

激光加热等离子体研究

徐至展 李安民 陈时胜 林礼煌
梁向春 欧阳斌 毕无忌 何兴法
殷光裕 张树千 潘成明

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

1981年2月2日收到

提 要

本文研究了上升时间为毫微秒的万兆瓦量级的钕玻璃激光脉冲与多种含氘材料平板靶之间的相互作用。重点测量了等离子体的中子产额、电子温度和后向反射激光的各种特性(包括反射率、空间、时间及光谱结构)。

一、引 言

激光与等离子体相互作用的物理过程的研究,是整个激光核聚变工作的基础。本文报道脉宽(FWHM)为毫微秒量级、30—60焦耳的单脉冲钕玻璃激光(波长为1.06微米)辐照含氘固体靶得到的某些结果。在激光功率密度高于 10^{13} — 10^{14} 瓦/厘米²量级的情况下,研究单路激光产生的等离子体的性质(如温度、中子产额及X射线输出、对激光的反射等),激光参数(脉宽、能量、信噪比等)和靶场参数(靶材、聚焦位置及方式等)之间的定量依赖关系,希望对激光与等离子体相互作用的有关特点能有较深入的了解。

二、激 光 器

应用于单束光辐照靶实验的钕玻璃激光器在文献[1]中报道过。激光器性能如表1所示。

表1 激光器输出特性

波长	1.06 微米	光束发散角(全角)	< 1 毫弧度
脉宽(FWHM)	4 毫微秒	激光器总效率	~0.04%
上升时间	1—2 毫微秒	“噪声”能量 ¹⁾	< 2.0 毫焦耳
能量	30—60 焦耳	能量信噪比	~10 ⁴
功率	7—20 千兆瓦	象散 ²⁾	20—50 微米

1) “噪声”能量是指迭加在输出主脉冲上的“噪声”背景辐射的总量。

2) 象散是以激光光子光束与弧矢光束,经 $f/1$, $f = 6$ 厘米透镜聚焦后的象点差距为量度的。

三、靶场测试

在激光加热等离子体的实验中,重点进行了中子、电子温度、等离子体对激光的后向

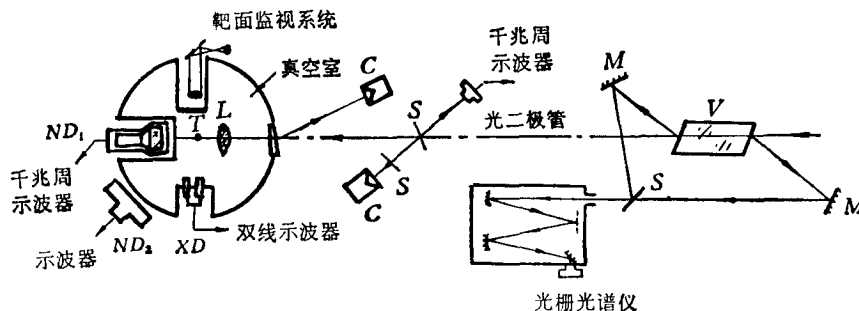


图1 靶场布局图

ND₁——闪烁体中子探测器; L——非球面打靶透镜; ND₂——BF₃中子探测器; T——靶; XD——X射线诊断系统; C——能量测量碳斗; S——部分反射镜; M——全反射镜

反射等特性的测量。靶场布置示于图1中,有关问题简述如下。

1. 靶 实验中使用 $(\text{CD}_2)_n$, $(\text{CH}_2)_n$ 和 LiD 等固体材料的平板靶。靶的线度远大于激光焦斑直径。 $(\text{CD}_2)_n$ 和 LiD 材料的氘化纯度均在 99% 以上。为防止 LiD 表面转化为 LiH, 于激光辐照前在氩气氛中作了表面处理。激光辐照靶是在 10^{-4} 托的高真空中完成的。

2. 聚焦 采用球面-非球面透镜将激光束聚焦。透镜弥散盘直径小于 20 微米。实验中应用了三种类型透镜: $f/1$, $f=6$ 厘米; $f/2$, $f=12$ 厘米; $f/3$, $f=18$ 厘米。对于 $f/1$ 情况,真空中焦斑直径约为 80 微米,功率密度约为 $(1-4) \times 10^{14}$ 瓦/厘米²。用 6328 埃氦-氖激光器作调焦基准光源,用傅科刀口法确定焦点位置^[2],并把它作为相对座标原点。根据透镜设计中特定的色差修正量 $\Delta_{\text{色}}$,同时考虑到波长为 1.06 微米的高功率激光束与调整用的氦-氖激光束都不是严格平行的,应按它们的真实波面计算修正量 $\Delta_{\text{波}}$ 和 $\Delta_{\text{平}}$,这样才能得到 1.06 微米激光的真实焦点相对 6328 埃调整光焦点应移动的距离 $\Delta = \Delta_{\text{色}} + \Delta_{\text{波}} - \Delta_{\text{平}}$ 。实验中,激光束的波面是用网格投影法(哈特曼光阑法)测量的。在确定了焦点位置后,即可用高倍率双目立体显微镜监视,用精密导轨轴向调节机构,将靶平面准确地放在焦点位置上或所要求的位置上。整个调靶系统能保证轴向调焦精度优于 10 微米。

3. 温度测量 采用 X 射线吸收比较法^[3],测量激光产生等离子体的电子温度。在麦克斯韦平衡分布假设下,等离子体发射的软 X 射线,通过两块不同厚度的金属薄箔的强度比 R 是电子温度 T_e 的函数。测量 R ,再按 $R=f(T_e)$ 理论计算曲线,即能估算电子温度 T_e 。在实验中,我们用 60 微米厚的铝箔及 12 微米厚的镍箔。透过薄箔的 X 射线,由塑料闪烁体接收并经 GDB-35 光电倍增管转换成电信号,两路信号最后由 SS-5305B 双线示波器显示。测量结果是积分型的,反映了等离子体韧致辐射通过箔的总能量比。图 2 是 X 射线比较法测温的典型示波器扫迹照片,其对应的电子温度约为 650 电子伏。

4. 中子测量 使用 BF_3 计数器和塑料闪烁体探测器, 来检测激光辐照含氘靶产生的中子。

BF_3 探头有效面积为 40×60 厘米², 置于离靶 50 厘米处。经 Po-Be 中子源标定, 等离子体源在 4π 立体角内发射约 360 个中子, 探测器即可记录到一个脉冲。中子经探头内的石蜡慢化后, 大部分将在 200 微秒时间内的不同时刻进入 BF_3 正比计数管。记录中子脉冲的示波器由激光触发扫描系统。

闪烁探测器是由一端 $\phi 78$ 毫米、另一端 $\phi 56$ 毫米、厚 90 毫米的锥形塑料闪烁探头和 56 AVP 光电倍增管组成。探头离靶 7 厘米或 29 厘米, 相对靶源张角为 $0.077 \times 4\pi$ 或 $0.047 \times 4\pi$ 立体角。输出信号由千兆周示波器 Tektronix-519 记录。用 Po-Be 中子源标定后, 表明等离子体源在 4π 立体角内发射 65 个中子或 1075 个中子, 即可记录到大于噪声的中子脉冲信号。

在对探测器采取屏蔽后, 进行了 $(\text{CD}_2)_n$, $(\text{CH}_2)_n$, LiD, LiH 对照打靶。在 $(\text{CH}_2)_n$ 与 LiH 实验中本底是干净的, 表明两种探测器所显示的信号只能由中子引起。

5. 反射光测量 在激光和等离子体相互作用研究中, 靶对激光的后向反射率将给出等离子体对激光的吸收情况的信息; 而对后向反射激光(以下简称为反向激光)的时间、空间和光谱特性的细致观测, 可提供激光等离子体内部的流体力学特性, 同时也将验证激光等离子体的各种非线性相互作用的理论预测, 如激光感生的各种受激过程^[4,5]。实验中, 反向激光能量由卡计直接测定, 反向激光的波面结构则由网格法测定。在部分实验中, 还用快响应光电管-千兆周示波器系统, 同时记录入射和反向激光脉冲波形, 并以线色散为 13.4 埃/毫米的光栅光谱仪测量输入和反向激光的光谱结构。

四、实验结果

将脉宽 4 毫微秒、能量 30—60 焦耳的激光聚焦到含氘材料的平板靶上, 研究了等离子体的加热过程, 判断了输出中子的条件, 并比较了使用不同相对孔径的聚焦透镜, 以及聚焦于不同的位置对加热效果的影响。一共进行百次以上的实验。

1. 中子输出 激光辐照 LiD 及 $(\text{CD}_2)_n$ 均获得中子信号, 中子产额估算 $\geq 10^3$ /脉冲。图

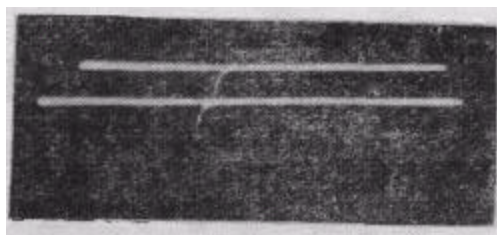


图2 X射线吸收比较法测电子温度的典型照片
上扫描线为透过 12 微米厚镍箔的 X 射线信号; 下扫描线为通过 60 微米厚铝箔的 X 射线信号。 $R = X_{\text{Ni}}/X_{\text{Al}} \sim 19/18$, $T_e \sim 650$ 电子伏; 靶为 $(\text{CD}_2)_n$ 。激光为 4 毫微秒, 50 焦耳; 打靶透镜为 $f/1$, $f = 6$ 厘米

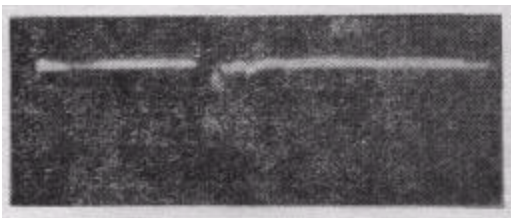


图3 闪烁体探测器输出中子信号的典型照片
(扫描速度: 50 毫微秒/厘米)

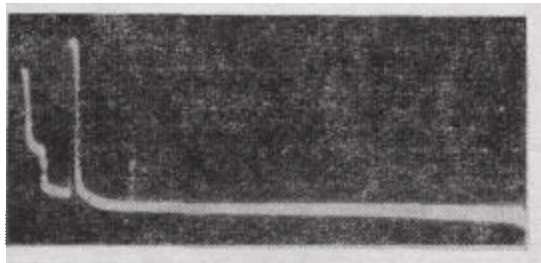


图4 BF_3 计数器输出中子信号的典型照片

3 和图 4 示出了中子信号的典型照片。当闪烁体探头拉远到距靶 29 厘米处, 仍测量到中子信号, 表明产额下限已为 1100 个。BF₃ 计算器也曾记录到三个脉冲, 同样表明中子产额约 1000 个。

2. X 射线测量 X 射线吸收比较法测温表明, 激光辐照几种靶材 (CD₂)_n, (CH₂)_n 和 LiD 所产生的等离子体的电子温度均大于 600 电子伏, 最高已达 800 电子伏。温度随入射激光能量的增加而递增。在加热等离子体的实验中, 电子温度最高并非一定发射 X 射线最强。往往在采用较长焦距打靶透镜或聚焦偏离最佳位置时, 温度虽下降, 但等离子体总量增大, 故 X 射线发射可能增强。例如在 LiD, *f*/1 实验中, 聚焦至靶内 100 微米, 温度显著下降, 但透过 60 微米厚的铝箔的 X 射线却增大一倍以上; 再如在 (CD₂)_n, *f*/1 实验中, 透过 60 微米厚的铝箔的 X 射线信号在示波器记录中一般为 10—20 伏, 但条件相同, 改用 *f*/3 透镜后却为 ≥30 伏。

在我们的实验中, 激光强度已达 10¹⁴ 瓦/厘米量级, 有可能激发等离子体不稳定性, 电子能谱(因而 X 射线谱)将偏离经典韧致谱。实验中曾采用一对厚镍箔窗 (6.3 毫米和 1.6 毫米厚) 观测到硬 X 射线, 测量表明等离子体内部已出现大于几十千电子伏的过量高能电子。

3. 反向激光测量

(1) 激光反射率 等离子体对入射激光的后向反射率 *R* (指反馈进入聚焦透镜-激光器系统的部分), 随入射激光能量的增加而变大。如对于 LiD, *f*/1 打靶场合, 这种趋势就较显著。当激光能量从 28 焦耳增至 61 焦耳时, 反射率 *R* 从 13% 增大至 23%, 详见图 5。

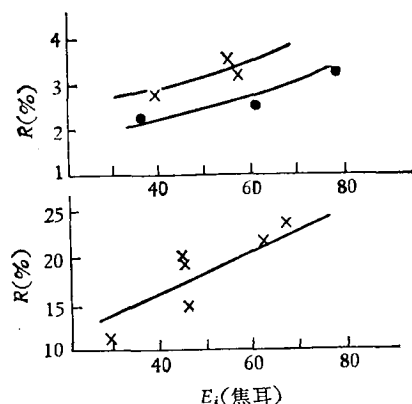


图 5 反射率随激光能量的变化关系

上图: (CD₂)_n, *f*/2, *f* = 12 厘米,
×——Δ*x* = 0, ●——Δ*x* = 40 微米;
下图: LiD, *f*/1, *f* = 6 厘米, Δ*x* = 0

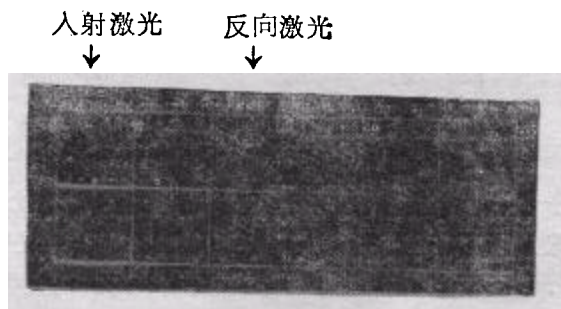


图 6 入射与反向激光的脉冲波形

(入射与反向激光有不同的衰减率,
扫描速度: 20 毫微秒/厘米)

反射率不仅和激光能量、透镜类型、聚焦的轴向位置 (以偏离最佳位置的偏离量 Δ*x* 量度) 等量有关, 且和靶材有关。LiD 靶就比 (CD₂)_n 和 (CH₂)_n 靶有较高的反射率。例如在激光能量为 30—60 焦耳、聚焦于靶表面附近 (Δ*x* = 0), *f*/1 透镜打靶实验中, LiD 靶的反射率 *R* 一般为 15—25%; 而 (CD₂)_n 或 (CH₂)_n 则为 10—13%。

我们还将入射激光与反向激光取样略有延迟后射入同一光电管上, 通过千兆周示波器记录脉冲波形, 结果如图 6 所示. 根据进入光电管的入射和反向激光的不同的衰减率, 可估算出强度比. 从图 6 算得反向激光对入射激光的比率(均指积分能量)约为 12%, 这个结果与用卡计测量值相符. 测量还表明, 在目前的辐照靶条件下, 被靶区所反射的激光脉冲与入射的激光脉冲有相似的时间过程, 并未产生明显的畸变.

(2) 反向激光空间结构 详细观测反向激光的波面, 将有助于了解电磁波在等离子体内的传播及反射的过程. 实验中, 用网格板光阑测量了入射、反向激光波面的大致结构. 在本文报道的实验条件下, 测量表明入射激光是发散型的, 除略有象散(水平方向发散张角略大于垂直方向)外, 无其它异常. 图 7 是入射激光束近场网格投影图. 而反向激光则与此不同, 图 8 示出反向激光束近场网格投影图. 从投影图可以计算出激光束的波面结构. 图 8 表明, 距光轴不同距离的反向激光束具有不同的会聚情况, 即具有类似“轴向球差”的波面结构. 反向激光的这种空间结构已为多次 $f/1$ 或 $f/2$ 透镜情况下的打靶实验所证实.

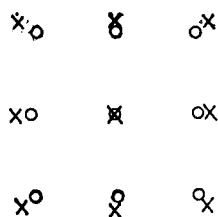


图 7

○——等间距 (10 毫米) 网孔位置;
x——网格板后 2.5 米处照相黑纸上入射激光投影点

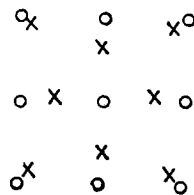


图 8

○——等间距 (10 毫米) 网孔位置;
x——网格板后 3.8 米处照相黑纸上反向激光投影点

(3) 反向激光光谱测量 入射、反向激光的光谱是采用一个 1.3 米光栅光谱仪进行测量的. 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). 测量装置的布置如图 1 所示, 利用钽玻璃棒端斜面的反射部分入射激光和反向激光, 再经柱透镜聚焦到光谱仪狭缝的上、下位置上, 从而能在同一张谱片上比较反向激光的频谱移动. 谱片是采用已作红外敏化的 X 射线基片. 光谱仪狭缝宽度为 60 微米. 图 9 是实验中拍摄得的光谱照片. 由于振荡器未进行有效的纵模选择, 加之光谱仪所用的光谱级数不够高, 入射、反向激光的光谱都呈现连续谱形状. 但仍可以看出, 反向激光光谱已向长波方向移动, 移动量约为 4 埃.



图 9

上部是反向激光;
下部是入射激光

4. 调焦实验 大量实验表明聚焦位置或靶面相对透镜焦点的位移量, 对加热等离子体的总效果(中子产额、激光反射率和电子温度等)有显著影响. 除去前面已提到的聚焦与中子发射的关系外, 在图 10 至 13 中还示出了: 当输入到靶上的激光 (4 毫微秒, 40—50 焦耳) 在不同的聚焦透镜的条件下, 激光反射率 R 、电子温度 T_e 等量随偏离于最佳聚焦位置的调焦量 Δx 的变化关系. 这里, 应着重指出下列几点:

(1) 对于 $f/1$, $f/2$ 打靶透镜情况, 在最佳聚焦位置 ($\Delta x = 0$) 能有最高的电子温度和激光反射率. 当前后偏离时, 温度与反射率都相应下降. 但在 $f/3$ 透镜打靶实验中, $R-f_1(\Delta x)$ 和 $T_e-f_2(\Delta x)$ 曲线较复杂, 正如图 13 所示, 似乎存在两个极大值, 分别为 $\Delta x = 0$ 与 $\Delta x = -500$ 微米.

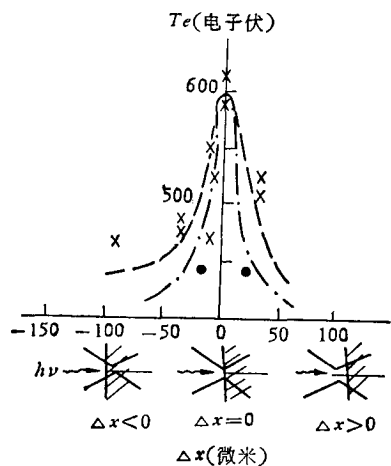


图 10 电子温度 T_e 随调焦量 Δx 的变化关系
 $f/1$, $f = 6$ 厘米

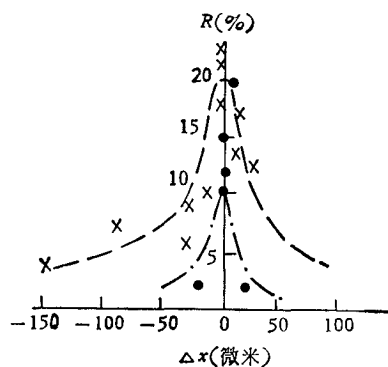


图 11 反射率 R 随调焦量 Δx 的变化关系
 $f/1$, $f = 6$ 厘米

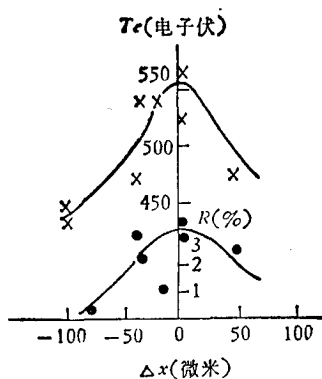


图 12 电子温度 T_e , 反射率 R 随调焦量 Δx 的变化关系
(CD_2), $f/2$, $f = 12$ 厘米

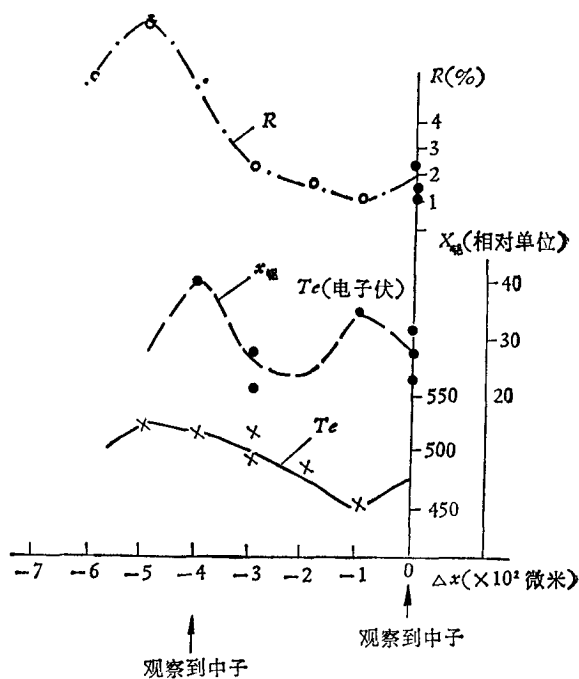


图 13 反射率 R , 透过 60 微米厚铝箔的 X 射线, 电子温度 T_e 随调焦量 Δx 的变化关系
 $f/3$, $f = 18$ 厘米

(2) 调焦对打靶效果的影响随选用较长焦距或相对孔径较小的透镜而显著减弱。在靶表面附近, 当聚焦位置偏离最佳位置 ± 50 微米时, 对于 $f/1$, $f/2$ 和 $f/3$ 三种情况, 电子温度和激光反射率分别下降到 $\Delta x = 0$ 处值的 70%, 87%, 96% 和 20%, 60%, 70%。

以上提供的是初步实验结果。特别是除去 $\Delta x = 0$ 外, 当聚焦深入到靶内部, 是否存在另外的位置, 对应于电子温度、激光反射率或中子输出有异常情况(最大或最小值), 还需进行更大量的实验才能作出判断。

五、讨 论

我们已进行了毫微秒激光脉冲辐照含氘等离子体的基本实验。所用的激光器的输出功率限制在万兆瓦级, 相应的靶面功率密度在 10^{13} — 10^{14} 瓦/厘米² 范围。诊断技术虽给出了中子产额、电子温度以及反向激光特性等数据, 但关于激光与靶相互作用的了解仍是初步的。在惯性约束方案中, 聚变点火所要求的激光器能量, 是反比于激光能量耦合给燃料中心的效率的四次方的^[6]。为此, 已有许多研究^[7,8]指出, 当功率密度增高($>10^{13}$ — 10^{14} 瓦/厘米²)时, 电磁辐射与等离子体间的一系列非线性相互作用, 将随着激光强度的增强而愈来愈起重要影响。例如, 在按经典理论得出的反射激光的截止密度层(对 1.06 微米, 电子的截止密度 $n_{ce} = 10^{21}$ /厘米³)附近, 激光将激发电子等离子体与离子声波的各种类型的不稳振荡, 对激光表现出反常型吸收, 如功率密度高出激发不稳定性阈值($\approx 10^{13}$ — 10^{14} 瓦/厘米²)一、两个数量级, 就可能在较大的区域引起振荡, 使得反常吸收成为吸收光能的主要机构, 以致降低靶对激光的反射率^[9]。另外, 激光功率密度足够大时, 还将在稀薄($n_e < n_{ce}$)的等离子体区域, 产生受激散射过程, 诸如受激喇曼与受激布里渊散射等, 这些受激过程也将对反射与吸收产生影响。如果激光功率密度更高, 电子的相对论效应与辐射压力等等也会显得重要起来。上述种种非线性相互作用都有待进一步深入研究。另外, 还应当指出, 在利用单束激光辐照含氘材料平面靶时所得到的中子, 并非起因于热核机制。已有实验^[10,11]表明, 等离子体中发射的非热快速氘核(如 ≥ 20 千电子伏), 将撞击周围等离子体中或附着在靶室壁、透镜等元件表面上的氘核而产生非热核束-靶中子。这些快离子的产生则与非线性加热机制有关。而中子的非热核性的表现, 往往是在快过程型中子探测中, 出现延迟的或发射时间明显宽于激光脉宽的中子信号。在本文所描述的实验中, 闪烁体探头(用千兆周示波器显示)所记录到的中子信号也有类似的性质, 同样表明中子的非热核起因。

参加部分工作的还有邓金、张振明、曹金州等同志。

参 考 文 献

- [1] 徐至展等, 激光 (5), (1979), 12.
- [2] 毕无忌等, 长春光学精密机械学院学报, 1(1980).
- [3] F. C. Jahoda *et al.*, *Phys. Rev.*, **119**(1960), 843.
- [4] K. Bückl *et al.*, "In Laser Interaction and Related Plasma Phenomena", Vol. 2(1972), 503.
- [5] D. W. Forslund *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **30**(1973), 739.

- [6] M. N. Rosenbluth, *Phys. Rev. Lett.*, **29**(1972), 565.
[7] K. A. Brueckner, KMSF-NP 5, (1972).
[8] R. E. Kidder, "In Physics of High Energy Density," (P. Caldirola, H. Knoepfel, eds), (1971), 306.
[9] K. Nishikawa, Proc. Japan-U.S. Seminar Laser Interaction With Matter, (1972).
[10] C. Yamanaka *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **32**(1974), 1038.
[11] G. H. McCall *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **30**(1973), 1116.

INVESTIGATION OF LASER HEATING OF PLASMAS

XU ZHI-ZHAN LI AN-MING CHEN SHI-SHEN LIN LI-HUANG LIANG XIANG-CHUN
OUYANG PIN BI WU-JI HOU SHING-FA YIN GUANG-YU
ZHANG SHU-GAN PAN CHENG-MING

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

ABSTRACT

We have studied the interaction between the 10^{10} W Nd glass laser pulses with a leading edge of about 1ns and several planar targets made of deuterium-contained materials. In our experiments, the neutron yields, electron temperature and various characteristics (such as reflectivity, temporal, spatial and spectral structure) of the backward-reflected laser light from the plasmas have been mainly measured.