第39卷 第5期 物 理 学 报 Vol. 39, No. 5
1990年5月 ACTA PHYSICA SINICA May, 1990

针孔透射光栅谱仪用于线聚焦激光等离子体研究

王晓方 陈时胜 徐至展 李跃林 钱爱娣
中国科学院上海光学精密机械研究所，上海，201800
1989年7月4日收到

利用针孔透射光栅光谱仪（PTGS）研究了波长为 1.06μm、平均功率密度为 2×10^{12} W/cm² 的线聚焦激光照射 Al 平板靶所产生的线状等离子体的轴向和非轴向X射线发射（5—200Å）的光谱和空间分布特性. 文中也就该条件下的线状等离子体作为X射线激光增益介质的有关问题进行了讨论.

PACC: 5250J; 3220R; 4255V

一、引 言

利用线状聚焦激光辐照靶以形成线状等离子体，是产生大纵横比的大尺度激光等离子体的一种有效方式，它已成为激光等离子体物理研究中的重要部分. 尤其在近年来X射线激光的研究中，线聚焦激光等离子体更加引起人们的重视. 它的各动力学参量的性质，如温度、密度分布和均匀性等直接决定了粒子数反转的产生、激光增益的大小以及X射线激光在等离子体中的传播等[1,2]. 已出现不少与X射线激光有关的理论或实验研究报道[2-4].

在我们以前进行的有关线聚焦激光等离子体研究中，着重研究了线状聚焦条件下激光同靶物质的相互作用，如观察到线聚焦激光在等离子体中的自聚焦成丝[5]、等离子体中的不稳定性所激发的各类喷流结构[6]以及离子发射的各向异性[7]等等，而对X射线的发射特性研究仍很少[8]. 但是，正如前面所提到的，X射线的发射特性与激光等离子体动力学行为密切相关，以及X射线辐射在激光等离子体能量输运中的重要地位[9]，因此，作为基本问题，对X射线波段辐射特性的仔细了解十分必要. 本文报道利用自制的带有针孔的透射式光栅光谱仪(PTGS)[10]对较大线聚焦尺度下激光照射 Al 平板靶所产生的等离子体的诊断结果，从时间积分上研究了 5—200Å 范围 Al 激光等离子体轴向和离轴X射线发射的光谱和空间特点. 并就这些特点讨论了这种实验条件下的线聚焦激光等离子体作为X射线激光放大介质的可能性.

二、实 验 条 件

实验是在本所六路激光装置上进行的. 入射激光波长为 1.06μm，单路能量为 1—

10J，脉宽约为 250ps. 实验中将其中输出的偏振方向互相垂直的两路激光合并，正入射在 Al 平板靶上. 两路脉冲峰间隔约为 200ps. 利用一柱面镜和～$f/1.5$ 非球面透镜组合，使入射激光光束在靶面形成～长为 9mm、宽为 150μm（最大值一半处全宽度（FWHM））的焦线，靶面平均功率密度约为 2×10^{12}W/cm^2. 通过改变靶的宽度从而获得不同线聚焦长度的等离子体(柱)，以保证入射激光的功率密度不变. 受接收系统灵敏度限制，实验中采用多次打靶累积接收. 实验布局如图 1.

实验中所用的诊断仪器 PTGS 介绍见文献[10]. 它具有光谱分辨和与光谱色散方向垂直的一维空间分辨特点. 光谱仪有效摄谱范围为 5—200 Å，光谱分辨能力优于 4 Å，空间分辨可达 100μm. 谱仪沿线状等离子体柱的轴向或离轴 53° 接收，轴向、离轴观察方向与入射激光三者在同一平面内；其中谱仪轴向放置通过一基准线进行准直. 光谱结果采用 Kodak 101-01 胶片接收，并利用 Henke 等人的定标结果[11]进行数据处理.

除 PTGS 外，所使用的诊断设备还有掠入射光栅光谱仪，TlAp 晶体谱仪，针孔相机和法拉第筒等.

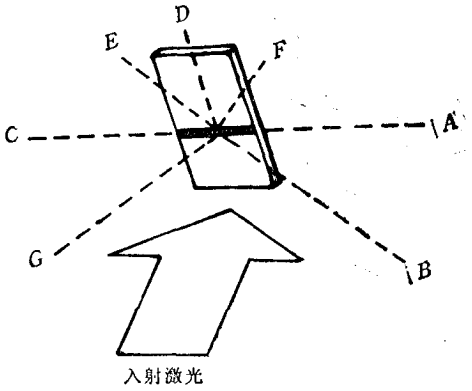


图 1　实验布局图

A 为沿轴向观察的 PTGS; *B* 为离轴 53° 观察的 PTGS; *C* 为掠入射光栅谱仪; *D*, *G* 为法拉第筒; *E* 为 TlAp 晶体谱仪; *F* 为针孔相机.

三、实验结果与讨论

1. X 射线发射光谱分析

图 2（见图版 I）给出两张用 PTGS 拍摄的离轴和沿轴向观察时 Al 的激光等离子体 X 射线发射谱照片. 图 3 给出离轴和沿轴向等离子体柱长度变化时 PTGS 所接收的光

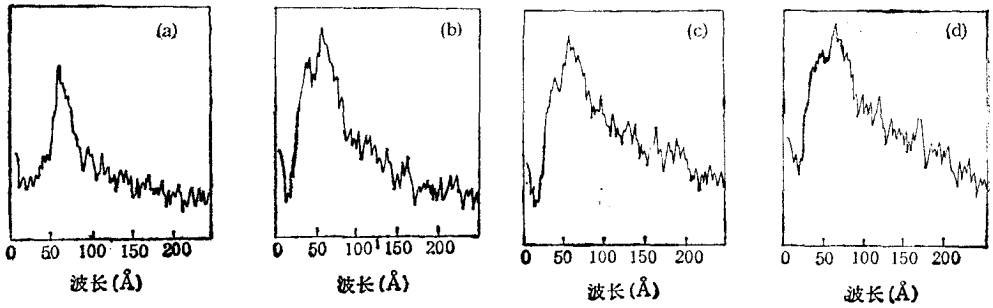


图 3　PTGS 获得的离轴和沿轴向观察接收的 Al 激光等离子体 X 射线发射谱的微密度计扫描径迹（a）为 53° 离轴，0902，激光能量为 117J；（b）为轴向，等离子体柱长为 2.7mm，0601，激光能量为 108J；（c）为轴向，等离子体柱长为 6.8mm，1001，激光能量为 115J；（d）为轴向，等离子体柱长为 7.3mm，0103，激光能量为 97J.

谱微密度计扫描径迹. 从图 3 中可发现离轴或沿轴向所接收光谱的共同点是: K带（如 Al^{11+} 的 $1S^2$—$1S2P$ 特征线)的发射几乎看不到,光谱集中在 30—77 Å 的L带. 这同以前进行的点聚焦或较短焦线（～2mm）线聚焦实验时观察到的 Al 等离子体较强的K带发射不同[12],是因为在现在的条件下靶面激光功率密度较低的缘故. 掠入射光栅谱仪(光谱分辨为 0.05 Å)的结果表明,L带辐射主要来自 Al^{10+} 和 Al^{9+} 的贡献. 其次从图 3 可见,最大强度的波长在 55 Å（Al^{10+},2p—3d;Al^{9+},2s2p—2s3d）处. 此外,从这些光谱中还可发现 PTGS 离轴观察时光谱主要集中在 55 Å 附近较小的范围（42—77 Å）; 沿轴向观察时光谱范围变大（30—77 Å），且在长波 158 Å 附近强度有所增强.

下面考察等离子体柱长度变化时轴向X射线发射的变化特点. 在数据处理中，只考虑光栅高级衍射中的二级效应,忽略更高级次的影响. 光谱强度由公式[11]

$$D = \alpha[1 - \exp(-b\beta I)] \tag{1}$$

给出. 式中D为胶片的净黑密度; $\alpha = 1.957$, $b = 0.313$; $\beta = 1.000$; 光强 I 的单位为"光子数/μm^2". 表 1 给出随轴向长度变化时三个波长的发射强度的变化情况. 从结果可见 158 Å 的光谱强度随线聚焦等离子体长度增加时增长最快，而 55 Å 处强度增长最慢. 根据线辐射光学深度和X射线发射空间区域变化可定性解释[13]如下: Al 平面靶等离子体自由膨胀冷却而产生复合,短波长X射线发射出现在密度比较高的区域,而长波发射出现在低温低密度区域.当等离子体柱长度增加时,由于低密度导致等离子体对 158 Å

表 1 等离子体柱长度变化时部分波长沿轴向的发射强度 (10^{-6} J/m²)

长度(mm) \ 波长(Å)	42	55	158
非轴向	5.69	15.7	0.48
2.7	38.7	41.2	1.49
7.3	50.5	51.7	5.25

(Al^{3+},$2p^53s$—$2p^6$) 附近吸收较小;对于较高密度区 42 Å 和 55 Å 发射,光学深度不同导致等离子体对它们的吸收不同，从而会产生发射上的差异. 这里要附带说明，PTGS 由于光谱分辨（～4 Å）限制,不能就某一线谱发射强度进行定量分析. 因此这里的结果仅是定性或半定量的，定量的结果需要更高分辨率的掠入射光栅谱仪或晶体谱仪的结果以给出.

等离子体的电子温度是描述等离子体性质的基本参量. 这里根据离轴观察的光谱(可作光性薄近似)特点，借助一简化的二能级模型来获得我们目前实验条件下等离子体的平均电子温度. 因为发射谱主要集中在 55 Å 附近的L带(如图 3(a)),可用 55 Å 辐射的上、下能级来简化等离子体的辐射能级. 如果假设 55 Å 的上能级粒子数布居主要由电子碰撞激发实现，可认为当电子碰撞激发到该能级的几率最大时导致 55 Å 的辐射最强. 由电子碰撞激发几率表达式[14]

$$X_{pq} = 1.6 \times 10^{-11}\langle\bar{g}\rangle f_{pq} x_{pq}^{-1}(kT_e)^{-\frac{1}{2}} \exp[-x_{pq}(kT_e)^{-1}] \tag{2}$$

求得 X_{pq} 取极大时 $kT_e = x_{pq}/2$. 式中 x_{pq} 为 p, q 能级间能量. 对于 55 Å, $x_{pq} =$ 225eV, 因此电子温度 $kT_e = 113$eV.

为检验这一结果正确与否,下面根据 LTE (局域热平衡) 模型来计算电子温度. 晶体谱仪的结果表明,等离子体中存在较丰富的类 He(Al^{11+}) 离子, 由于这类离子出现在冕区到烧蚀区密度比较高的区域, 可以认为它们处于热平衡状态. 在具体计算中以类H离子的结果来近似求解. 从文献[15]查得 Al^{11+} 的电离能 $x_i = 2085$eV. 取 $n_e = 10^{21}/cm^3$ (临界密度), 根据图 4 得到所对应的电子温度 $kT_e \approx 150$eV, 和简单二能级模型的结果接近, 显示出在我们的实验条件下这一简单模型用于等离子体电子温度估算的可行性.

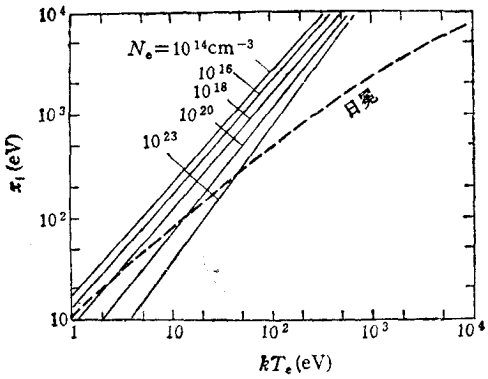
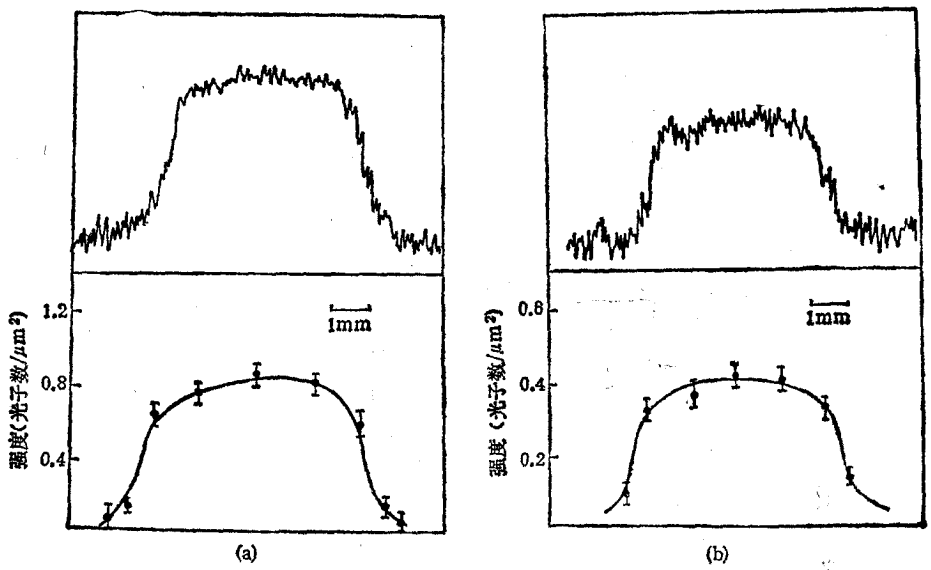


图 4　利用稳态 LTE 或日冕模型得到的不同电子密度下电离能 x_i 随电子温度 T_e 变化曲线. 取自文献 [16]

2. X 射线发射的空间特性

利用 PTGS 的一维空间分辨特点可了解线状等离子体的空间分布情况. 光谱的零级结果反映了等离子体 X 射线发射(各个波长的总效应)的空间分布, 而一级结果则反映了个别波长发射的空间分布特点. 图 5 是离轴观察线聚焦等离子体 (柱长为 6.7mm) X 射线发射光谱沿空间方向扫描径迹和对应的强度分布. 在计算强度分布时, 采用与 Pakula 类似的方法, 即针孔几何成象模型[17]. 从图 5 中可见, 55 Å 辐射的空间分布很均匀, 比零级结果好些. 这说明不同波长辐射的空间均匀性不同. 从图 5 中还可得到 55 Å 均匀发射区域(定义为 ±30% 强度起伏)的长度约为 5mm, 比实际等离子体长度 (6.7mm) 短. 对此可以认为线聚焦激光空间不均匀性是造成线状焦线, 从而线状激光等离子体空间分布不均匀性的主要原因. 在 X 射线激光实验中, 这种不均匀性将严重影响 X 射线沿线状等离子体轴向的传播[2], 以及线状等离子体长度的准确值获得. 因此, 在 X 射线激光实验中, 空间均匀的线聚焦激光照射是必要的.

图 6 是 PTGS 沿轴向观察得到的光谱零级和一级空间分布. 从这里可以了解等离子体柱 X 射线发射的横向分布. 零级结果表明等离子体逆着入射激光方向喷射得很远, 显示了低 Z 激光等离子体自由膨胀冷却的特点. 55 Å 的结果则表明高密度的空间区域较小. 等离子体轴向分布的这些特点, 在复合泵浦产生 X 射线放大机制中, 既有利于等离



(a) 零级结果 (b) 55Å 结果

图 5 PTGS 离轴 53° 观察时 X 射线发射沿轴向的微密度计扫描径迹(上)和相应的强度分布(下) 0902,激光能量为 117J.

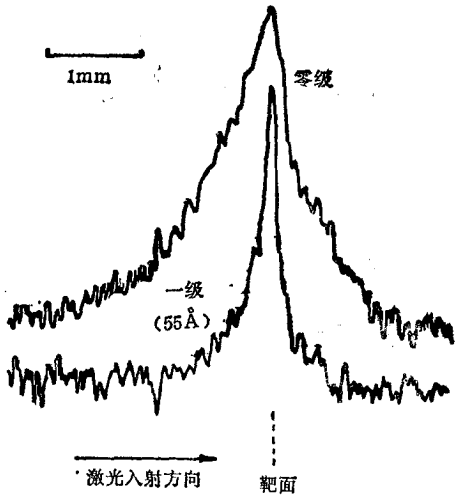


图 6 沿轴向观察时 PTGS 得到的 X 射线发射的空间分布 1001

子体快速冷却产生粒子数反转，同时也有利于 X 射线激光的下能级(如 Al^{10+}, 5f—3d 跃迁)粒子数沿等离子体柱横向辐射迅速排空[2]以提高反转粒子数.

感谢联邦德国 Max-Planck 光学学会生物物理化学研究所 F. P. Schäfer 教授提供的Kodak 101-01 胶片;对本所六路激光装置工作人员的协助深表谢意.

[1] P. Jagel *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **B4**(1987), 563.
[2] D. L .Matthews *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **B4**(1987), 575.
[3] D. Shvarts, B. Yaakobi, P. Audebert *et al.*, *Proceedings of SPIE*, **831**(1987), 283.
[4] D. Kim, C. H. Skinner, A. Wouters *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **B6**(1989), 115.
[5] Zhizhan Xu, P. H. Y. Lee *et al.*, *Opt. Comm.*, **61**(1987), 199.
[6] Zhizhan Xu, Zhiming Jiang *et al.*, *Opt. Comm.*, **69**(1988), 49; Zhizhan Zu *et al.*, *Phys. Rev.*, **A39**(1989), 808.
[7] 孙岚、徐至展等，光学学报，**8**(1988)，584.
[8] 徐至展、范品忠等，科学通报，**20**，(1986)，1551.
[9] D. Duston and J. Davis, *Phys. Rev.*, **A23**(1981), 2602; T. Mochizuki *et al.*, *Phys. Rev.*, **A33**(1986), 525; W. C. Mead *et al.*, *Phys. Fluids*, **26**(1983), 2361.
[10] T. Kishimoto, *MPQ Report*, **MPQ108**(1985); A. Pachtman, Zhizhan Xu *et al.*, in Proceedings of the Second Symposium on Plasma-Wave and Plasma-Matter Interactions, Association for Plasma Studies of China Report, No. APS-88-006(1988), D-1.
[11] B. L. Henke *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **B1**(1984), 818.
[12] 王晓方 A. Pachtman 等，物理学报，待发表.
[13] D. Duston and J. Davis, *Phys. Rev.*, **A23**(1981), 2602.
[14] 项志璘、俞昌旋，高温等离子体诊断技术，上册，上海科学技术出版社，上海(1982)，60页.
[15] R. L. Kelly and L. J. Palumbo, Navel Research Lab. Report, NRL-7599, Washington, (1973), viii.
[16] T. Kishimoto, *MPQ Report*, **MPQ108**(1985), 101.
[17] R. Pakula, *MPQ Report*, **MPQ95**(1985), 112.

LINE-FOCUSED LASER PRODUCED PLASMA STUDIES USING A PTGS

WANG XIAO-FANG　CHEN SHI-SHENG　XU ZHI-ZHAN
LI YUE-LING　QIAN AI-DI
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai, 201800

(Received 4 July 1989)

ABSTRACT

The spectral and spatial characteristics of X-ray emission (5—200Å) along or off the axis of the plasma column, produced by 1.06 μm laser beam irradiating luminum flat target in line focused configurations with an average power density 2×10^{12}W/cm^2, are studied by using a pinhole transmission grating spectrograph (PTGS). Problems for the plasma as an X-ray-laser gain medium are also discussed.

PACC: 5250J; 3220R; 4255V