

激光加热金双盘靶辐射与再辐射实验研究^{*}

江少恩 郑志坚 孙可煦 黄天暄 杨家敏 崔延莉 陈久森 郭 素 胡 昕 汤晓青

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2000 年 7 月 9 日收到 2000 年 10 月 28 日收到修改稿)

在‘星光 II’装置上,采用新型双盘靶研究 X 射线谱在次级得到改造的特性,并测量出初、次级等离子体碰撞的速度.这种双盘靶一定程度上避免了初级等离子体喷射的影响,可以提高烧蚀次级 X 射线的干净性.采用两台软 X 射线谱仪分别对初级和次级辐射的 X 射线进行测量,采用 X 射线条纹相机测量双盘靶等离子体喷射的时空扫描图象,并对实验结果进行简单的物理分析.

关键词:双盘靶, X 射线再辐射, 等离子体碰撞

PACC:5250J, 5255, 5270

1 引 言

在激光间接驱动惯性约束聚变(ICF)研究中,辐射场的特性研究是一个关键问题,激光加热腔靶辐射出的 X 射线再对腔壁进行加热,最终在腔内获得均匀的辐射场.在这种实验中,激光加热腔壁发出的 X 射线与 X 射线加热腔壁发出的 X 射线混在一起,无从分辨其性质,必须进行分解实验,特别是由于激光加热与 X 射线加热在理论上有很大的区别,激光加热过程中靶物质的电离是非平衡的,与它相关的辐射与物质相互作用是非平衡的,而 X 射线再加热腔壁可以看成是处于局域热动平衡状态(LTE),分解实验的结果对校验理论分析有重要的意义.为了明确 X 射线的产生机理和特性,将激光加热腔壁发出的 X 射线与 X 射线加热腔壁发出的 X 射线分开,采用双盘靶方案,用激光辐照初级盘模

拟腔靶的光斑区,再用初级盘发射的 X 射线辐照次级盘,通过探测次级盘的 X 辐射得到较纯粹的 X 射线加热结果.

对于谱改造过程的研究采用的靶型主要为双盘靶,这又有两种形式即 A 和 B 见图 1.前几年对 A 型双盘靶研究较多,通过初级辐射的 X 射线烧蚀次级使次级的谱得到改造,使其接近于 Planck 谱^[1].由于初级会产生的等离子体喷射,在初、次级之间距离较小时,初级的等离子体膨胀可能到达次级,使烧蚀次级的 X 射线不“干净”.为了减小初级等离子体的影响,采用的靶为 B 型双盘靶^[2],初级为 $0.17\mu\text{m}$ 厚度的金膜,激光以 45° 角前向入射,由后向出射的 X 射线烧蚀次级.但由于制靶的精度不够,金膜厚度不均匀、厚度不够或者膜与腔之间的粘接不密实,使金膜后向出现漏激光,影响初级 X 射线对次级的烧蚀,同样使烧蚀次级的 X 射线不“干净”,使次级谱不能得到很好地改造.

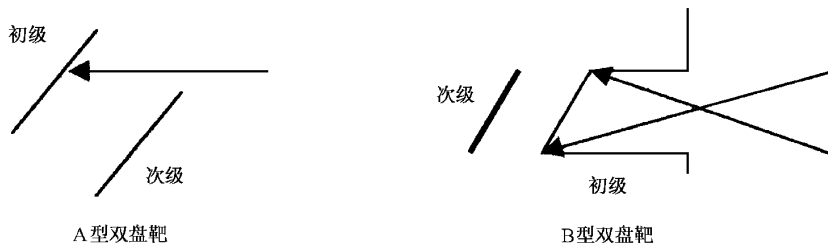


图 1 双盘靶示意图

^{*} 国家自然科学基金(批准号:19875045)资助的课题.

我们在 B 型双盘靶的基础上进行了改进,以便提高烧蚀次级 X 射线的“干净性”。

2 实验条件及靶型

实验在“星光 II”激光装置上进行,对双盘靶和双孔柱腔靶,打靶条件为:激光波长为 $0.35\mu\text{m}$,激光能量约为 90J ,脉冲宽度约 700ps . 靶室真空度约 $7\times 10^{-3}\text{Pa}$.

双盘靶采用的靶型是在 B 型双盘靶的基础上进行改进,见图 2. 次级与初级平行错开一个位置,这样即使有漏激光,也不会到达次级,对次级产生影响. 因此这种靶型既能避免初级等离子体膨胀的影响,也可避免漏激光对次级的影响,使烧蚀次级的 X 射线更加“干净”. 为了简单,称此靶为 C 型双盘靶. 初级和次级间的间距为 $800\mu\text{m}$.

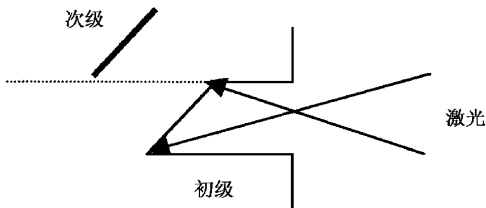


图 2 C 型双盘靶示意图

3 实验布局

实验仪器布局见图 3. 实验用两台软 X 射线能谱仪(Dante)分别监测初级、次级发射 X 射线谱时间特性. 两台透射光栅谱仪(TGS + XCCD)分别监测初级、次级发射 X 射线谱更细致的结构. 由于透射光栅谱仪在中国科学院高能物理研究所同步辐射源上进行了绝对标定,所以可以将 TGS 和 Dante 分别对初、次级盘的 X 射线谱进行比对,提高数据的可靠性. 一台软 X 射线分幅相机(XFC)及一台软 X 射线扫描相机(XSC)分别从两侧观测初级、次级发射 X 射线的时、空特性. 两组平响应 X 射线二极管(P - XRD)分别监测初级、次级发射 X 射线的角分布及其发射总量.

针孔相机(PHC)布置在与入射激光成 22.5° 夹角的方向上,用来监测激光注入情况.

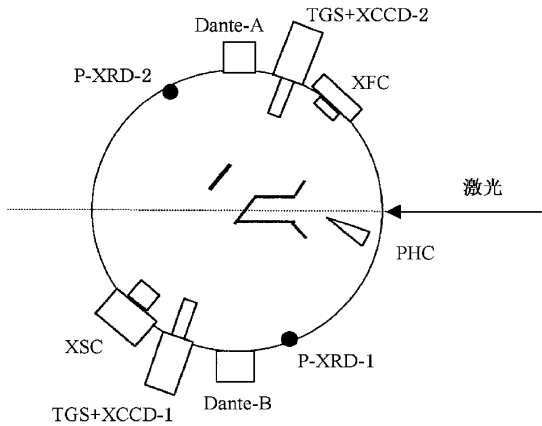


图 3 探测器布局示意图 Dante 为软 X 射线能谱仪;TGS + XCCD 为透射光栅谱仪配 X 射线 CCD;XSC 为 X 射线条纹相机;XFC 为分幅相机;XRD 为 X 射线二极管

4 实验结果与分析

对 C 型双盘靶(图 2),由十道 Dante 谱仪和七道 Dante 谱仪测量初级和次级而得到的软 X 射线谱见图 4,图 4 中实线为初级盘后向辐射的 X 射线谱,虚线为次级辐射的 X 射线谱. 由图 4 可见,初级盘 X 射线谱为非平衡谱,次级经过 X 射线的吸收和再辐射,X 射线谱更加软化,而且接近平衡谱.

假定双盘靶 X 射线辐射遵从朗伯定律即满足 $\cos\theta$ 分布,由下式求出辐射的 X 射线总量:

$$E_x = \frac{\pi}{\cos\theta} \int G(E) dE, \tag{1}$$

其中 E_x 为 X 射线总量, $G(E)$ 为软 X 射线谱, θ 为谱仪轴线与靶辐射面法线间的夹角. 由(1)式对图 4 中的曲线进行计算得到初级后向辐射的 X 射线为 14.8J ,次级盘再辐射的 X 射线为 1.9J .

我们对实验结果作简要的分析.

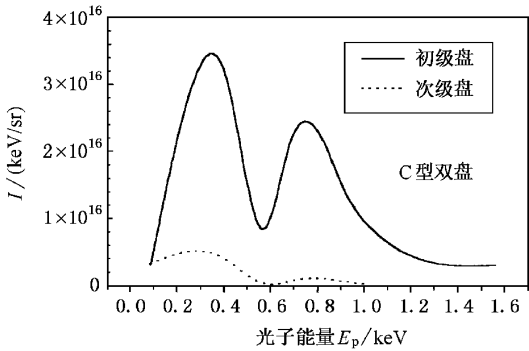


图 4 C 型双盘靶辐射的软 X 射线谱绝对强度值 I

4.1 初级盘辐射分析

激光辐照金箔时,首先发生激光烧蚀过程,同时由于高 Z 材料金具有高的激光-X射线转换效率,激光与等离子体相互作用产生的强 X 射线也会对金箔发生辐射烧蚀,从而形成典型的激光-X射线转换区、X射线再发射区和冲击波区三区结构^[3,4],其中激光-X射线转换区和 X 射线再发射区分别看作激光烧蚀区和辐射烧蚀区.因此,强激光与金箔靶相互作用,随着时间的推移将首先发生金箔的辐射烧穿,此后在金箔背侧将获得强的 X 射线辐射,随后在发生激光烧穿,通过金箔的激光能量将显著增加.为在金箔背侧获得干净、强度高的 X 射线辐射,金箔的厚度应为稍大于金箔的激光烧穿厚度. Babonneau 等^[5]给出了一个描述金箔靶最佳厚度的解析公式:

$$d = 26.2 (A/Z)^{1/2} T_0^{1/2} t / \rho_0 \lambda^2 [1 + 0.946 (A/Z)^{1/2}], \quad (2)$$

$$T_0 = 7 \times 10^6 I_{\text{abs}}^{2/3} \lambda^{4/3} / f^{2/3}, \quad (3)$$

其中 d 为最佳厚度 (cm); T_0 为临界面处的温度 (K); f 为限流因子; ρ_0 , A 和 Z 分别为金材料的初始密度 (cm^{-3})、原子质量数和原子序数; λ , t 和 I_{abs} 分别为激光波长 (μm)、脉宽 (s) 和吸收的激光功率密度 ($10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$).

利用‘星光 II’三倍频激光打靶的实验条件 [λ 为 $0.35 \mu\text{m}$; I_{abs} 为 $(0.5-1.5) \times 10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$; t 为 $600-900 \text{ps}$], 并取限流因子 f 为 0.3 , 预估金箔最佳厚度为 $0.06-0.14 \mu\text{m}$, 考虑到激光光束空间不均匀及制靶质量问题, 选取金箔靶的实际厚度应稍大于该估计值, 同时在其后衬一层 CH 材料, 以减弱透过激光及后侧喷射金等离子体的影响, 提高干净性. 实验中初级盘的金箔结构是由 $0.17 \mu\text{m}$ 厚度的金沉积在 $0.17 \mu\text{m}$ 的 CH 衬底上而制成的.

激光在临界密度面以下区域被吸收, 吸收率为

$$\eta_a = E_{\text{abs}} / E_1, \quad (4)$$

其中 E_{abs} 为被吸收的激光能量, E_1 为激光能量. 被吸收的能量一部分在转换层转换为 X 射线, 转换率为

$$\alpha_C = E_X / E_{\text{abs}}. \quad (5)$$

由于转换层是光性薄的, X 射线向前和向后两个方向辐射, 各占 $\alpha_C E_{\text{abs}} / 2$, 向后 (即向里) 的那部分 X 射线在再辐射区产生再辐射 X 射线, 再辐射率 (或称反照率) 为 r , 于是向前辐射的 X 射线量是转换层向外的 X 射线 $\alpha_C E_{\text{abs}} / 2$ 与再辐射 X 射线之和, 这就有

$$E_X^f = \frac{1}{2} \alpha_C (1 + r) E_{\text{abs}}. \quad (6)$$

在激光入射的早期阶段, 金箔的后面是冷的从而是光性厚的, 由前面来的 X 射线全部被吸收, 此时后向 X 射线辐射 E_X^r 为零. 随着激光的持续加热, 产生的 X 射线形成热波继续向后加热后面冷区, 当烧穿发生时, 后向辐射的 X 射线迅速增加, 于是可以探测到后向 X 射线. 由 (6) 式和下式 (忽略等离子体流体的能量, 并考虑能量守恒):

$$E_X^f + E_X^r = \alpha_C E_{\text{abs}}, \quad (7)$$

得到

$$E_X^r = \frac{1}{2} \alpha_C (1 - r) E_{\text{abs}}. \quad (8)$$

进一步利用 (4) 式得到

$$E_X^r = \frac{1}{2} \eta_a \alpha_C (1 - r) E_1. \quad (9)$$

在文献 [6] 中, 对‘星光 II’的三倍频激光打 45° 平面靶测量的激光吸收率为 $\eta_a = 75\%$. 由日本的 Nishimura 等^[7]三倍频激光打金箔靶的实验可知, 功率密度为 $3.5 \times 10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$, 此功率密度与我们打靶所用功率密度相近, 所以可以利用他们的测量结果. 他们测量的转换效率为 $\alpha_C = 74\%$, 反照率 $r = 0.46$ (此处的反照率 r 是针对薄靶而言的). 将 η_a , α_C 和 r 代入 (9) 式, 可以得到后向的 X 射线辐射为 13.5J . 这与我们所测得初级 X 射线是 14.8J 较为接近.

4.2 次级盘辐射分析

对次级盘, 仔细分析需要很多理论假设和十分复杂的计算, 为此, 我们作相当的简化和近似处理. 假设如下: 将初级盘上的 X 射线强度看成是均匀的, 次级盘对初级盘上的 X 射线区域每一点所张的立体角都近似相等, 于是可将此立体角由次级盘在初级盘的中心来表示, 即 $\Omega \approx \pi/2$, 这样初级盘后向 X 射线量到达次级盘的 X 射线为 $E_X' = \frac{\Omega}{2\pi} E_X^r =$

$\frac{1}{4} E_X^r = 3.7 \text{J}$. 由 X 射线加热辐照靶的再辐射率公式 $R = (1 + 13 T_{\text{eV}}^{-0.7} t_{\text{ns}}^{-0.38})^{-1}$ (见文献 [8]), 这里 R 为再辐射率 (此处的反照率 r 是针对厚靶而言的), 取 $T = 70 \text{eV}$, 可求出 $R \approx 60\%$, 于是得到次级辐射的 X 射线为 $E_X^{\text{sec}} = R E_X'$, 可得 $E_X^{\text{sec}} = 2.2 \text{J}$, 这与我们观测的 X 射线辐射 1.9J 较为接近.

由 X 射线条纹相机 (XSC) 得到的初级和次级 X 射线时空图象见图 5. 由图 5 看出, 初级和次级喷射

的等离子体仍然会发生碰撞,只是由此碰撞辐射的 X 射线较弱,由 Dante 谱仪也观察到了双脉冲结构,

第二个脉冲就是等离子体碰撞产生的,但是第二个脉冲很弱. 且由于次级的等离子体速度较慢,因此等离子体碰撞在次级附近处发生. 并可计算出初级等离子体碰撞速度为 $4.5 \times 10^7 \text{cm/s}$,次级的为 $1.5 \times 10^7 \text{cm/s}$.

5 结 语

本文所采用新型双盘靶在以往的基础上进行了改进,一定程度上避免了漏激光对次级的影响. 结果表明,初级盘的背向谱具有明显的双带谱结构包括 N 带和 O 带,偏离平衡谱较远,次级较接近平衡谱. 还获得了初、次级等离子体碰撞速度分别为 4.5×10^7 和 $1.5 \times 10^7 \text{cm/s}$.

本文研究过程中,得到制靶人员及‘星光 II’装置运行人员大力协助和配合,在此表示衷心感谢.

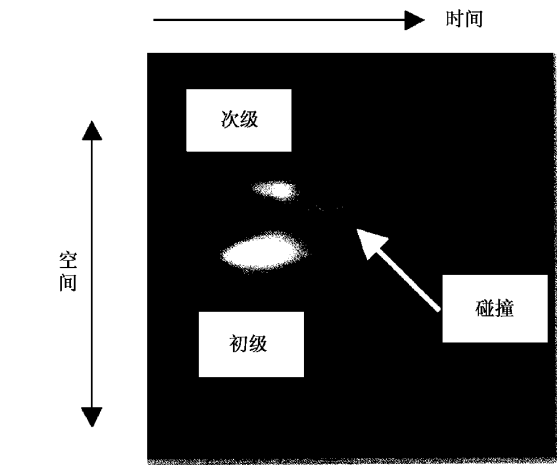


图 5 C 型双盘靶 X 射线辐射时空分布

[1] K. X. Sun *et al.*, *Acta Opt. Sin.*, **18**(1998), 1652 (in Chinese) [孙可煦等, *光学学报*, **18**(1998), 1652]

[2] S. E. Jiang *et al.*, *Intense Laser and Particle Beam*, **13** (2001), to be published (in Chinese) [江少恩等, *强激光与粒子束*, **13**(2001), 第 2 期].

[3] R. Pakula *et al.*, *Phys. Fluids*, **28**(1985), 232.

[4] J. M. Yang *et al.*, *Acta Opt. Sin.*, **18**(1998), 426 (in Chinese) [杨家敏等, *光学学报*, **18**(1998), 426].

[5] D. Babbonneau *et al.*, *Laser & Particle Beams*, **9**(1991), 527.

[6] S. Y. Liu *et al.*, *Acta Phys. Sin.*, **46**(1997), 1918 (in Chinese) [刘慎业等, *物理学报*, **46**(1997), 1918].

[7] H. Nishimura *et al.*, *Phys. Rev.*, **A43**(1991), 3073.

[8] J. Lindl, *Phys. Plasma*, **2**(1995), 3934.

EMISSION AND REEMISSION PROPERTIES OF GOLD DOUBLE-DISK TARGETS HEATED BY LASER^{*}

JIANG SHAO-EN ZHENG ZHI-JIAN SUN KE-XU HUANG TIAN-XUAN YANG JIA-MIN CUI YAN-LI

CHEN JIU-SEN GUO SU HU XIN TANG XIAO-QING

(*Research Center for Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 9 July 2000 ; revised manuscript received 28 October 2000)

ABSTRACT

A new kind of double-disk gold targets were irradiated by $0.35\mu\text{m}$ intense laser and the properties of improved X-ray spectra were investigated at “Xingguang” laser facilities. Collision velocities between the primary and secondary disks’ plasmas have been measured. This double-disk target’s design has avoided the influence of the spraying plasma from primary disk to a certain extent, and increased the “clearance” for ablated secondary disk. Two soft X-ray spectrometers were used to measure X-ray radiation from the primary and secondary disks, respectively. An X-ray streaked camera was used to obtain time-spatial images emitted from laser-plasma of double-disks targets. Experimental results were analyzed physically.

Keywords : double-disk target, X-ray reemission, plasma collision

PACC : 5250J, 5255, 5270

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19875045).