

文章编号 : 0253-2239(2001)12-1428-04

双盘靶 X 光辐射的实验研究

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)

摘要 : 在“星光 II”激光装置上 , 利用三倍频激光辐照双盘靶 , 采用两台软 X 光谱仪分别对初级和次级辐射的 X 光进行测量 , 研究 X 光谱在次级得到改造的特性 , 并对实验结果进行简单的物理分析。实验表明 , 次级辐射的 X 光谱与初级的 X 光谱相比得到了软化。采用 X 光条纹相机测量双盘靶等离子体喷射的时空扫描图像 , 结果说明 , 由于双盘距离较近 , 初、次级喷射的等离子体发生了碰撞。

关键词 : 双盘靶 ; 谱改造 ; X 光再辐射

中图分类号 : O434.1 文献标识码 : A

1 引 言

在间接驱动的惯性约束聚变(ICF)实验中 , 靶丸置于高 Z 材料的腔内 , 激光通过入射孔在腔壁转换 X 光而建立较为均匀的辐射场 , 由辐射场驱动靶丸内爆。间接驱动的 X 光辐射具有较好的对称性 , 这是由于 X 光辐射被约束在腔内而不断地与腔壁相互作用 , 经过多次吸收与再发射使得腔内 X 光辐射场变得更加均匀 , 且更趋近于普朗克谱。另外 , 间接驱动降低了流体力学的不稳定敏感性 , 因此 , 间接驱动也成为研究惯性约束聚变的主要途径之一。^[1]

由于激光加热与辐射加热的差别在于能量的沉积 , 激光能量的吸收出现在临界面密度附近 , 而 X 光比激光具有更高的穿透力 , 能量沉积主要发生在超临界密度区。另外激光加热与辐射加热产生的机制不同 , 由于在腔内难以区分两种 X 光的辐射 , 并且腔内等离子体喷射带来不利的影晌 , 这给研究激光烧蚀区和 X 光辐射烧蚀带来很大的困难。为了简化物理模型而更细致地研究这两种烧蚀产生的 X 光的特性 , 我们采用双盘靶进行谱改造的分解实验 , 由初级盘模拟研究激光烧蚀区特性 , 而由次级盘模拟研究 X 光烧蚀区的特性即经过次级改造后的 X 光谱特性^[2,3]。实验采用的主要设计为软 X 光谱仪(Dante)^[4] , 用于测量初、次级 X 光谱和 X 光量。所以有必要对软 X 光谱仪的测量原理作简要介绍。

2 软 X 光谱仪的响应曲线

在惯性约束聚变研究中 , 激光等离子体产生较

强的 X 光辐射 , 其能谱主要集中于软 X 光能区(0.1 keV ~ 1.5 keV) , 通过测量软 X 光可以得到有关激光与等离子体相互作用的物理信息。软 X 光能谱仪学用于时间分辨和时间积分的软 X 光谱绝对强度的测量。它采用多道(十道或七道) 滤片-X 光二极管(F-XRD) 探测阵列 , 滤片作为 X 光能谱分割元件 , 利用多道不同滤片材料的 K 或 L 边 , 把 X 光能谱“分割”成多个能道进行测量 ; 在低能道(如钹、硼、碳等) 安装镍掠入射平面镜(掠射角为 5°) 作为 X 光高能截止的分光元件 , 这样通过滤片的低能截止和平面镜的高能截止把 X 光能谱分割成一段能区进行测量。探测元件为 X 光二极管。

由于 X 光二极管的阴极易被空气中的尘埃和水气所污染和氧化而影响 X 光二极管灵敏度 , 随着时间推移 , 灵敏度会逐渐下降。而灵敏度对响应函数产生直接的影响。为了得到 X 光二极管实际的灵敏度 , 实验前需要对它作标定。在北京同步辐射源上 , 我们已对用于软 X 光能谱仪测量的 X 光二极管灵敏度进行了标定 , 十道软 X 光谱仪(Dante A) 的 X 光二极管灵敏度曲线见图 1 , 七道软 X 光谱仪(Dante B) 的 X 光二极管灵敏度曲线见图 2。

以往 , 用于软 X 光能谱仪的 X 光二极管并未全部标定 , 所以 , 对 X 光能谱仪信号解谱时 , 对所有的 X 光二极管响应采用平均的响应 , 然后在实验前进行一致性标定而对不同的 X 光二极管得到不同一致性系数 , 由于 X 光二极管的谱响应在不同的能区灵敏度是不同的 , 而一致性标定的靶一般采用 Au 盘靶 , 存在明显的带谱结构 , 所以一致性标定难以给出各个 X 光二极管的灵敏度。这样的结果必然带

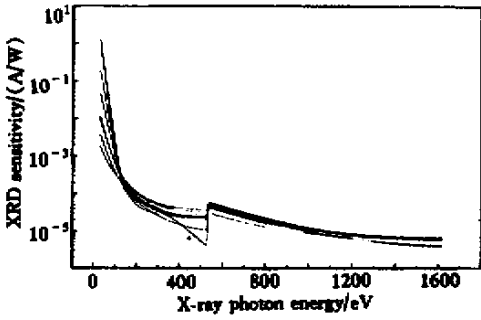


Fig.1 XRD sensitivity for 10 channel's Dante

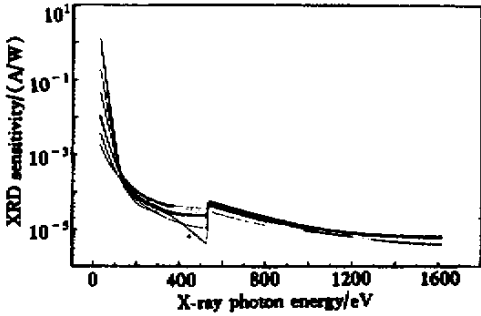


Fig.2 XRD sensitivity for 7 channel's Dante

来较大的误差。由于对软 X 光能谱仪的所有 X 光二极管都进行了标定,因此,我们对每一个 X 光二极管都建立了档案,在解谱时,X 光二极管响应与所标定的响应一一对应,提高解谱精度,从而提高 X 光量的测量精度。十道和七道软 X 光能谱仪各道总的响应曲线分别见图 3 和图 4,由于各道响应峰值较大,为了清晰起见,都进行了归一化。

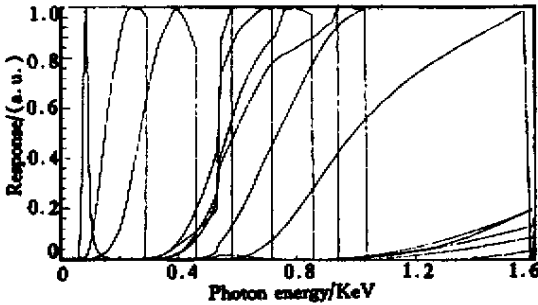


Fig.3 Response for 10 channel's Dante

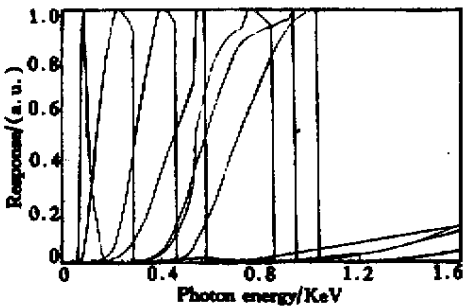


Fig.4 Response for 7 channel's Dante

3 实验条件及靶型

实验在“星光 II”激光装置上进行,打靶条件如下:激光波长为 $0.35 \mu\text{m}$,激光能量约为 60 J,焦斑直径约为 $300 \mu\text{m}$,脉冲宽度约为 700 ps,于是得到激光强度约为 10^{14} W/cm^2 。靶室真空度约为 $7 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。

双盘靶示意图如图 5 所示,初级盘靶直径为 $\phi 300 \mu\text{m}$,材料为金,盘间距为 $500 \mu\text{m}$ 。因图 5 仅仅是示意的,图中的 X 光辐射并不是只有所示的方向,而是 2π 的立体角分布。

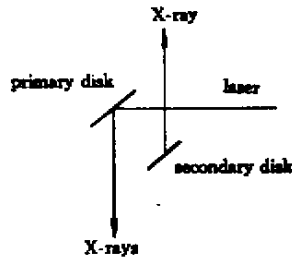


Fig.5 Double disk target

4 实验布局

实验仪器布局如图 6 所示。用两台软 X 光能谱仪分别监测初级、次级发射软 X 光谱。两台透射光栅谱仪配 X 光 CCD(TGS + XCCD)分别监测初级、次级发射 X 光谱更细致的结构。一台软 X 光分幅相机(XFC)及一台软 X 光扫描相机(XSC)分别从两侧观测初级、次级发射 X 光的时空特性。两组平响应 X 射线二极管(P-XRD)分别监测初级、次级发射 X 光的角分布及其发射总量。

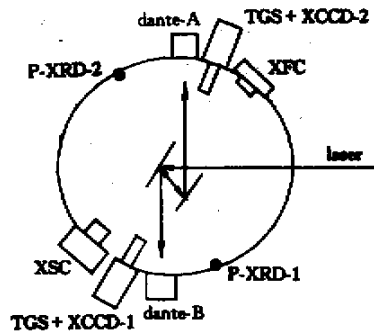


Fig.6 Experimental setup

5 实验结果及其分析

由七道软 X 光能谱仪和十道软 X 光能谱仪测量初级和次级而得到的软 X 光谱见图 7。可以看出,次级 X 光谱得到软化, O 带与 N 带之比值比初

级的 O 带与 N 带之比值要大得多。假定双盘靶 X 光辐射遵从朗伯定律即满足 $\cos\theta$ 分布,由下式求出辐射的 X 光总量

$$E_X = \frac{\pi}{\cos\theta} \int G(E) \lambda dE, \quad (1)$$

其中 $G(E)$ 为软 X 光谱, θ 为谱仪轴线与靶辐射面法线间的夹角。(1)式要求 X 光满足 $\cos\theta$ 分布,即要求金等离子体的 X 光辐射是光性厚的,此条件一般可以满足,因为金是重元素,其表面等离子体是十分稠密的。由(1)式对图7所表示的 X 光谱强度 $G(E)$ 沿 X 光能量轴积分即可得到 X 光总量,于是可得到初、次级的 X 光量分别为 28.4 J 和 5.6 J。

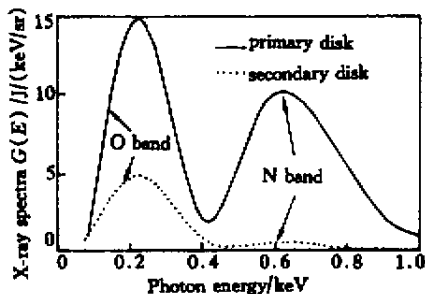


Fig.7 Soft-X-ray spectra's intensities radiated from double disk target

由 X 光条纹相机(XSC)得到的 A 型双盘靶初级和次级 X 光的时空图像见图 8。其中图像上方为初级盘的辐射,下方为次级盘的辐射。由图看出,初级和次级喷射的等离子体发生强烈碰撞,由此碰撞辐射的 X 光较强,这对次级辐射的 X 光测量影响较大。另外,次级辐射的 X 光经历的时间更长。

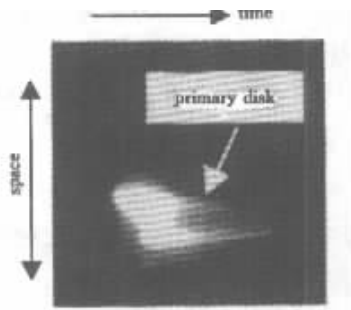


Fig.8 Time-spatial distribution of X-ray's radiated from double disk target

为了区分次级盘辐射加热 X 光再发射与初级盘膨胀等离子体碰撞发射,我们在双盘靶结构上采取了措施(缩小次级盘(初级盘直径为 $\phi 600 \mu\text{m}$,次级盘直径为 $\phi 300 \mu\text{m}$),避开初级盘等离子体喷射最强的激光烧蚀面的法向方向,减少等离子体碰撞强度,从而减少碰撞等离子体发射。

对于初级盘,强激光辐照平面靶,经过一段时间

以后,靶可以分为四个具有不同特点的区域(见图 9)^{5,6,1}。激光首先被吸收并部分地转换为 X 光,这个区域称为转换层。与其他区相比较,转换层具有较低的密度和很高的温度(典型值为 10^7 K),对 X 光是光性薄的,因而 X 光向内和真空辐射几率相等。被来自转换层的 X 光加热的区域称为再辐射区,与转换层相比,再辐射区具有大得多的密度和质量,温度比较低(约 10^6 K),这对 X 光是光性厚的,因此在转换层产生的向内辐射的 X 光在再辐射区经过多次吸收以黑体光谱形式再辐射 X 光,穿过光性薄的转换层,向真空辐射热 X 光。由于激波区具有很大的密度,因此输运到激波的 X 光能量可以忽略。靶背为冷物质。

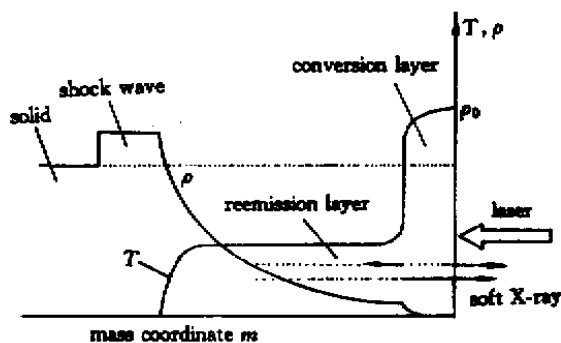


Fig.9 Schematic representation of the hydrodynamic flow induced by strong laser heating of a solid high-Z material

激光在临界面密度以下区域被吸收,吸收率为

$$\eta_a = E_{\text{abs}}/E_L, \quad (2)$$

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

$$a_c = E_X/E_{\text{abs}}. \quad (3)$$

由于转换层是光性薄的, X 光向前和向后两个方向辐射,各占 $a_c E_{\text{abs}}/2$,向后(即向里)的那部分 X 光在再辐射区产生再辐射 X 光,反射率为 r ,于是,向前辐射的 X 光量是转换层向外的 X 光 $a_c E_{\text{abs}}/2$ 与再辐射 X 光之和,这就有

$$E_X^F = a_c(1+r)E_{\text{abs}}/2, \quad (4)$$

这里上标 F 表示向前辐射。进一步利用(2)式得到

$$E_X^F = \eta_a a_c(1+r)E_L/2. \quad (5)$$

在文献[7]中,对“星光 II”激光装置的三倍频激光打 45° 平面靶测量的激光吸收率为 $\eta_a = 75\%$ 。Mead 等人对不同波长的激光定标实验得到三倍频打靶的转换效率为 $a_c = 70\%$ ^[8]。由于采用的是厚靶,没有后向出射的 X 光而全部反射,因此反射率 $r = 1$ 。将 η_a 、 a_c 和 r 代入(5)式,可以得到后向的 X 光辐射能

量为 31.5 J。这与我们所测得的初级 X 光能量是 28.4 J 基本相符。根据初级辐射的 X 光量和辐射时间以及激光焦斑 辐射时间一般取 $\tau_x = 1.5\tau_L$ (τ_x 、 τ_L 分别为 X 光和激光的脉宽),于是可得到初级盘的辐射强度为 $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$,相应的辐射温度为 120 eV。

对于次级盘,假设将初级盘上的 X 光强度看成是均匀的,次级盘对初级盘上的 X 光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 $\Omega \approx 2\pi/3$,这样,初级盘后向 X 光量到达次级盘的 X 光为

$$E'_x = \frac{\Omega}{2\pi} E_x^R = \frac{1}{3} E_x^R = 9.5 \text{ J}.$$

由 X 光加热辐照靶的再辐射率公式 $R = (1 + 13 T^{-0.7} t^{-0.38})^{-1}$ (见文献 [1]), R 为再辐射率,根据次级的 X 光量和次级靶的大小及脉宽,可得 $T = 80 \text{ eV}$ (相应的 X 光强度为 $4 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$),由此可求出 $R = 62\%$,于是得到次级辐射的 X 光为 $E_x^{\text{sec}} = RE'_x$,可得 $E_x^{\text{sec}} = 5.9 \text{ J}$,这与我们观测的 X 光辐射能量 5.6 J 基本一致。

结语 通过三倍频、功率密度为 10^{14} W/cm^2 的激光辐照初级盘得到的辐射强度为 $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$,由此 X 光辐射烧蚀距离为 $500 \mu\text{m}$ 的次级盘得到辐射强度为 $4 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$,并可计算出次级的再辐射率为 62%。另外激光烧蚀的初级盘辐射两个带谱 N 带和 O 带十分明显,而光烧蚀的次级盘的再辐射的 X 光谱则主要是 O 带占主要成分,即次级盘的再辐射

X 光谱得到了软化。

存在的问题是:由于初级和次级盘之间距离较近,初级盘喷射的等离子体碰撞次级,使烧蚀次级的 X 光不纯,这是因为等离子体碰撞同样会产生 X 光辐射,使 X 光烧蚀和等离子体碰撞产生的辐射发生混淆。

参 考 文 献

- [1] Lindl J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain. *Phys. Plasma*, 1995, **2**(11):3933 ~ 4024
- [2] 孙可煦,易荣清,黄天暄等. 辐射加热金 X 光再辐射的时间测量. *强激光与粒子束*, 1997, **9**(4):543 ~ 546
- [3] 孙可煦,易荣清,黄天暄等. 辐射加热金等离子体再发射 X 光特性研究. *光学学报*, 1998, **18**(12):1652 ~ 1657
- [4] 孙可煦,郑志坚,杨建国. 用于激光等离子体诊断的亚千 X 射线能谱仪. *强激光与粒子束*, 1990, **2**(1):16 ~ 22
- [5] Sigel R, Eidmann K, Lavarenne F *et al.*. Conversion of laser light into soft X rays. Part I: Dimensional analysis. *Phys. Fluids (B)*, 1990, **2**(1):199 ~ 207
- [6] Eidmann K, Schamlz R, Sigel R. Conversion of laser light into soft X rays. Part I: Numerical results. *Phys. Fluids (B)*, 1990, **2**(1):208 ~ 217
- [7] 刘慎业,滕浩,丁永坤等. $0.35 \mu\text{m}$ 激光辐照 Au 盘靶吸收、散射规律的实验研究. *物理学报*, 1997, **46**(10):1918 ~ 1925
- [8] Mead W, Stover E, Kauffman R *et al.*. Modeling, measurements, analysis of X-ray emission from $0.26 \mu\text{m}$ -laser-irradiated gold disks. *Phys. Rev. (A)*, 1988, **38**(10):5275 ~ 5288

X-Ray Emission from Double-Disk Targets

Jiang Shao'en Zheng Zhijian Sun Kexu Huang Tianxuan Yang Jiamin Cui Yanli
Chen Jiusen Guo Su Hu Xin Tang Xiaoqing

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

(Received 21 July 2000; revised 18 October 2000)

Abstract: A kind of double-disk gold targets were irradiated by $0.35 \mu\text{m}$ intense laser at "XINGGUANG II" laser facilities and X-ray spectra emitted from primary and secondary disk were measured by two soft X-ray spectrometers. The properties of X-ray spectra modified on secondary disk were investigated. The experimental results were physically analyzed and showed that the X-ray spectra emitted from secondary are softened. An X-ray streak camera was used to obtain time-spatial images emitted from laser-plasma of double disks targets. The streaking images indicated that collision of plasmas produced by primary and secondary disks occurred because the short distance between double disks.

Key words: double-disk target; X-ray spectra modification; X-ray reemission