密度等离子体的区域，

可判断斜入射时产生高压形成的喷射的热等离子体流是沿着靶面法线方向。同时对图 4(c)和图 4(d)积分得到的 X 射线光子量进行了比较,图 4(d)中等离子体发射的高能 X 射线的份额相对有所增加,表明斜入射激光能量被等离子体吸收,增加了热电子或热电子份额。通过多发处理、分析和比较喷射等离子体流辐射的 X 射线光子的空间分布及形态,正入射和斜入射激光叠加驱动靶时,能够增加些辐射压,同时被辐照的靶面均匀性也会得到改善,但未发现辐射 X 射线的光子数量有明显增加,激光斜入射激光能量被等离子体吸收小,大部分入射激光能量被等离子体反射和散射,同类实验也观察到此种现象^[7]。

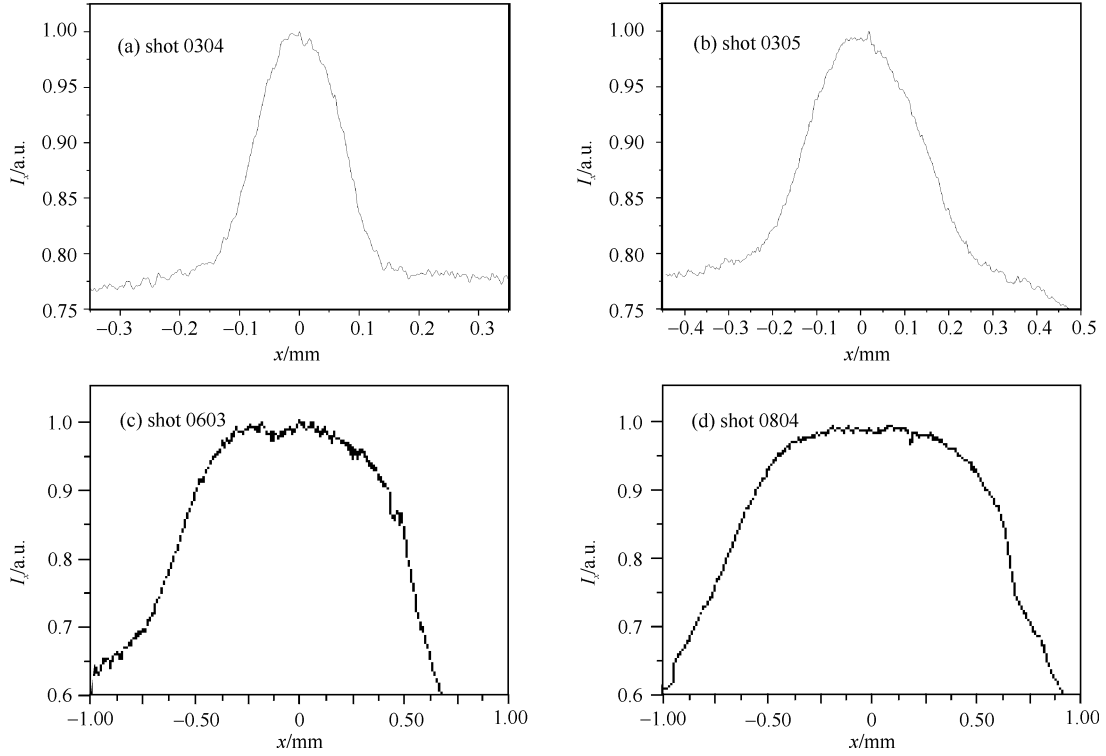


Fig. 4 Spatial distribution of X-ray photons

图 4 X 射线光子的空间分布

激光正入射时,由于激光在等离子体中传播需要满足色散关系,那么有 $\omega^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2$ (ω, ω_p, k, c 分别为激光频率、等离子体频率、激光波数和真空光速, $\omega_p^2 \approx 4\pi n_e e^2 / m_e$, 其中 n_e 为电子密度, m_e 为电子质量)。在等离子体中,激光只能在等于或小于电子临界密度的区域传播和吸收,对于正入射情况,激光在临界面反射,但斜入射情况有所不同。

对于斜入射情况,激光的色散关系可以写成 $\omega^2 = \omega_p^2 + (k_{\perp}^2 + k_{\parallel}^2) c^2$, 其中 k_{\parallel} 和 k_{\perp} 分别是波数在平行等离子体表面及垂直等离子体表面方向的投影。 k_{\perp} 与电子密度的依赖关系 $k_{\perp} = (\omega^2 - \omega_p^2 - k_{\parallel}^2 c^2)^{1/2} / c$, 注意到 $k_{\parallel}^2 = k^2 \sin^2 \theta$, 其中 θ 为靶面法线与斜入射激光间的夹角,所以 $k_{\perp} = 0$ 成立的条件为

$$\omega_p^2 = \omega^2 - k_{\parallel}^2 c^2 = \omega^2 - k^2 c^2 \sin^2 \theta \approx \omega^2 \cos^2 \theta \quad (1)$$

也即,激光在电子密度 $n_e = n_{ec} \cos^2 \theta$ 处就发生反射,其中 n_{ec} 为临界面处的电子密度。对于斜入射情况,激光不能到达临界密度面处,在电子密度 $n_e = n_{ec} \cos^2 \theta$ 处就要发生回转,激光未能到达高密度区,电子、离子碰撞频率降低,因而吸收下降,由于存在趋势效应,激光均可以传入临界面处,激发等离子体波,这些都可以用来很好地解释实验中针孔 X 射线相机测到的结果。但是激光辐照靶产生的等离子体由于膨胀存在大的密度梯度,激光斜入射在这种等离子体中其传播特性与激光的偏振方向(电场方向)关系很大。对于 P 偏振光,电场沿等离子体方向有分量,电子在这一电场作用下发生振荡,引起电荷分离,导致电子密度涨落。如果涨落的频率与电子等离子体频率接近,涨落与激光共振作用,在 $\epsilon = 1 - \omega_p^2 / \omega^2 = 0$ 点上共振激发电子等离子体波,因此斜入射激光共振吸收高。

4 结 论

在神光 II 激光装置上,采用针孔 X 射线相机测量了 $1.053 \mu\text{m}$ 激光正入射和斜入射辐照平面靶形成的激

光铝等离子体辐射的光子能量在 keV 以上(即 $\lambda=1.24$ nm 以下)的高能 X 射线,并对正入射和斜入射激光测得的 X 射线光子结果进行了比较和分析。结果发现入射激光斜辐照平面固体形成的激光等离子体向真空喷射热等离子体流的方向是垂直靶面(即法线方向),正入射和斜入射激光叠加驱动靶时,一定程度上能改善辐照的均匀性,但未发现激光等离子体辐射的 X 射线光子量明显地增加。激光斜辐照与靶的相互作用,与正入射激光情况比较,激光能量被等离子体吸收下降,激光转化成 X 射线光子的效率大大降低。

参考文献:

- [1] Shay H D, Haas R A, Kruer W L, et al. Interaction of $1.06 \mu\text{m}$ laser radiation with variable Z target[J]. *Phys Fluids*, 1978, **21**(9):1634-1652.
- [2] Mead W C, Stover E K, Kauffman R L, et al. Modeling measurements, and analysis of X-ray emission from $0.26 \mu\text{m}$ -laser-irradiated gold disks[J]. *Phys Rev A*, 1988, **38**(10):5275-5288.
- [3] Chen M, Sheng Z M, Zhang J. On the angular distribution of fast electrons generated in intense laser interaction with solid targets [J]. *Phys Plasmas*, 2006, **13**: 014504.
- [4] 温贤伦,洪伟,谷渝秋,等. 超强飞秒激光与固体靶产生的超热电子机制[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(8):1373-1376. (Wen X L, Hong W, Gu Y Q, et al. Mechanism studies on hot electron generation by ultra-intense femto-second laser interacting with solid target. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(8):1373-1376)
- [5] 常铁强,张均,张家泰,等. 激光等离子体相互作用与激光聚变[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社,1991. (Chang T Q, Zhang J, Zhang J T, et al. Laser plasma interaction and laser fusion. Changsha: Hunan Science and Technology Press,1991)
- [6] Tsakiris G D. Applications of a soft X-ray streak camera[C]//Physics of the Coronal Plasma in Laser-plasma Interaction. 1990.
- [7] 丁永坤,郑志坚,唐道源,等. $0.53 \mu\text{m}$ 激光等离子体相互作用实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1996, **8**(2):215-220. (Ding Y K, Zheng Z J, Tang D Y, et al. $0.53 \mu\text{m}$ laser plasma interaction. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, **8**(2):215-220)

Characteristics of X-ray photons in tilted incident laser-produced plasma

WANG Rui-rong^{1,2}, CHEN Wei-min¹, XIE Dong-zhu³

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Laser Plasma,
P. O. Box 800-229, Shanghai 201800, China;

3. Mathematics and Sciences College, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: Characteristics of X-ray and spout direction of heat plasma flow were studied on Shengguang-II laser facility. Using of pinhole X-ray camera, X-ray photons from the plasma of aluminum (Al) irradiated by $1.053 \mu\text{m}$ laser, was measured and analysed. It is observed that the spatial distribution of X-ray photons in Al plasma for tilted irradiation is symmetric at the center of the target. The spout direction of heat plasma flow is inferred by the distribution contour of X-ray photons. The experimental results show that the spout direction of heat plasma flow is normal to target plane and the output intensity of X-ray photons does not increase significantly for tilted laser incidence. Uniformity of laser energy deposition is improved by superposing tilted incident and laser perpendicularly incident laser. At the same time, it is found that the conversion efficiency from the tilted incident laser energy to X-ray photons of laser-produced plasma is decreased.

Key words: Tilted irradiation; Plasma spout; Uniformity; X-ray photons