

# 双盘靶 X 光辐射光谱时空特性\*

成金秀 杨存榜 温天舒 郑志坚 唐道源 温树槐 丁耀南 于艳宁

(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物理实验室, 成都 610003)

**摘 要** 在“星光-II”激光装置上, 利用三倍频激光辐照金双盘靶, 研究 X 光辐射光谱时空特性。将 4 针孔透射光栅阵列和皮秒分幅相机结合, 实现了 X 光辐射时间、空间、能谱三维联合测量, 得到了双盘靶初级和次级辐射光谱结构, 观测到 X 光辐射弛豫过程, 并得到  $N$  带  $O$  带和零级光谱强度随时间和空间的变化特征、等离子体喷射二维空间分布、等离子体膨胀速率等重要结果。

**关键词** 双盘靶, 激光烧蚀区, X 光辐射烧蚀区。

## 1 引 言

辐射输运在天文物理以及在惯性约束聚变(ICF)研究中起着重要的作用, 目前它已成为一个相当感兴趣的研究领域。当辐射传递满足局部热力学平衡(LTE)条件时, 输运作为通过材料的辐射流来研究, 并由辐射扩散近似描述。而在非局部热力学平衡条件下, 辐射扩散方程不再适用, 而需用更复杂的原子模型。为了从实验上观测辐射输运是否满足局部热力学平衡条件, 国际上的同行采用了各种途径研究 X 光在各种靶中的辐射特性(辐射的时间、空间、能谱和温度特性), 包括 X 光的再辐射过程<sup>[1~5]</sup>。

进行 X 光辐射输运研究, 首先需要在实验上精确测量激光烧蚀区和 X 光辐射烧蚀区辐射光谱随时间和空间的变化特征, 研究 X 光辐射弛豫过程。由于柱腔靶中等离子体的运动和状态十分复杂, 给精确测量柱腔壁中激光烧蚀区和 X 光辐射烧蚀区光谱的时空特性带来很多困难, 因此, 在星光激光装置上, 本文作者采用双盘靶进行 X 光辐射输运研究的分解实验, 测量激光烧蚀和 X 光烧蚀发射的光谱特性, 研究 X 光再辐射对谱的改造作用以及 X 光辐射弛豫过程。

研究 X 光辐射光谱特征和辐射弛豫过程通常采用 X 射线条纹相机加透射光栅来获取时间分辨辐射光谱, 但这种方法只能获得一维时间和一维光谱分辨而无空间分辨, 因此无法分辨激光烧蚀区和 X 光辐射烧蚀区辐射光谱特征。另外, 也可采用两台具有时间和光谱分辨的 X 射线二极管(XRD)阵列探测器测量激光烧蚀区和 X 光辐射烧蚀区辐射光谱强度, 这种测量方法除探测器的时间分辨和光谱分辨能力比较差之外, 还无法完全排除膨胀等离子体对测量造成的影响。为了能同时获取双盘靶 X 光辐射时间、空间、能谱相互关联的三维信息, 本

\* 国家自然科学基金、中国工程物理研究院科技预研基金资助课题。

收稿日期: 1997-02-19; 收到修改稿日期: 1997-07-28

文作者采用了全新的诊断技术, 将 4 针孔透射光栅阵列和 X 射线皮秒分幅相机<sup>[6, 7]</sup>组合, 在“星光-II”激光装置上, 利用三倍频激光辐照金双盘靶, 实现了 X 光辐射时间、空间、能谱三维联合测量, 得到了较好的实验结果。

## 2 实验原理和方法

实验是在“星光-II”激光装置上进行, 采用三倍频激光打靶, 入射激光能量为 46 J, 脉宽为 700 ps, 靶室真空度为  $7 \times 10^{-3}$  Pa, 实验采用金双盘靶, 大盘直径为 600  $\mu\text{m}$ , 小盘直径为 300  $\mu\text{m}$ , 两盘间距为 500  $\mu\text{m}$ , 用直径为 30  $\mu\text{m}$  的 Cu 丝将双盘固定。激光  $45^\circ$  入射到大盘上, 大盘上的 X 光辐射称为初级辐射, 而小盘上的 X 光辐射称为次级辐射。

三维测试系统是由 4 针孔透射光栅阵列和 X 射线皮秒分幅相机组合而成的高性能诊断设备, 系统结构和工作原理见图 1。

该系统可同时获取 X 光辐射时间、空间、能谱相互关联的三维信息, 具有 60 ps 的时间分辨, 68  $\mu\text{m}$  空间分辨和 0.3 nm 的光谱分辨。4 针孔透射光栅阵列由中国科技大学同步辐射实验室研制, 针孔直径  $\phi 46 \mu\text{m}$ , 光栅线密度为 1030 l/mm, 线空比约为 1:1, Au 线厚度为 0.5  $\mu\text{m}$ 。为提高针孔直径和光栅阵列的一致性, 针孔阵列采用光刻方法加工, 4 针孔直径的非一致性小于等于  $\pm 2\%$ , 采用同一块较大尺寸的透射光栅切割后分别安装在 4 个针孔上, 以确保光栅性能的一致性。

实验中将双盘靶置于靶室几何中心, 双盘靶的轴线与入射激光束呈  $45^\circ$  夹角, 两盘相互平行。三维测试系统被安置在与入射激光呈  $45^\circ$  的水平法兰上, 与靶法线垂直, 且瞄准两盘中心, 光栅距靶 505 mm, 距 MCP 分幅相机 1020 mm, 其放大倍数约为 2, 用来测量双盘靶初级和次级辐射光谱时空分辨图像, 实验布局 and 靶结构见图 2。

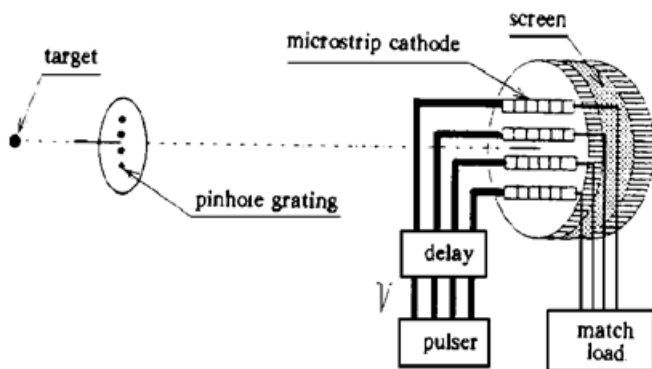


Fig. 1 Schematic diagram of three-dimension resolution setup for laser-produced plasma

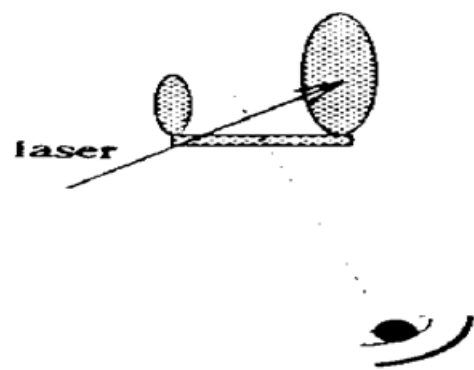


Fig. 2 Schematic diagram of experiment arrangement and target structure

三倍频激光经打靶透镜进入靶室, 并被聚焦到双盘靶的大盘上, 产生初级 X 光辐射。初级辐射的 X 光加热次级靶物质, 产生次级辐射。初级和次级辐射的 X 光经针孔光栅成像并色散到 MCP 分幅相机微带上, 微带的长度方向是光栅的色散方向, 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, 就可获得不同时刻 X 光辐射的空间能谱结构, 实现双盘靶时间、空间、能谱三维联合测量。

### 3 实验结果及分析

双盘靶初级和次级 X 光辐射光谱时空分辨像见图 3。图像中心最强部分是光谱零级像。光谱零级结果反映了等离子体软 X 光发射(各个波长总效应)的空间分布,

而零级两边最近的两个对称分布的带为 X 光辐射 *N* 带, 远离零级而对称分布的另外两个带为 X 光辐射 *O* 带。实验测得 *N* 带峰值波长为  $1.7 \pm 0.2$  nm; *O* 带峰值波长为  $4.3 \pm 0.1$  nm。照片的垂直方向既是光栅的色散方向, 又是选通脉冲的传播方向, 在 25 mm 长的微带上, 选通脉冲的传播时间为 132 ps。水平方向竖直的 4 条微带分别由不同长度的电缆延迟后的选通脉冲选通, 总的测量时间范围为 832 ps。各微带中左边的辐射光谱为初级辐射光谱, 右边的辐射光谱为次级辐射光谱。

#### 3.1 初级辐射光谱时间特性

将图 3 中各微带左边的辐射光谱沿垂直方向进行黑密度扫描, 得到初级辐射光谱的时间特性, 典型的结果见图 4。

从图 4 中可见, 初级辐射光谱带状结构明显, 表明激光直接加热区的 X 光辐射具有强烈的非平衡特征。随着时间的增加, *N* 带和 *O* 带辐射光谱强度逐渐增强, 到  $t = 550$  ps 附近, 达到峰值强度。此时, *N* 带峰值波长往长波方向移动 0.3 nm~ 0.4 nm, 而 *O* 带峰值波长往长波方向移动 0.1 nm~ 0.2 nm。随后辐射光谱强度快速下降, 到  $t = 700$  ps 时, *N* 带和 *O* 带辐射强度小于探测器的阈值灵敏度, 因此只观测到光谱零级像。

#### 3.2 初级、次级辐射光谱特性

当  $t < 335$  ps 时, 未观测到明显的次级辐射光谱。当  $t \geq 335$  ps 时, 开始出现次级辐射光谱, 但辐射强度很弱。当  $t \geq 550$  ps 时, 次级辐射光谱强度达到峰值。图 5 是  $t = 550$  ps 时初级和次级辐射光谱特征。

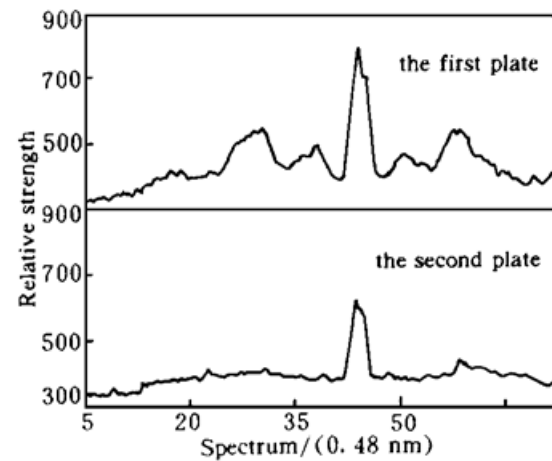


Fig. 5 Characteristics of x-ray spectrum on laser shotting region and X-ray radiation ablating region

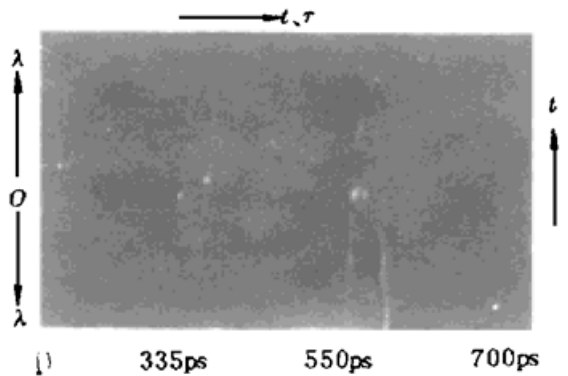


Fig. 3 Three-dimension distribution of x-ray radiation spectrum on the gold double-disk target

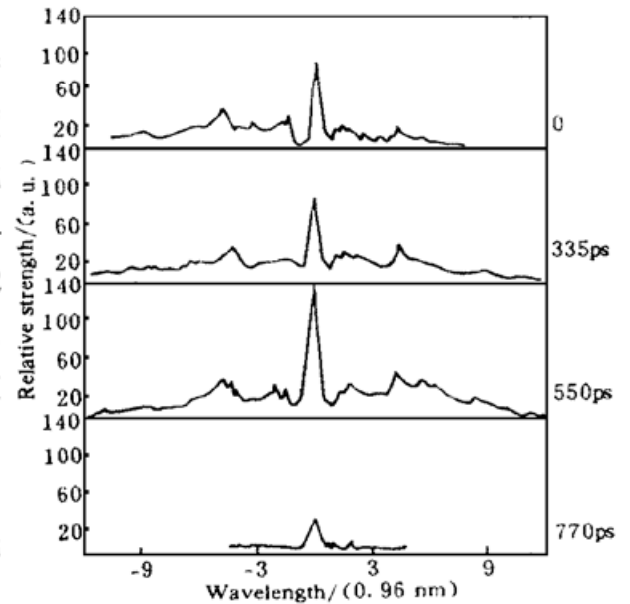


Fig. 4 Time characteristics of X-ray spectrum on laser shotting region

当  $t \geq 550$  ps 时, 次级辐射光谱强度达到峰值。图 5 是  $t = 550$  ps 时初级和次级辐射光谱特征。

从图中可见, 初级辐射光谱强度明显高于次级, 且带状结构十分明显, 反应出强烈的非平衡特性。次级光谱带状结构分布不明显, 而发射主要集中在  $> 3$  nm 的长波范围。这是因为在初级区, 激光能量在临界面附近被吸收形成高温低密度的冕区, 在该区域, 电离是远离平衡的, X 射线发射的主要机制是谱线发射。限于探测

器的有限光谱分辨, 只能观测到密集的线发射形成的特征带谱结构。在初级区辐射的 X 光通过次级靶物质的吸收和再发射过程, 辐射能量将转化为物质能量, 趋于热动平衡状态。次级辐射的 X 光将趋于与介质材料无关的温度辐射, 辐射的能谱分布趋于普朗克分布。

### 3.3 N 带光谱时空特征

图 6 是不同时刻 *N* 带 X 光辐射空间分布, 从图中可见, *N* 带 X 光辐射光谱的空间尺度随时间的增加而变宽, 但变宽的幅度很小。另外, *N* 带光谱只在初级辐射中观测到了, 而在次级辐射中未观测到该能区范围内的光谱出现, 表明在次级区, 辐射温度很低, 较高能量的辐射光谱很弱, 其辐射强度小于探测器的阈值灵敏度。

### 3.4 O 带光谱时空特征

图 7 是不同时刻 *O* 带 X 光辐射空间分布, 从图中可见, *O* 带辐射光谱主要集中在初级。当  $t \geq 387$  ps 时, 次级开始出现辐射光谱。次级辐射光谱强度很弱, 辐射的空间区域很窄。当时间  $t$  增加到 600 ps 附近时, 强度达到峰值, 但仍比初级弱得多。另外, *O* 带辐射的空间尺度也明显比 *N* 带宽, 而且随时间的增加, 其变宽的速率明显比 *N* 带大, 到  $t \geq 550$  ps 时, *O* 带辐射的空间尺度已达 200  $\mu\text{m}$ 。

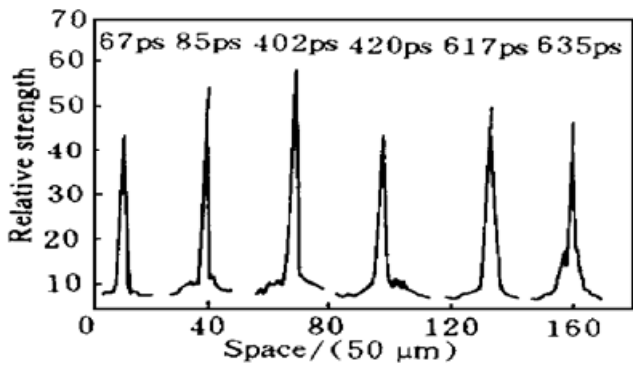


Fig. 6 Time-space distribution of *N* band spectrum

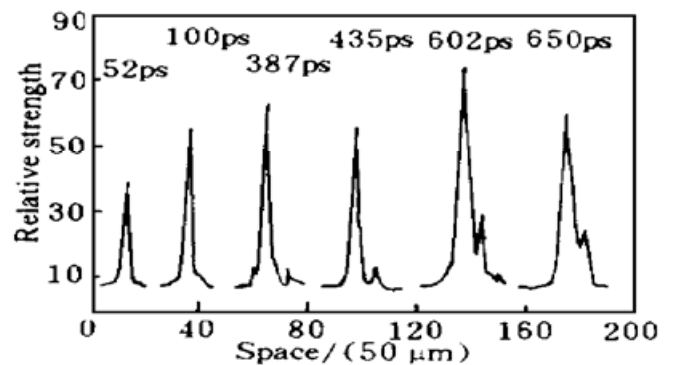


Fig. 7 Time-space distribution of *O* band spectrum

### 3.5 零级谱的时空特性

零级谱的时空特性见图 8。图中给出了 4 个不同时刻 X 光辐射空间尺度。左边的峰辐射强度较强, 为初级辐射空间分布, 右边的峰为次级辐射空间分布, 其两峰之间的间距为 475  $\mu\text{m}$ 。实验中观测到两峰间的间距随着时间的增加而缩小, 到  $t = 765$  ps 时, 两峰间的间距只有 400  $\mu\text{m}$ , 表明 X 光在辐射过程中其峰值的空间位置是会变化的, 变化的快慢与等离子体的运动和状态有关。另外, 当  $t = 65$  ps 时, 次级被加热, 并发射 X 光。随着时间的增加, 次级辐射增强, 在  $t = 615$  ps 附近, 初级和次级辐射强度达到峰值, 随后初级和次级辐射强度快速下降, 而初级下降的速度明显比次级快。

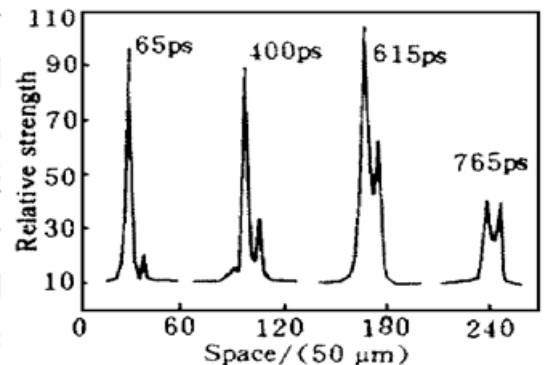


Fig. 8 Time-space distribution of 0th band spectrum

从图中还可观测到初级 X 光辐射空间尺度随时间的增加而明显变宽, 这主要是由等离子体的膨胀造成的。当  $t \geq 600$  ps 时, 已无法分辨初级和次级等离子体辐射空间区域。而这种等离子体喷射主要来自于初级。根据等离子体的喷射距离和时间, 得到等离子体的膨胀速度约为  $2.7 \times 10^7$  cm/s。

本工作得到江文勉、赖东显研究员的关心和支持,得到本研究所 210 研究室和 209 研究室人员的大力协作,在此一并致谢。

### 参 考 文 献

- [1] C. Stockl, G. D. Tsakiris, Experiments with laser-irradiated cylindrical targets. *Laser and Particle Beams*, 1991, **9**(3) : 725~ 747
- [2] G. D. Tsakiris, J. Massen, R. Sigel, Radiation confinement in X-ray-heated cavities. *Phys. Rev. (A)*, 1990, **42**(10) : 6188~ 6191
- [3] G. D. Tsakiris, Energy redistribution in cavities by thermal radiation. *Phys. Fluids (B)*, 1992, **4**(4) : 992~ 1005
- [4] H. Nishimura, H. Shiraga, Radiation-driven cannonball targets for high-convergence implosions. *Laser and Particle Beams*, 1993, **11**(1) : 89~ 96
- [5] Richard W. Lee, *Scientific Applications for High-Energy Lasers*, UCRL-4D-116335, 1994, 12~ 18
- [6] 成金秀, 杨存榜, 温天舒等, 软 X 射线 12 分幅相机研制进展. *科学通报*, 1997, **42**(6) : 658~ 660
- [7] Cheng Jinxiu, Wen Tianshu, Yang Cunbang, Pinhole transmission grating spectrometer of X-ray picosecond frame. *Science in China (Series A)*, 1998, **41**(5) : 546~ 550

## Investigation on X-Ray Spectra Characteristic for Double-Disk Target

Cheng Jinxin      Yang Chunbang      Wen Tianshu      Zheng Zhijian  
Tang Daoyuan      Wen Shuhuai      Ding Yaonan      Yu Yanning

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

(Received 19 February 1997; revised 28 July 1997)

**Abstract** The gold double-disk targets were irradiated by  $3\omega$  laser, and time-space properties of X-ray spectra were investigated at “Xingguang” laser facility. A four-pinhole transmission grating array and a picosecond frame camera were combined, and the three-dimensional measurement of X-ray time, space and energy spectra was conducted on the laser shooting region and X-ray radiation ablating region. The X-ray relaxation process and some important physics results such as the N band, O band and 0th spectra versus time and space as well as two-dimensional spatial distribution of plasma jet and plasma expansion speed were observed.

**Key words** double-disk target, laser shooting region, X-ray radiation ablating region.