

小能量 $0.35 \mu\text{m}$ 激光-X 射线转换研究*

黄天珺 王红斌 孙可煦 汤晓清

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 成都 610003)

摘 要 以小能量 $0.35 \mu\text{m}$ 激光($< 100 \text{ J}$) 辐照盘靶 ($\Phi 600 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$), 用软 X 射线平响应探测器测量 X 射线角分布 ($dE/d\Omega$) 和 X 射线转换效率 (η_x)。 $dE/d\Omega = a + b \cos \theta$, 与 ϕ 角无关。 η_x 随激光入射角增加而下降。按金盘、多层膜($0.11 \mu\text{m}$) 金盘和 CH 膜($0.4 \mu\text{m}$) 金盘顺序, η_x 依次下降。

关键词 $0.35 \mu\text{m}$ 激光, 盘靶, X 射线角分布, X 射线转换。

1 引 言

利用盘靶研究 X 射线转换是惯性约束聚变(ICF) 空腔靶的基础分解实验。尤其是用 $0.35 \mu\text{m}$ 激光打靶时 X 射线的转换效率是一项基础研究工作。

从激光等离子体发射的 X 射线具有空间角分布和连续能谱。精确测量 X 射线发射角分布, 研究激光-X 射线转换规律, 对于惯性约束聚变的计算机数值模拟非常重要。美国洛仑茨·利弗莫尔国家实验室的研究表明, 通过 LASNEX 数值模拟计算, 激光等离子体二维模型的预测结果与实验数据基本符合^[1, 2], 误差 15%。

国内 $0.35 \mu\text{m}$ 短波长激光打靶的实验研究起步较晚, 需要补充这方面的基本数据为理论数值模拟服务。作者根据文献[3, 4] 仿制 X 射线平响应探测器, 利用多个探头分两组在空间 θ 、 ϕ 两维坐标同时测量 X 射线角分布。然后对空间积分求得 X 射线总能量, 计算 X 射线转换效率。

在惯性约束聚变空腔靶实验中, 主要以高 Z 元素金(Au) 作腔壁, 有时也金腔内壁上加 CH 膜或多层膜镀层, 抑制腔内激光等离子体密度。使用盘靶是为了研究 X 射线转换效率与 $0.35 \mu\text{m}$ 激光入射角 α 、靶材料等实验条件的定量关系^[5]。

2 实验原理

平响应探测器由金阴极 X 射线二极管(XRD) 和组合膜构成, 记录仪器为 1000 MHz 示波器。X 射线二极管由北京核仪器厂制造, 有效光阑直径 8 mm。组合膜的结构是: 外径 8 mm 的铝膜(厚 $3 \mu\text{m}$), 中心开孔直径 3.6 mm, 孔上覆盖 C_8H_8 有机膜(厚 $0.09 \mu\text{m}$), 两者面积比

* 国家科委 863 高科技项目资助课题。

收稿日期: 1997-04-01; 收到修改稿日期: 1997-08-19

4XIV。当偏压为 3000 V 时, 探测器响应曲线如图 1 所示, 在(0.03~1.5) keV 能区的平均值为 3×10^{-5} A/W, 起伏 $\pm 20\%$ 。激光等离子体产生的 X 射线以谱线发射为主, 集中在上述能区。又由于 (0.03~1.5) keV 能区以外, 平响应探测器响应很低, 所以该能区之外的辐射对测量影响很小 ($\pm 5\%$)。设在 (θ, ϕ) 方位上的第 i 个探头, 对靶心张角为 $\Delta\Omega$, 探头响应为 R , 输出电荷 Q_i , P_i 为探头响应的修正因子, 由于 $\Delta\Omega \ll 1$, 所以单位立体角 X 射线发射能量为:

$$\frac{dE}{d\Omega}(\theta, \phi) = \frac{Q_i}{\Delta\Omega R P_i}$$

对球坐标积分, 就可以获得 X 射线总能量为:

$$E_x = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} \frac{dE}{d\Omega}(\theta, \phi) \sin \theta d\theta \quad (1)$$

定义激光-X 射线转换效率为

$$\eta_x = \frac{E_x}{E_L}, \quad (2)$$

其中 E_L 为靶面激光能量。

3 实验安排

3.1 靶室示意图

图 2 为靶室俯视图。靶面坐标系中, 以靶面焦斑中心为原点, z 轴指向靶法线方向, 激光入射方向 $\phi = 180^\circ$, α 为激光入射角。文中 θ, ϕ 都是该坐标系的球坐标变量。

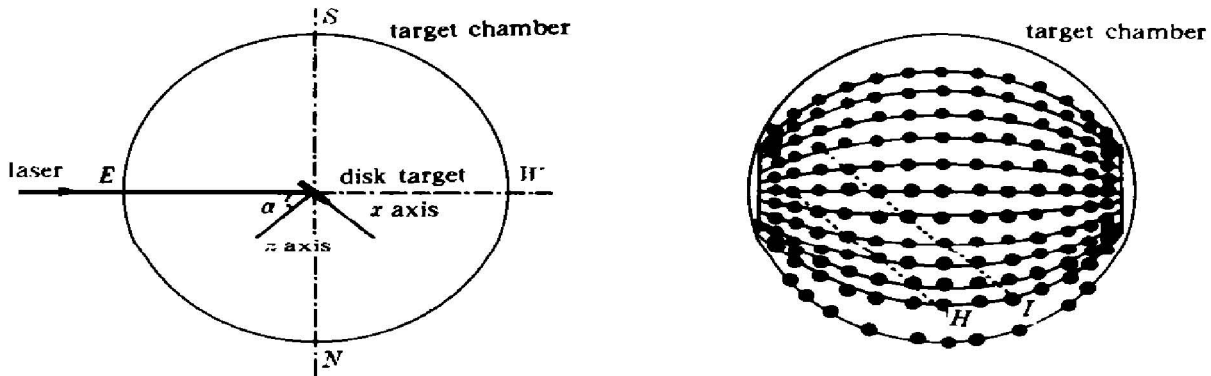


Fig. 2 Schematic diagram of target chamber

3.2 探测器排布

第一组 7 个探测器, 放置在靶室内同心支架上, 分别排布在图 2(b) 虚线 I 或 II 所经过的位置, 距离靶心 380 mm。第二组 10 个探测器, 分别放置在靶室北壁水平面各法兰口上, 位置固定不变, 距离靶心 500 mm。随着激光入射角 α 变化, 各探测器相对靶面坐标系的坐标 θ, ϕ 将有所改变。

表 1 列出图 2(b) 虚线 I 和 II 所经过的探测位置在 $\alpha = 45^\circ$ 时的球坐标。表 2 为第二组探测器的 θ 坐标变换表。

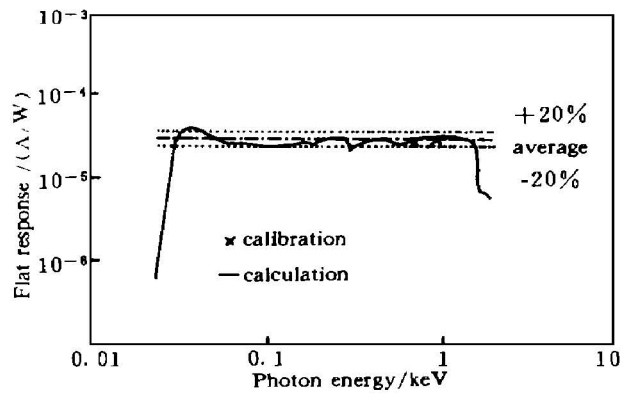


Fig. 1 Response curve of flat-response detector (including calibration data)

Table 1. $\alpha = 45^\circ$, θ and ϕ angles of detector positions on dot line I and II/($^\circ$)

I				II			
θ	ϕ	θ	ϕ	θ	ϕ	θ	ϕ
74.5	38.8	76.0	104.4	57.2	49.9	57.2	130.1
79.3	47.1	75.7	118.3	55.2	66.7		
77.0	61.1	74.4	131.6	55.0	83.7		
76.0	75.6	71.7	144.1	55.7	100.0		
75.9	90.1			56.7	115.5		

Table 2. θ angles of the second set of detectors/($^\circ$)

detector	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$\alpha = 10$	129.4	26.6	35	43.4	57.5	71.6	80	88.4	102.5	120.6
$\alpha = 30$	109.4	66.0	15	23.4	37.5	51.6	60	68.4	82.5	100.6
$\alpha = 45$	94.4	- 8.4	0	8.4	22.5	36.6	45	53.4	67.5	85.6
$\alpha = 60$	79.4	- 23.4	- 15	- 6.6	7.5	21.6	30	38.4	52.5	70.6

Note: “-”: $\phi = 180^\circ$, the rest: $\phi = 0^\circ$

3.3 探测器响应修正因子测量

探头灵敏度是在北京北京高能所同步辐射 X 射线源上进行, 受时间限制, 只能标定少数探测器。选取 9 号探测器为标准。用较小能量打金盘靶, 利用特制一致性法兰, 使各探测器从同一角度测量同一发实验的 X 射线发射能量。与标准探测器比较, 确定各探测器响应相对标准探头的修正因子, 以便对测量信号加以修正。

4 实验结果

4.1 探测器响应修正因子

以 9 号探测器为标准。1~8 号探测器加镍网, 衰减系数为 0.3。表 3 列出了响应修正因子的标定结果。

Table 3. Correction factors of detector response

detector	1	2	3	4	5	6	7	8	
factor	1.14	0.89	0.96	1.14	0.93	0.95	0.97	0.87	
detector	9	10	11	12	13	14	15	16	17
factor	1.00	0.93	0.85	1.08	0.99	1.00	1.03	0.94	1.08

4.2 激光参数

激光波长 $0.35 \mu\text{m}$, 能量 $30 \sim 60 \text{ J}$, 脉宽 $600 \sim 800 \text{ ps}$, 激光焦斑 $150 \sim 200 \mu\text{m}$, 功率密度 $(1 \sim 2) \times 10^{14} \text{ W cm}^{-2}$ 。

4.3 软 X 射线发射角分布

当激光入射角 $\alpha = 45^\circ$ 时, 由表 1 可知, 安放在两条虚线所经过的探测位置上的 1~7 号各探测器, θ 角基本为 56° 或 76° , 正好测量 X 射线 ϕ 角分布。对于 8~17 各探测器总有 $\phi = 0^\circ$ 或 180° , 可测 X 射线 θ 角分布。而且, 作者选用了金盘靶、CH 膜金盘和多层膜金盘三种靶型, 同时测量 X 射线的 θ 、 ϕ 角分布。测量结果如图 3 和图 4 所示。

图 3 中连线为拟合曲线 $a + b \cos \theta$ 。表 4 列出与图 3 对应的靶型参数及拟合常数。

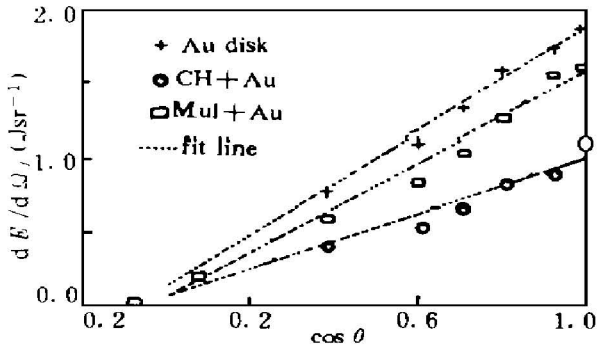


Fig. 3 $\alpha = 45^\circ$, θ angular distribution of X-ray emission

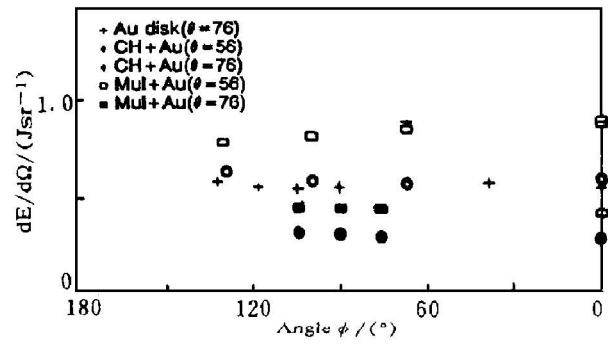


Fig. 4 $\alpha = 45^\circ$, ϕ angular distribution of X-ray emission

Table 4. Parameters of target type and fitting coefficients of θ angular distribution

target type	coat parameter	coefficient		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>
Au disk	no coat	0.13	1.73	0.999
Mul+ Au disk	(0.08 μm Au+ 0.03 μm CH) × 10	0.07	1.49	0.990
CH+ Au disk	0.4 μm CH	0.07	0.94	0.900

Note: Au disk, $\Phi 600 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$, *r*: correlation coefficient.

4.4 X 射线转换效率 η_x

图 5 为 $\alpha = 45^\circ$ 时三种靶型的 X 射线转换效率。图 6 为 $\alpha = 10^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 和 60° 时, 金盘靶的激光-X 射线转换效率。

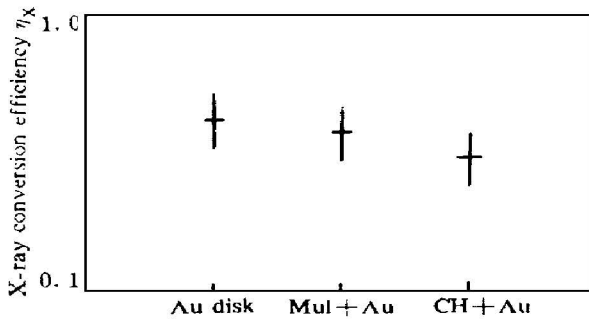


Fig. 5 X-ray conversion efficiency versus target type

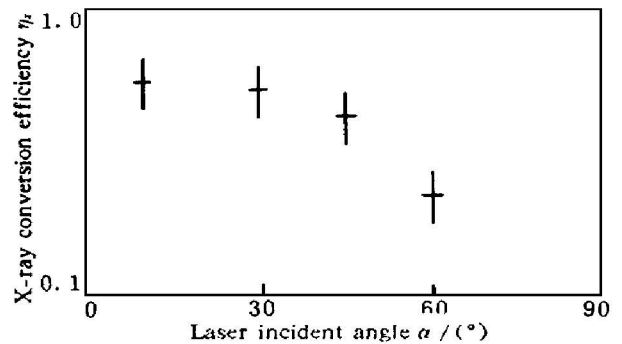


Fig. 6 X-ray conversion efficiency versus laser incident angle α

5 分析与结论

1) 阴极量子效率变化、组合膜的差异等因素是造成探头响应偏离的主要原因。尤其是铝膜打孔, 需要进一步改进工艺。X 射线能谱变化, 电磁干扰信号, 读图等因素会引入随机误差。探头在同步辐射上标定误差 $< \pm 20\%$ 。利用探头响应修正因子修正后, 探头相对误差约 $\pm 10\%$ 。平响应范围外辐射影 $\pm 5\%$ 。综合考虑, X 射线转换效率的误差 $< \pm 30\%$ 。

2) 根据激光等离子体相互作用理论^[5], 冕区等离子体向真空飞散, 部分 X 射线发射区域在靶平面之外。从靶测也可测得 X 射线发射。但 X 射线转换规律决定了 X 射线主要发射区域在临界面附近, 光性较厚, 基本上类似一个余弦发光体。

图 4 表明, 误差范围内, X 射线发射角分布基本与 ϕ 角无关。用 $a + b \cos \theta$ 函数关系拟合

X 射线角分布, 在误差范围内符合较好。表 4 中相关系数 r 表明, 纯金盘靶数据符合程度最好, CH 膜金盘最差。

3) 金盘靶, 多层膜金盘和 CH 膜金盘的等效原子序数 Z 依次减少, 从图 5 可看到, 当其它条件基本相同时, X 射线转换效率随等效 Z 下降而减少。

4) $0.35 \mu\text{m}$ 激光与金盘靶作用, 主要吸收机制为逆韧致吸收, 吸收系数与等离子体密度的平方成正比。当激光以大角度 α 斜入射靶面时, 由于在等离子体密度较低处 ($n_e = n_c \cos^2 \alpha$ 式中 n_e 为等离子体密度, n_c 为临界密度) 就会反转^[5], 激光能量主要沉积在临界面以外区域。等离子体通过电子热传导向内传递能量转换成 X 射线能量, 该过程与流体力学运动相互竞争, 产生复杂变化。从图 6 可看出变化趋势, 到 $\alpha = 45^\circ$ 时, 转换效率有下降; $\alpha = 60^\circ$ 时, X 射线转换效率下降过半。

参 考 文 献

- [1] R. L. Kauffman, X-ray conversion efficiency, LLNL, Livermore, USA, CA, UCRL-50021-86: 3-9~3-13
- [2] W. C. Mead, E. K. Stoven, Modeling, measurements, and analysis of X ray emission from $0.26 \mu\text{m}$ -laser-irradiated gold disks. *Phys. Rev. (A)*, 1988, **38**(10): 5275~5288
- [3] H. N. Kornblum, V. W. Slivinsky, Flat response, subkiloelectronvolt X-ray detector with a sub-nanosecond time response. *Rev. Sci. Instrum.*, 1978, **49**(8): 1204~1205
- [4] D. R. Kania, L. S. Pan, P. Bell *et al.*, Absolute X-ray power measurements with sub nanosecond time resolution using type II_a diamond photoconductors. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(1): 124~130
- [5] 常铁强, 张 钧, 张家泰等, 激光等离子体相互作用与核聚变. 长沙, 湖南科技出版社, 1991: 124~210

Study of X-Ray Conversion from Disk Targets Irradiated by $0.35 \mu\text{m}$ Laser at Low Energies

Huang Tianxuan Wang Hongbin Sun Kexu Tang Xiaoqing

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

(Received 1 April 1997; revised 19 August 1997)

Abstract We have measured the X-ray angular distribution ($dE/d\Omega$) and X-ray conversion (η_x) from a disk targets ($\Phi 600 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$) irradiated by $0.35 \mu\text{m}$ laser ($< 100 \text{ J}$) with soft X-ray flat-response detector. $dE/d\Omega = a + b \cos \theta$ is independent of ϕ angles. η_x decreased with the increasing laser incident angles with respect to the target normal. η_x also decreased when Au disk is replaced by multilayer film ($0.11 \mu\text{m}$) + Au disk or CH film ($0.4 \mu\text{m}$) + Au disk.

Key words $0.35 \mu\text{m}$ laser, disk target, X-ray angular distribution, X-ray conversion.