

强激光等离子体有关物理量的声学测量

邹 彪

陈建平 倪晓武

(蚌埠坦克学院基础部, 蚌埠, 233013) (南京理工大学应用物理系, 南京, 210094)

摘要: 利用强激光与材料(铝靶)相互作用过程中产生的激光等离子体声波对激光等离子体的有关物理量进行了测量。其结果与采用其它方法得到的结果基本吻合。

关键词: 高功率激光 激光等离子体 声学测量

Acoustic measurement of parameters of laser induced plasma on the target

Zou Biao

(Department of Teaching Research, Bengbu Tank College, the Chinese People's Liberation Army, Bengbu, 233013)

Chen Jianping, Ni Xiaowu

(Department of Applied Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

Abstract: In this paper some parameters of the plasma are measured by means of the acoustic waves produced by the interaction between high power laser and target materials. The test results are largely in accord with those from other methods.

Key words: high power laser laser plasma acoustic measurement

备,只要 1 根光纤的恢复特性足够好,能够迅速地消除由辐照所带来的影响,这根光纤就可以耐辐照,特别是太空辐照环境,不会立即给光纤造成永久性的辐照伤害,光纤的恢复特性直接决定了它的可耐辐照性。这样,我们不仅要从光纤辐照防护着手,还要从光纤本身的恢复特性着手来研制耐辐照光纤,这也就拓宽了我们研制耐辐照光纤的思路。

实验中使用的光源是白炽光源,波段范围很宽,因此,我们考虑的透过率是整个波段范围的整体效应,单色光辐照后透过率的研究,我们只进行了偏红外波段有限的几个波长,其它如紫光、红外光的实验正在筹划中。

本实验得到中国科学院上海原子核所辐射技术中试研究基地和上海嘉定原子核物理所辐照实验室的大力协助,两次实验是分别在这两处完成的,在此,特表谢意。

参 考 文 献

- 1 Friebele E J, Gingerich M E, Long K J. Appl Opt, 1982; 21: 547
- 2 Griscom D L. J A P, 1995; 77: 5008~ 5013
- 3 Leskovar B. IEEE Trans Nucl Sci, 1989; 36(1): 543~ 547
- 4 Nagasawa K, Tanabe M, Yahagi K. Japan J A P, 1984; 23: 1608~ 1613

* * *

作者简介: 刘 锐,男,1975 年出生。硕士研究生。从事光纤技术方面的研究。

殷宗敏,男,1939 年出生。教授,博导。现从事光纤技术等方面的研究。

引 言

高功率激光与材料相互作用过程中, 等离子体的测量手段一直是重要的研究内容之一。等离子体的测量方法很多, 如高速摄影法^[1], 双波长法^[2], 全息干涉法^[3], 光学干涉法^[4], 除光学干涉法外, 其它方法一般只能给出等离子体折射率分布、电子密度等参数, 而光学干涉法在进行条纹判读时比较困难。我们提出了利用探测激光等离子体声波, 再以此为突破口, 依据激光等离子体声波的形成机理、动量守恒、质量守恒、能量守恒等方程, 建立起测量激光等离子体温度、压强、密度等参量的方法。据知, 利用声学方法测量激光等离子体参数的工作, 目前尚无人进行。

高功率激光与材料表面相互作用时, 将在空气中激起激光等离子体冲击波。该冲击波的强度和传播速度等参量与作用激光的参数、靶材特征和周围介质的热力学特性都有密切关系, 这种关系可以用下式表示^[5]:

$$P_1/P_0 = 2\gamma M^2/(\gamma+1) - (\gamma-1)/(\gamma+1), L_1/L_0 = (\gamma+1)M^2[2 + (\gamma-1)M^2] \quad (1)$$

$$T_1/T_0 = 1 + 2(\gamma-1)(M-1)(\gamma+1/M)/(6\gamma+1)^2 \quad (2)$$

式中, M 为激光等离子体冲击波运动的马赫数; P_0, L_0 和 T_0 分别为冲击波波前介质的压强、密度和温度; P_1, L_1 和 T_1 分别为冲击波波后介质的压强、密度和温度; γ 为介质的绝热系数。

由于冲击波强度在初期衰减很快, 其半径扩展到厘米数量级后, 就已经衰减成声波^[6], 此声波称为激光等离子体声波^[7]。在这种距离上通过对声波声压的探测, 进而推算激光等离子体有关物理参数的方法称为激光等离子体的声学诊断法。我们讨论了用声换能器探测铝靶声波, 然后计算其激光等离子体的方法, 所得到的结果与参考文献[4]给出的结论基本吻合。

1 激光等离子体的声学测量原理

如果在激光等离子体声场中距源点为 r_m 的点 m 处测得激光等离子体声波的声压为 P_m , 则由(1)式可求出该点相应的马赫数 M_m 。而 M_m 与 r_m 和 P_0 之间的关系为^[7]:

$$M_m = \frac{1}{5} \frac{1}{\sqrt{R_0} r_m} \frac{\sqrt{E/(P_0 \gamma)}}{\sqrt{\ln(r_m/R_0) + 1}} + \frac{1}{5} \sqrt{\frac{E}{R_0 P_0 \gamma} \frac{1}{r_m^2 [\ln(r_m/R_0) + 1]}} + 25 \quad (R_0 \leq r_m < \infty) \quad (3)$$

$$R_0 = 1.6374 \times [E/(P_0 \gamma)]^{1/3} \quad (4)$$

式中, R_0 为激光等离子体冲击波衰减成声波的临界点, E 为激光等离子体能量, γ 为介质的绝热系数。由(3)式和(4)式即可求得 E , 然后代入下式^[7]:

$$M_p = \frac{1}{5} \left[\frac{E}{P_0 \gamma} \right]^{1/2} r^{-3/2} + \frac{1}{5} \left[\frac{E}{P_0 \gamma} r^{-3} + 25 \right]^{1/2} \quad (0 < r \leq R_0) \quad (5)$$

即可得到激光等离子体膨胀波面的运动马赫数 M_p 。式中, r 为波面距激光作用点的距离, γ 为绝热系数。

以上公式表示不同的激光脉冲与不同材料相互作用时, 所产生的等离子体的温度、压强等参数均不相同, 对应的等离子体能量也不同。也就是说, 不同的光脉冲与不同材料相互作用时产生声波的能量不同, 这是用声学方法测量的基础。

假设等离子体的最大膨胀半径为 d , 则可令(5)式中 r 的范围为 $0 < r \leq d$, 从而得到与 r 对应的等离子体膨胀波的马赫数 M_p 。再将 M_p 代入(1)式和(2)式, 即可得等离子体膨胀波面

的温度 T_p 、密度 L_p 和压强 P_p 的解析解。

设激光等离子体膨胀波面上, 等离子体对波长为 λ 的光的折射率为 n , 周围介质折射率为 n_0 , 等离子体的振荡频率为 ω_p , 电子密度为 N_e , 则有^[8]:

$$(n - 1)/L_1 = (n_0 - 1)/L_0 \quad (6)$$

$$\text{及}^{[4,8]}: n - 1 = -\omega_p^2 / (2\omega^2), N_e = -[(n - n_0) + (n_0 - 1)] / (4.49 \times 10^{-14} \lambda^2) \quad (7)$$

由(6)式和(7)式即可计算激光等离子体膨胀波面上等离子体的振荡频率和电子密度等。

2 实验条件与装置

2.1 实验条件

激光脉冲参数: 单脉冲激光能量 0~120mJ; 波长 0.53 μ m; 脉宽 15ns; 聚焦透镜焦距 15cm; 激光功率密度达~10⁹W/cm²; 光入射角 0°。

实验靶材为 f20mm×30mm 的端面平整的铝金属圆柱体。实验在 25℃ 空气中进行。

2.2 实验仪器

PHILIPS PM3394 200MHz 200ms/s 记忆示波器, 用以显示和存储声电换能器得到的电压脉冲数据。空气声换能器为 Panametrics 2.25/1.125MHz; 其工作原理是当声能作用于换能器接收表面时, 压电晶体将机械能转换为电能, 其作用是探测声压。同步触发用 PIN 管, 所用电源为 DC+45V。

2.3 实验装置

实验装置示意图如图 1。Nd:YAG 激光器 1 输出的激光束经透镜 3 聚焦于靶材 4 表面, 中间经过变换激光能量的可变衰减器 2, 聚焦透镜散射光的部分光能被光电管 5 所接收, 并作为示波器同步信号; 当激光等离子体声波传至声换能器 6 时, 声能转变为电能送到示波器 8 显示, 并将数据传至计算机 9 进行处理。7 为光电管 5 的电源。

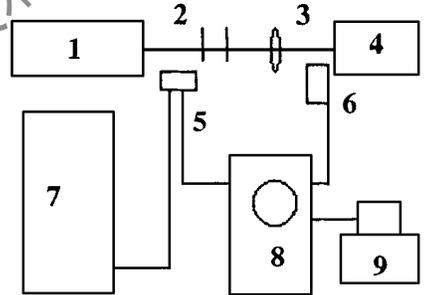


Fig. 1 Experiment setup

3 实验结果及处理

当作用激光能量为 80mJ、探测距离分别为 3cm, 4cm, 5cm, 6cm 时得到的激光等离子体声波图如图 2 所示。实验中所获取的每一组数据都是经过 8 次平均后得到的值。

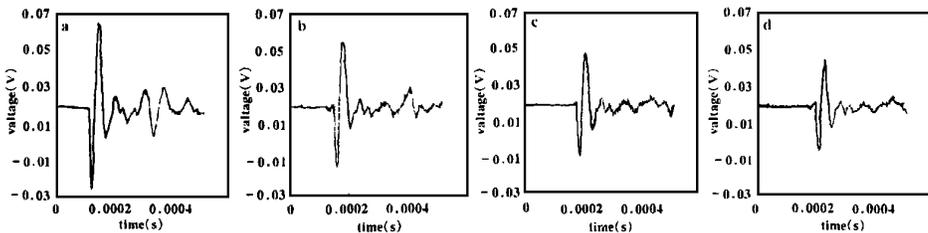


Fig. 2 Plasma acoustic waves at different detecting distances induced by laser on Al target surface ($E = 80\text{mJ}$, $\lambda = 0.53\mu\text{m}$, $\tau = 15\text{ns}$) a-3cm b-4cm c-5cm d-6cm

4 计算与结果

将图 2a 中有关的实验数据代入(1)~(7)式即可得到作用激光能量为 80mJ, 探测距离为 3cm 时, 铝靶表面的激光等离子体膨胀波面上的马赫数、相对压强、相对密度、相对温度、折射率(对波长为 $\lambda = 5.3 \times 10^{-5}$ cm 的光)和电子密度随距离的变化曲线(图 3); 由图可知, 其电子密度达 $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 数量级, 与文献[4]中激光能量为 78mJ 时的电子密度 $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 基本符合。

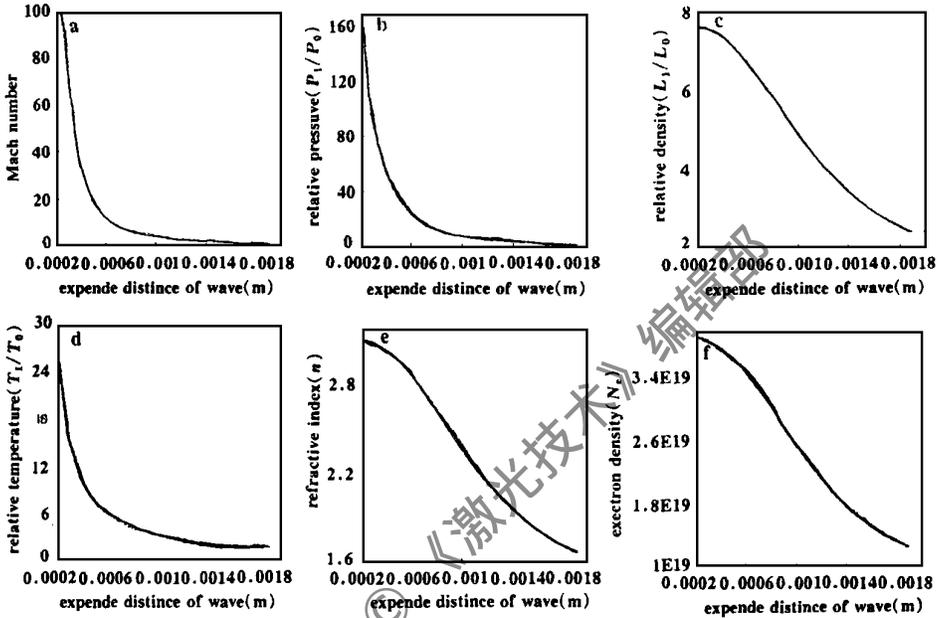


Fig. 3 The change of a—Mach number b—relative pressure c—relative density d—relative temperature e—refractive index f—electron density of laser induced plasma expanding waveform versus distance ($E = 80\text{mJ}$, $r_m = 3\text{cm}$)

利用我们提出的测试方法, 可获得激光与物质相互作用过程中有关物理量的测试结果, 所使用的测试原理清晰易懂, 测试过程简单, 可操作性强, 但是探测精度可能受到环境因素(噪声等)的影响, 若在实验室中进行则不失为定量探测激光与物质相互作用过程中有关物理量的一种有效方法。

参 考 文 献

- 1 Ready J F. Effects of high-power laser radiation. New York: Academic Press Inc, 1971: 163~ 164
- 2 曹尔妍, 王开绚. 中国激光, 1986; 13(1): 45~ 48
- 3 Cornolti F, Giulietti A, Giulietti D. Opt Commun, 1986; 57(4): 249~ 253
- 4 Lu J, Ni X W, He A Zh. Opt Commun, 1995; 120(2): 144~ 148
- 5 张连玉, 汪令羽, 苗瑞生编著. 爆炸气体动力学基础. 北京: 北京工业学院出版社, 1986: 317~ 319
- 6 邹 彪. 高功率激光与材料相互作用机理的声学诊断. 南京理工大学硕士学位论文, 1996
- 7 Ni X W, Zou B, Cheng J P *et al*. Acta Physica Sinica(Overseas Edition), 1998; 7(2): 143~ 147
- 8 陆 键, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学. 北京: 机械工业出版社, 1996: 87, 93

作者简介: 邹 彪, 男, 1963 年 6 月出生。讲师。主要从事教学和科研工作。