

六束激光对称辐照微球靶研究

徐至展 李安民 陈时胜 林礼煌
梁向春 欧阳斌 殷光裕 何兴法
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

1981年1月27日收到

提 要

本文报道六束毫微秒脉宽激光对称辐照(CD₂)微球靶研究所取得的结果。

一、引 言

为了验证高压压缩向心聚爆理论^[1,2],正广泛进行多束激光加热与压缩球形结构靶的研究.文献[3]报道,在利用以毫微秒脉宽运转的六路钕玻璃激光系统^[4]进行两束或四束激光辐照空心玻璃壳靶实验中,我们已获得有关靶压缩、时间同步及漏光影响等方面的物理信息.本文则将重点描述,在利用六路系统进行六束毫微秒脉宽激光同时对称辐照CD₂实心微球等靶的实验中,我们所积累的较宝贵的数据,内容包括中子发射、后向反射与透射激光测量、调焦实验以及反向激光光谱等。

二、实 验 条 件

用于打靶的六路钕玻璃激光系统的光路结构,可参见文献[4].其激光输出性能在表1中列出.靶场采用六个非球面-球面透镜组成的三维正交的聚焦照射方式,球形靶被置于公共的焦点上.配备于靶室的光电瞄准/电视显示技术的精密聚焦系统能确保调焦及

表1 激光系统参数

波 长	1.06 微米
光束数	6
光束孔径	末级放大器孔径 $\phi 45$ 或 $\phi 50$ 毫米,激光束经发散至聚焦透镜处为 $\phi 60$ 毫米
脉宽(FWHM)	2 毫微秒(1—4 毫微秒可调)
输出能量(总)	150—300 焦耳(1—2 毫微秒)
发散角	0.5 毫弧度内集中 80% 激光能量
超前激光	~1 毫焦耳/束
各激光束时间同步精度	~100 微微秒(~3 厘米光程差)
聚焦光学	$f/2$, 12 厘米,非球面透镜
聚焦功率密度	~ 10^{14} 瓦/厘米 ²
光束聚焦方式	三维六个方向,± x , y , z

共焦精确度为 10 微米^[5]。六束激光辐照球形靶的同步性,经调节激光束光程而满足,光程差测量是由精密比相测距仪完成,测距精度为 3—5 厘米。

本文的六束激光打靶中,主要使用了 $(\text{CD}_2)_n$ 实心微球靶,其直径为 $\phi 50$ —500 微米,椭圆度 $<5\%$ 。

三、主要实验结果

1. 中子发射

在多束激光辐照 $(\text{CD}_2)_n$ 球形靶时,使用 BF_3 计数器与塑料闪烁体探测器来检测中子。测量表明,几乎在每一次打靶中,均获得稳定的中子输出。每次打靶的中子产额为 10^3 — 10^4 个。产额的高低主要依赖于激光能量和调焦位置,一般以调焦到球心中子产额最高。显然,这里的情形和早期的单路激光打靶产生中子^[6,7]的情形一样,这些中子只是与冕区等离子体中被加速的高能氘核有关,它们仍然属于非热核的束-靶型中子。图 1 示

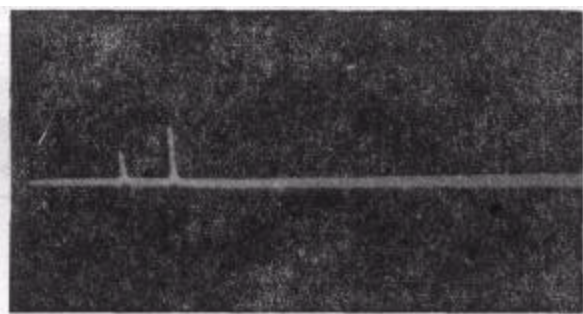


图 1 多束激光辐照 $(\text{CD}_2)_n$ 微球靶时, BF_3 探测器摄得的典型中子信号照片
($\text{CD}_2)_n$ 实心球, ϕ 为 105 微米;六束打靶;聚焦在球心

出了六束激光辐照 $(\text{CD}_2)_n$ 球形靶时, BF_3 探测器拍摄到的典型的中子信号照片。在这次打靶中,中子产额 $>2 \times 10^3$ 。

对于充以氘气的玻壳靶,未探测到中子。计算表明,在目前激光打靶的条件下,玻壳内氘气区域的中子产额很低。

2. 后向反射与透射激光率测量

在单束激光辐照平面靶实验中,测量靶对激光自身的后向反射(指反馈进入聚焦透镜锥角的激光能量)率,通常是鉴别聚焦位置的有效而简便的手段。同样,在多束激光辐照微球靶实验中,测量各路的后向激光(包括进入入射光路聚焦透镜锥角的、从靶反射与其它光束透过靶的两部分能量)率也是判断各束激光瞄准微球靶精度的直观手段。在 1976 年 5 月前后进行的近五十次六束激光辐照 $(\text{CD}_2)_n$ 微球靶实验中,我们详细地记录了各路的后向反射激光率。在实验中,入射、反射与透射激光能量都是由各种类型的能量卡计直接测定的。当时,激光脉宽约 2 毫微秒,各路激光都聚焦至靶球中心。表 2 示出了一部分结果。表 2 中的第 8—10 三行是单束激光辐照微球靶的情形。后向反射率一般在 5.5% 附近,而透射率(定义为透射过靶进入对面光路的透镜锥角的能量与入射激光能量之比)

表2 六束激光辐照 (CD₂)_s 实心球靶记录
各束激光聚焦至靶球中心; 聚焦透镜: $f/2$, $f = 12$ 厘米; 激光脉宽 (FWHM) 约 2 毫微秒

序号	靶直径(微米)	各路入射激光能量(焦耳)						各路后向(反射+透射)激光率(%)						中子发射情况
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
1	$\phi 95$	30.6	39.5	34.4	40.6	36.5	37.0	14.3	19.4	21.0	17.7	21.0	19.2	$\sim 10^3$
2	$\phi 95$	38.0	42.3	36.4	39.5	34.2	36.1	10.0	16.4	18.9	19.8	22.3	13.1	$\sim 10^3$
3	$\phi 100$	36.6	34.0	31.6	33.7	26.2	30.2	11.0	15.8	18.8	17.0	21.9	14.5	$> 10^3$
4	$\phi 100$	42.2	41.2	42.6	45.3	42.2	41.1	13.1	18.2	19.8	23.0	23.2	12.8	$\leq 10^4$
5	$\phi 120$	51.8	64.8	60.5	60.4	60.8	54.2	11.3	14.6	16.1	16.1	12.7	9.8	$> 2 \times 10^3$
6	$\phi 105$	51.8	40.6	57.8	53.4	55.5	52.0	12.4	20.0	14.5	20.1	15.4	13.8	$> 2 \times 10^3$
7	$\phi 55$	45.1	63.9	74.3	49.9	70.9	62.0	33.0	25.0	23.3	18.8	12.6	18.0	$> 10^3$
8	$\phi 100$	42.0 (光束漂移 $x \sim 5''$; $y \sim 5''$)						$R = 5.3\%$, $T = 11.3\%$						无
9	$\phi 150$	50.5 (光束漂移 $x \sim 0$; $y \sim 5''$)						$R = 5.6\%$, $T = 9.7\%$						无
10	$\phi 170$	49.7 (光束漂移 $x \sim 5''$; $y \sim 0$)						$R = 5.4\%$, $T = 3.7\%$						$\sim 10^3$

注: 后向激光率 = $\frac{\text{从靶反射和其它光束透射过靶而进入透镜锥角的后部分激光能量之和}}{\text{入射激光能量}}$

R 为从靶反射而进入透镜锥角的后向激光能量与入射激光能量之比例;

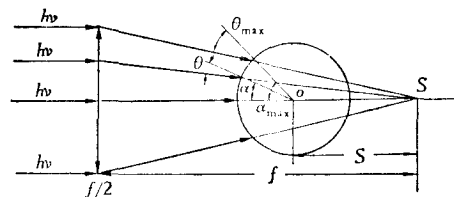
T 为透射过靶而进入对面光路的透镜锥角的能量与入射激光能量之比例。

随靶的增大而减小. 当靶直径约 100 微米时, T 约 11.3%. 而表 2 中前七行都是六束同时打靶的记录值, 很显然, 从各路测得的后向激光率, 能够判断激光瞄准靶的精度是良好的. 事实上, 在实验中, 如果某一路瞄准靶的精度不佳, 即在对面一路所测得的后向激光率就会出现异常. 另外, 应当指出的, 在诸如表 2 中第四行所示的一些打靶实验中, 各束入射能量相对平衡较好, 各路所测量的后向激光率也较平衡 (约为 $18 \pm 5\%$), 这时往往对应于较高的中子产额. 当然, 各路后向反射与透射激光率的测量也是构成今后将进行的光学能量平衡实验的重要组成部分.

3. 调焦实验

在激光打靶实验中, 聚焦位置是一个重要的调节量. 我们专门就调焦对打靶 (指直径 $\lesssim 100$ 微米的玻壳靶或 $(\text{CD}_2)_n$ 微球靶) 效果 (如: 靶区温度与中子发射, 后向激光反射率, 压缩等) 的影响进行了系统的实验. 结果表明, 在我们的实验条件下, 利用 $f/2$ 透镜将激光束聚焦于靶心或靶球表面附近, 将较其它离球心较远的位置, 有更好的激光光线与靶球表面的正交性, 从而有利于靶对激光的逆致吸收. 而在我们的长脉宽激光打靶条件下, 这种经典吸收是靶对激光吸收的主要机制. 关于调焦对六束激光辐照微球靶的影响 (主要指吸收率, 照明与加热的球形均匀性等), 我们曾进行了初步的理论计算. 表 3 列出部分结果. 计算表明, 随着聚焦位置远离靶心 (即 S 增大), 正交性变差 (即 $\theta_{\max}$ 变大) 而照明均匀性改善 (即 $A_L/(4\pi R_T^2)$ 增大). 当 S 取 0 时, 正交性最好, 因而吸收率 (即 f) 最高; 当 S 取 $2R_T$ 时 (R_T 为靶球半径), 吸收率约降低了 15%; 当 S 取 $4R_T$ 时, 吸收率降低到

表 3 调焦对六路激光辐照微球靶的影响



靶: $(\text{CD}_2)_n$ 微球; 毫微秒脉宽激光; 聚焦透镜: $f/2$; 聚焦点距靶球中心距离为: S

S	0	R_T	$2.12R_T$	$2.70R_T$	$4R_T$	$4.12R_T$
$\alpha_{\max}$	14°	28°	45°	$54^\circ 40'$	90°	104°
$\theta_{\max}$	0°	14°	31°	$40^\circ 40'$	76°	90°
$A_L/(4\pi R_T^2)$	9%	35%	88%	127%	300%	372%
$\bar{f}(\alpha, \beta, \gamma)$	70%	68%	60%	50%	38%	30%
$R_T^{\max}$	≤ 50 微米 (35 微米)	≤ 76 微米 (53 微米)	≤ 200 微米 (142 微米)	—	—	—

注: A_L 为靶球被各路激光照射面积之总和; 当 $\frac{A_L}{4\pi R_T^2} \geq 100\%$ 时, 靶球表面无未被激光照明区;

$\bar{f}(\alpha, \beta, \gamma)$: 在激光照射区域内, 靶球对激光吸收率的平均值; 这里 α, β, γ 为靶球面上光线入射点的方位角;

$R_T^{\max}$: 考虑到电子横向热传导对靶面温度均匀性的效应后, 获得靶球均匀加热所允许的最大靶球半径; 括号中数值对应于玻壳靶情形

约为 S 取 0 时的一半, 而却有整个球面的均匀照明. 然而, 如考虑到存在有电子横向热传导对加热均匀性的效应后, 即使激光辐照不均匀, 只要靶球半径小于某一临界值 ($R_T^{\max}$), 则在六路打靶时, 仍能有较好的球表面加热的均匀性. 例如: 当聚焦于靶球表面 ($S = R_T$) 时, 只要玻壳靶直径不大于 100 微米 [$(\text{CD}_2)_n$ 靶为 150 微米], 就能获得球面温度的均匀化. 根据表 3 列出的初步计算结果, 取聚焦于靶心或靶面附近 (要求 $S < 2R_T$) 是合适的, 这时有较高的激光吸收率且又满足温度均匀化的要求. 当考虑了激光束的发散角即焦斑有一定尺寸后, 将更易满足照明和加热均匀性的要求, 因而更宜将聚焦位置选择于靶心附近. 上述分析的结论是与实验所确定的较佳调焦位置的取值范围相一致.

4. 后向反射激光光谱

采用光栅光谱仪来拍摄激光辐照微球靶时被靶所反射的后向激光的光谱, 光谱仪的线色散为 13.4 埃/毫米 (用 1.06 微米波长的第二级光谱). 实验布置如图 2 所示, 利用末两级棒的倾斜的入射与出射端面反射, 便可将入射激光和被靶等离子体反射回的激光, 同时用柱透镜聚焦到光谱仪狭缝的上、下位置上, 这样就能在同一张谱片上比较反向激光的频谱移动. 图 3 是典型的经微密度计扫描而得到的入射与反射激光的光谱径迹. 可以看出, 反向激光光谱向长波方向移动, 移动量约为 4.4 埃. 这种“红移”如用截止密度层沿激光方向的运动来解释, 则按多普勒效应估算其运动速度约为 10^7 厘米/秒量级.

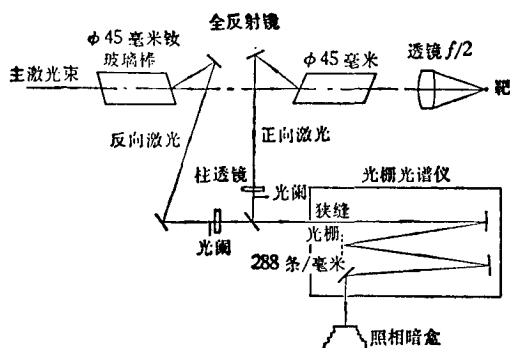


图2 正向激光和反向激光光谱测试光路图

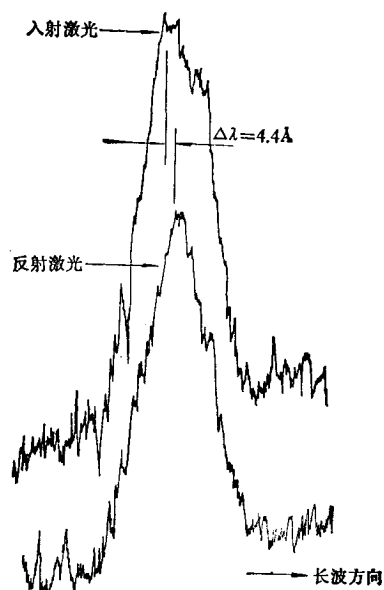


图3

参加本文部分研究工作的还有潘成明、张如礼、高脐媛、张振明、郑书春、袁柏春、竺庆春、康玉英等同志。三结合靶场组承担了靶场方面的调试工作, 谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] J. Nuckolls, L. Wood *et al.*, *Nature*, **239** (1972), 139.

- [2] K. A. Brueckner, KMSF-NP 5 (1972).
- [3] 中国科学院上海光学精密机械研究所激光核聚变实验室, 科学通报, 数理化专辑, (1980), 155.
- [4] 徐至展等, 物理学报, **29**(1980), 439.
- [5] 毕无忌等, 长春光学精密机械学院学报, (2)(1980), 47.
- [6] G. H. McCall *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **30** (1973), 1116.
- [7] K. Büchl *et al.*, In *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena*, **2** (1972), 503.

INVESTIGATION ON SIX-BEAM LASER SYMMETRICALLY IRRADIATING MICROSPHERICAL TARGETS

XU ZHI-ZHAN LI AN-MING CHEN SHI-SHEN LIN LI-HUANG LIANG XIANG-CHUN

OUYANG PIN YIN GUANG-YU HOU SHING-FA

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

This paper reports the results of the investigation on six-beam ns laser symmetrically irradiating (CD₂)_n microspherical targets.