

激光等离子体中透射光的某些光学性质

陈时胜 毕无忌 王笑琴 何兴法
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文报导了在激光热微球靶实验中,透射激光特性的一些测量结果。在精确调焦以及预脉冲较小的情况下,靶球透射像清晰。但是,在离焦以及预脉冲较大的情况下,图像变得模糊;用空间分辨的光谱方法测量结果表明,透射等离子体区的激光谱线明显地增宽,这种增宽对入射激光束是对称的,线宽从 2 \AA 被加宽到约 50 \AA 。

一、引 言

在激光辐照微球靶产生的高温等离子体中,后向反射激光的性质已有较详尽的研究^[1,2],在等离子体截止密度区发射的谐波($2\omega_0$)也有相当详细的全面的评述^[3]。但是,关于透射光性质的研究却未见报导。

本工作的目的在于研究激光在辐照微球靶时,透过等离子体后的透射激光的某些光学性质。

二、实 验

实验是在六束激光等离子体实验装置上进行的。实验中选用了六束亚毫微秒高功率玻璃激光系统^[4]中的一束,激光输出波长为 1.064μ ,脉宽(FWHM)为 100 ps ,每束输出能量约 10 J ,光束发散角在 0.5 mrad 内占总能量的 70% 。

打靶聚焦透镜为 $f/2$ 非球面透镜,焦长 $f=120\text{ mm}$,透镜弥散圆为 15μ ,靶镜调焦精度优于 10μ ,聚焦在微球靶上的对焦精度为 $10\mu^{[5]}$ 。靶室真空度最高达 10^{-3} torr ,实验是在 10^{-2} torr 真空条件下进行的。实验中所采用的光路系统示于图1中。

实验的步骤是,第三束输出的正向激光被非球面透镜 L_1 聚焦在微球靶上,透过靶球的光被半分光板 P 反射并进入卡计 C_{II} ,由卡计 C_I 与卡计 C_{II} 记录到的能量分别为 E_I 与 E_{II} ,定义其比率为 $\eta_{有靶} = E_{II}/E_I$;在无靶球的情况下,卡计 C_I 与卡计 C_{II} 接收到的能量分别为 E'_I 与 E'_{II} ,其比率为 $\eta_{无靶} = E'_{II}/E'_I$;由此得到被靶球阻挡的能量比率为

$$P = 1 - \eta_0 = 1 - \frac{\eta_{有靶}}{\eta_{无靶}}。$$

这种检测可判明调焦以及光束质量的变化。

透过半分光板 P 的光束再被一个 $f=4\text{ m}$ 的会聚透镜聚焦成像在照像暗盒 C 的胶面上, 像的放大率为 33 倍。在光谱实验中, 是将靶球成像在光栅摄谱仪的狭缝上。

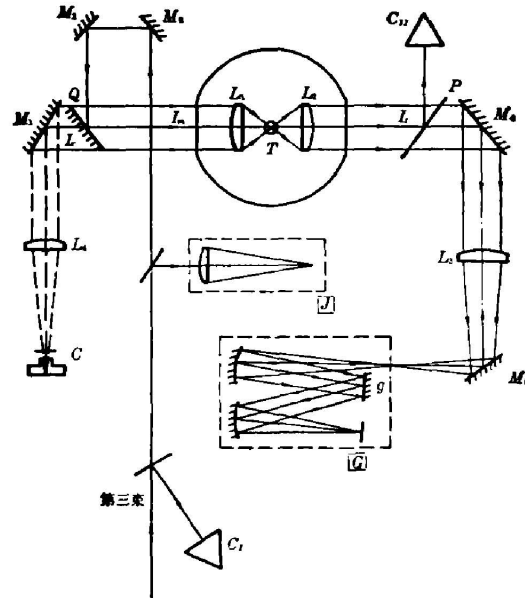


图 1 实验布置图

L_1, L_2 —非球面透镜 ($f=120\text{ mm}$, $D/f=1/2$); L_3, L_4 —成像透镜 ($f=4000\text{ mm}$);
 T —靶球; C —反射像照相机; G —光栅摄谱仪 (g —光栅); J —光束方位角监视仪;
 C_I, C_{IR} —激光能量卡计; P —半分光平板 (反射率 $R=50\%$, $\lambda=1.06\ \mu$); Q —微透
 分光平板 (透射率 $t=5\%$, $\lambda=1.06\ \mu$); I_{in} —入射激光束; I_r —反射激光束; I_t —透
 射激光束; M_1, M_2, M_3, M_4 — $1.06\ \mu$ 全反射镜

Fig. 1 The arrangement of experiment

L_1, L_2 —Aspherical lens ($f=120\text{ mm}$, $D/f=1/2$); L_3, L_4 —Image lens ($f=4000\text{ mm}$);
 T —Micro-balloon target; C —Reflected image camera; G —Grating spectroscopy
 (g —grating); J —An instrument used for monitoring laser beam direction;
 C_I, C_{IR} —Laser beam energy calorimeter; P —Laser beam splitter ($R=50\%$, $\lambda=1.06\ \mu$);
 Q —Laser beam splitter (small transmitting) ($t=5\%$, $\lambda=1.06\ \mu$); I_{in} —Input laser beam;
 I_r —Reflected laser beam; I_t —Transmitting laser beam; M_1, M_2, M_3, M_4 —Total reflected
 mirror at $1.06\ \mu$

三、实验结果

1. 靶球透射光的像

选用了不同直径的 CD_2 实心球和空心玻壳微球靶, 均调焦于球心处。结果在图 2 的一组照片中给出。图 2(a) 和 (c) 分别为 81424061 号和 81424053 号实心 CD_2 靶球透射光的像。前者 $\phi=70\ \mu$, $E_{out}=11.0\text{ J}$, 阻挡率=78%, 角漂移 $<5''$, 预脉冲/主脉冲 $=6 \times 10^{-6}$; 后者为 $\phi=60\ \mu$, $E_{out}=11.3\text{ J}$, 阻挡率=70%, 角漂移 $<5''$, 预脉冲/主脉冲 $\sim 5 \times 10^{-5}$ 。图 2(b) 为 81424060 号空心玻壳靶, $\phi=60\ \mu$, $E_{out}=7.5\text{ J}$, 阻挡率=74%, 角漂移 $=10''$, 预脉冲/主脉冲 $\sim 3 \times 10^{-5}$ 。

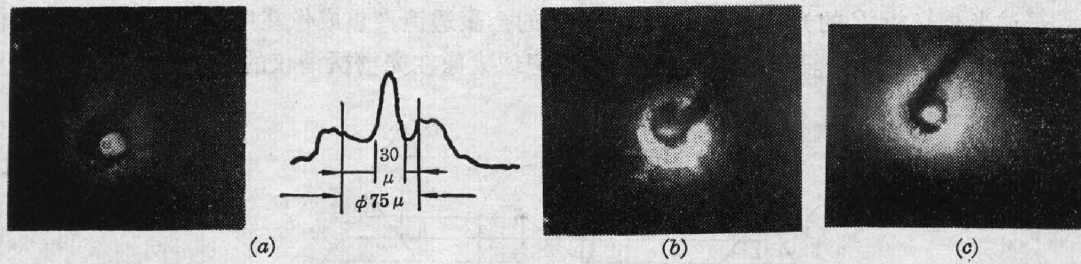


图 2 靶球透射光的像

(a) 81424061 号光像和显微密度扫迹; (b) 81424060 号光像照片; (c) 81424053 号光像照片

Fig. 2 Image of target's transmitting light

(a) No. 81424061 photograph of light image and it's micro-densitometer tracing;

(b) No. 81424060 photograph; (c) No. 81424053 photograph

2. 调焦的影响

由于透镜 L_2 与 L_3 是将靶球成像于照像机胶面上, 调焦时只改变打靶聚焦透镜 L_1 的位置, 靶球位置是确定的, 因而调焦将使靶面上功率密度分布改变, 图 3(a) 左示出 81422038 号空心玻璃壳靶, $\phi = 70 \mu$, 调焦到离靶心 150μ 处拍摄的照片, 输出能量 $E_{out} = 10.6 \text{ J}$, 角漂移 $= 10''$, 阻挡率 $= 55\%$, 预脉冲/主脉冲 $\sim 3 \times 10^{-5}$, 右为其显微密度扫迹。

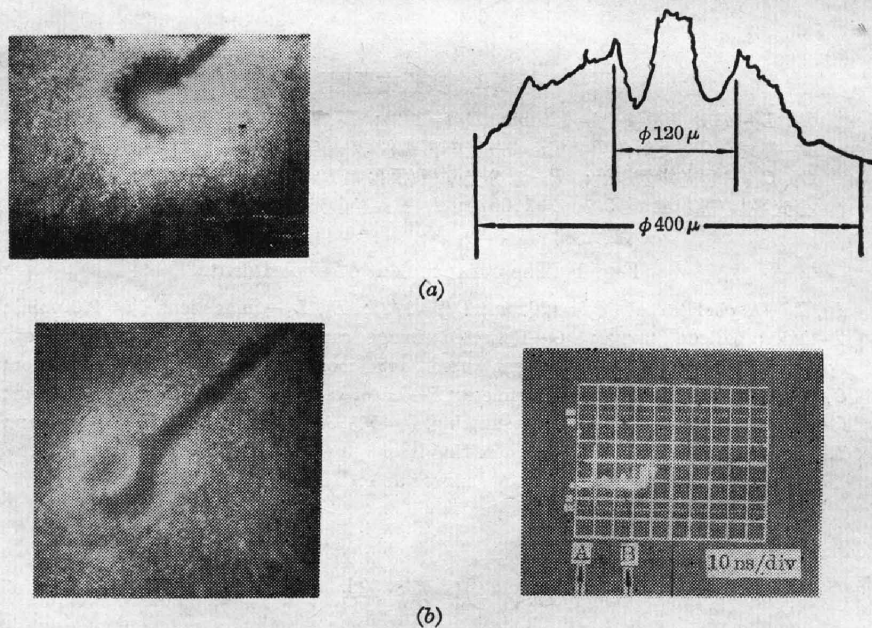


图 3

(a) 左为光像照片, 右为显微密度扫迹; (b) 左为光像照片, 右为示波图

Fig. 3

(a) left: photograph of light image, right: it's micro-densitometer tracing; (b) left: photograph of light image, right: it's oscillogram (the calibrating pulse is indicated by arrow A, and the prepulse by arrow B)

3. 预脉冲的影响

预脉冲往往会将靶球预先电离形成较稀薄的等离子体, 当主激光到达时, 吸收减弱, 这

时靶球透射像变得模糊不清,光斑明显增大,透射光增强。图 3(b) 左给出一张代表性结果的照片。81424062 号空心玻壳靶, $\phi=70\mu$, 调焦于球心处, 输出能量 $E_{out}=7.0\text{J}$, 阻挡率 $=50\%$, 预脉冲/主脉冲 $\sim 6\times 10^{-4}$ 。右为示波图, 箭头 A 所示为定标脉冲, 箭头 B 所示为预脉冲(用光电二极管接收, 由 7904 示波器显示)。

4. 靶面焦斑能量分布

在无靶球的情况下, 我们拍摄了靶面焦点位置上的激光斑点能量分布。实验时以靶场波面模拟的 CWYAG 激光调焦于微球靶的球心, 然后将靶球移开, 光束从对面的第二路射出, 经共焦的非球面透镜 L_2 准直, 准直后的光束被 $f=4\text{m}$ 的透镜 L_3 聚焦, 由红外相转换管精确地找出焦平面位置, 并在焦平面位置上拍摄激光焦斑的能量分布。其结果示于图 4 中。图 4(a) 上为 8141703 号, 调焦在靶球球心上时, 靶面焦斑的能量分布(焦斑直径 $\phi=80\mu$)。下为其显微密度扫迹。图 4(b) 上为调焦离球心 100μ , 焦斑直径 $\phi=115\mu$ ($E_{out}=10.2\text{J}/100\text{ps}$), 下为其显微密度扫迹。图 4(c) 上为调焦离球心 200μ , 焦斑直径 $\phi=140\mu$ ($E_{out}=9.5\text{J}/100\text{ps}$), 下为其显微密度扫迹。

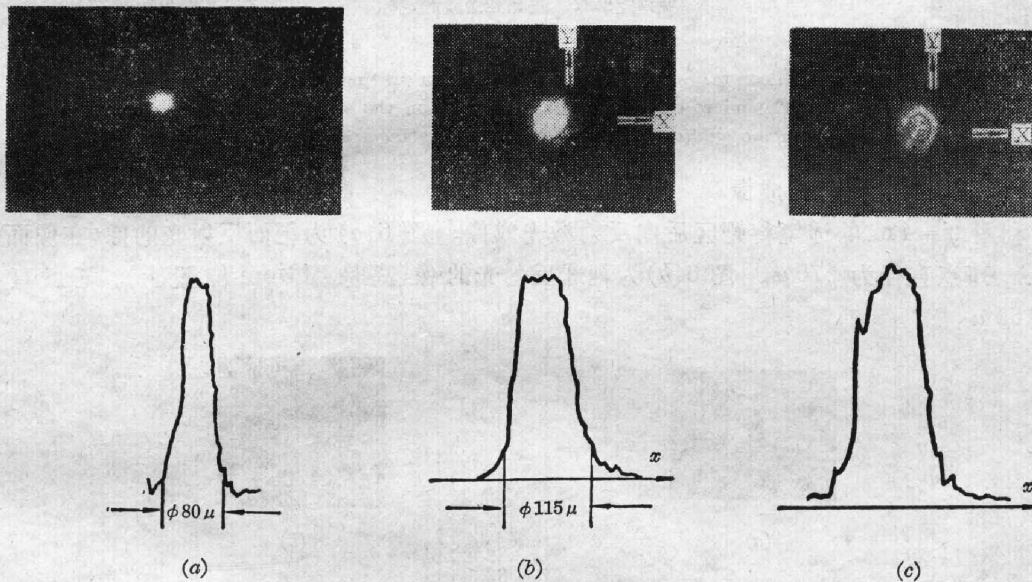


图 4

(a) 上图为光像的能量分布, 下图为其显微密度扫迹; (b) 上图为光像照片, 下图为其显微密度扫迹; (c) 上图为光像照片, 下图为其显微密度扫迹

Fig. 4

(a) upper: the energy distribution of light image, lower: it's micro-densitometer tracing;
(b) upper: photograph of light image, lower: it's micro-densitometer tracing; (c) upper: photograph of light image, lower: it's micro-densitometer tracing

5. 靶球透射光的光谱性质

选用一台焦长 $f=1300\text{mm}$ 的平面光栅摄谱仪, 其线色散为 $14\text{\AA}/\text{mm}$ 。用 $f=4\text{m}$ 的透镜将靶球成像在光谱仪的狭缝上。结果示于图 5(a)、(b) 中。图 5(a) 为 $\phi 75\mu$ 玻壳靶结果, 调焦于球心处, $E_{out}=4.8\text{J}$, 光束角漂移 $=5''$ [经 $f=4\text{m}$ 透镜将靶球成像在光谱仪狭缝上, 但狭缝被移开。从图中看到中心的圆点已被色散展开(箭头所指者), 表明中心区光谱已

被加宽]。图 5(b) 为 $\phi 100 \mu$ 玻壳靶结果, 聚焦在球心上。 $E_{out} = 5.7 \text{ J}$, 角漂移 = $5''$ 。(经 $f = 4 \text{ m}$ 透镜将靶球成像在光栅摄谱仪狭缝上, 狭缝宽度为 100μ)。图中箭头 A 所指为外光环光谱 1.06μ ; 箭头 B 所指为中心圆斑光谱, 已展宽约为 50 \AA 。图 5(c) 为波长定标光谱(用铷灯 5361 \AA 谱线的二级光谱定标), 箭头 A 所示为 1.064μ 激光光谱线; 箭头 B 所指为铷灯的 5361 \AA 的二级光谱 1.072μ 。

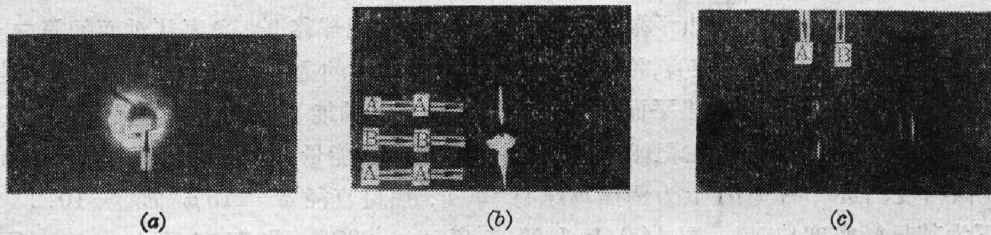


图 5

(a) 靶球在光谱仪狭缝处的像(狭缝被移开); (b) 靶球成像在宽度为 100μ 的狭缝上; (c) 激光光谱线的定标

Fig. 5

(a) The micro-balloon target is imaged on the slit of a grating spectroscopy (the slit is removed); (b) The micro-balloon target is imaged on the slit (100μ width) of the grating spectroscopy; (c) The wave length calibrating spectrum of laser beam

6. 靶区后向反射光成像

利用 $f = 4 \text{ m}$ 的透镜将靶区后向反射激光成像。图 6(a) 为靶面反射光的像(在像面位置上), 斑点直径为 $\phi 75 \mu$ 。图 6(b) 为靶球反射光的像(离像面 3 cm 位置上), 斑点直径 $\phi = 105 \mu$ 。



图 6

(a) 靶面反射光的像; (b) 靶球反射光的像

Fig. 6

(a) The image of the reflected light from target surface (spot diameter is 1.05μ); (b) The image of reflected light produced by micro-balloon target (spot diameter is 1.05μ)

四、结果的讨论

1. 靶球透射像

从靶球透射像中可以看出, 在预脉冲较小的情况下, 靶球的轮廓十分清晰, 中心区有一对称的圆斑, 外缘有一个强的对称光环, 其尺寸远大于实际焦斑尺寸。这表明外光环光线是由于光束受到等离子体的折射及散射的结果。此外, 外光环中, 光强呈明显的颗粒状分布,

其尺寸大约为几个微米大小,这种现象可能起因于光束通过低密度和冕区等离子体时,受到不均匀等离子体折射率的影响,产生光束的自聚成丝状。在文献[5]中,用计算机模拟了光束在球形等离子体中传播时,光线迹的分布。其透射光线迹的投影像与我们的结果一致。

在预脉冲较大的情况下,靶球边界轮廓不清,外光环明显扩大,这表明预脉冲已将靶球电离形成等离子体,当等离子体膨胀扩大后,主脉冲到达时,便受到等离子体的折射,因而边界模糊且尺寸变大。

2. 透射光的光谱结构

从空间分辨的光谱中(见图5(b))可明显地看出,中心圆斑对应的光谱从 2\AA 加宽到约 50\AA ,但外光环所对应的光谱无明显变化。这可能起因于中心圆斑的光束通过稠密等离子体时,受到自相位调制引起的。

根据自相位调制理论^[7],通过一种具有瞬态非线性折射率介质并沿 x 轴传播的平面电磁波,其相位移 $\Phi(x, t)$ 表示为

$$\Phi(x, t) = -\omega_0/c \int [n_0 + n_2 I(x, t)] dx.$$

其中, ω_0 为入射平面波的角频率, c 为真空中的光速。 n_0 为介质(在这里是等离子体)的线性折射率, n_2 为介质的非线性折射率系数。 $I(x, t)$ 为激光强度。令 $I(x, t) = I_0(x)F(t)$,其中 $I_0(x)$ 为激光强度的空间波型, $F(t)$ 为激光脉冲的时间变化因子。

由非线性折射率 n_2 引起的频率变化量 $\Delta\omega$ 为

$$\Delta\omega = -k_0 \int (n_2 I_0(x)/n_0) (\partial F/\partial t) dx, \quad (1)$$

其中, k_0 为真空中的光波波数,频率加宽正比于 $\int (I_0(x)\partial F(t)/\partial t) dx$ 。在等离子体中, n_0 与 n_2 是等离子体密度以及密度改变量的函数。

在准稳态自聚焦情况下, n_2 由下式给出^[7]

$$n_2 = (1 - n_0)/I_{nl}; \quad I_{nl} = 2(\epsilon_0/\mu_0)^{1/2} (m\omega_0^2/e^2) K T_e [1 + (T_i/ZT_e)], \quad (2)$$

其中, I_{nl} 为电子抖动能量与等离子体热能相当的区域内的激光强度。 $\epsilon_0, \mu_0, m, e, T_e, T_i$ 以及 Z 分别是真空中的电介质常数、导磁率、电子质量、电子电荷、电子温度、离子温度以及离子电荷数。 K 为玻尔兹曼常数。利用方程(1)与(2),便可得到

$$\Delta\omega = -k_0 (\partial F(t)/\partial t) (1/I_{nl}) \int [(I_0(x)/n_0(x)) - I_0(x)] dx;$$

在等离子体中, $n_0 \approx 10^{-2}$,于是上式近似为

$$\Delta\omega = -k_0 (\partial F(t)/\partial t) (1/I_{nl}) \int I_0(x) dx / n_0(x) \quad (n_0 \ll 1). \quad (3)$$

在激光等离子体中, $T_e > T_i$,对Si靶 $Z=14$,因此 I_{nl} 近似为

$$I_{nl} \approx 2(\epsilon_0/\mu_0)^{1/2} (m\omega_0^2 K T_e / e^2).$$

在本实验中,激光脉冲近似为高斯型脉冲,在脉冲峰值后的变化可表示为

$$F(t) = \exp(-t/\tau_0),$$

其中 τ_0 为脉冲强度下降到指数 e^{-1} 时的宽度。于是, $\partial F(t)/\partial t = \exp(-t/\tau_0)/\tau_0$ 。在脉冲上升阶段 $\partial F(t)/\partial t > 0$;在脉冲下降阶段 $\partial F(t)/\partial t < 0$;因而谱线是以入射谱线为中心向两

侧对称地加宽的。

实验中, $\lambda = 1.06 \mu$, $KT_e = 500 \text{ eV}$ (由 K 边多道 x 光谱仪测得), 靶面功率密度 $I_0 \approx 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 积分 $\int I_0(x) dx \approx I_0 x$, 取等离子体厚度 $x = 100 \mu$ (相当于靶球尺寸), $n_0 \approx 10^{-2}$ $\partial F(t)/\partial t = \exp(-t/\tau_0)/\tau_0 \approx 1/\tau_0 e$, $\tau_0 = 100 \text{ ps}$, 代入式(3)得:

$$\Delta\omega = (-k_0 \partial F(t)/I_n \partial t) \int I_0(x) dx / n_0$$

$$\approx -2\pi \times 10^{10} \times 10^{14} \times 10^2 \times 10^{-2} / 10^{-4} \times e \times 2.7 \times 10^{15} \approx -8.6 \times 10^{12} \text{ (rad/sec)}。$$

相应的谱线加宽量为: $\Delta\lambda = -\Delta\omega \lambda_0^2 / 2\pi c = 8.6 \times 10^{12} \times 10^{-8} / 2\pi \times 3 \times 10^{10} \approx 46 \text{ (\AA)}$ 。

脉冲后沿引起的向长波方向的谱线加宽大约为 46 \AA , 脉冲前沿引起的向短波方向的加宽大约也是 46 \AA , 整个谱线加宽量约为 90 \AA , 但实验值为 50 \AA , 两者有些偏差, 这种估算的误差主要来自等离子体区尺寸 x 的取值, 靶面功率密度的估值等。

激光透过等离子体而引起的谱线加宽的精确计算牵涉到的因素较多。以上估算的目的, 是用非线性光学中相位自调制的机制, 定性地解释透射光的谱线加宽现象。

四、结 论

利用透射像研究激光辐照微球靶时的性质是一种监测聚焦, 以及预脉冲能量对靶性质影响的有效方法, 这种方法可与其它物理量的测量一起, 对激光等离子体做出综合的评价。

空间分辨光谱的测量结果, 能够在某种程度上反映出等离子体中的非线性性质, 为了更深入地了解这种非线性过程, 应当采用另一束与打靶主激光同步的、频率上转换的探针光束, 使其通过等离子体后, 研究其光谱性质及其空间强度分布的变化。

参加本工作的还有戴美兰、竺庆春、谢怀加、韦小春、田莉等同志。

参 考 文 献

- [1] N. Moncur; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 6 (Jun), 1449.
- [2] 陈时胜等;《光学学报》, 1982, **2**, No. 2 (Apr), 105.
- [3] N. G. Basov *et al.*; *Soviet J. Q. E.*, 1979, **9**, No. 9 (Sep), 1081.
- [4] 邓锡铭等;《光学学报》, 1981, **1**, No. 4 (Jul), 289.
- [5] 毕无忌等;《长春光学精密机械学院学报》, 1980, No. 2, 47.
- [6] O. Willi *et al.*; *J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 9 (Sep), 1909.
- [7] S. A. Akhmanov *et al.*; *«Laser Handbook»* (edited by F. T. Arecchi, E. O. Schulz-Dubois, North-Holland, Amsterdam, 1972), Vol. 2, 1290.

The characters of the transmitting laser produced in laser heating micro-balloon targets

CHEN SHISHENG BI WUJI WANG XIAOQIN AND HE XINGFA
(Shanghai Institute of Optics and Fine mechanics, Academia Sinica)

(Received 8 October 1981, revised 26 December 1981)

Abstract

This paper reports some measurement results of the characters of the transmitting laser light produced in laser heating micro-balloon targets. The transmitting images of the micro-balloon targets are transparent in the case of accurate focusing and small prepulse. But its images are muddy in the case of defocusing and larger prepulse. The measurement results obtained by using the spatial resolve spectrum show that the spectrum of the transmitting laser light passed through the plasma is broadened clearly, the broadened spectrum line is central symmetry to the spectral line of the input laser beam, the width of the spectrum is broadened from 2 \AA to 50 \AA .