

激光等离子体的光学显微诊断

陈守华 徐毓光 张文琦

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文介绍用长光路象传递系统对激光等离子体进行光学显微诊断的实验结果。

Optical microdiagnosis of laser plasma

Chen Shouhua Xu Yuguang Zhang Wenqi

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

Abstract: The optical microdiagnostic experimental results are presented on laser plasma by means of an image transfer system with long optical path.

用光学的方法来研究激光等离子体在国外已开展多年,它可以获得激光与等离子体相互作用,激光在等离子体中的传输以及等离子体结构参数等多方面的信息。本实验是在本所六路钎玻璃激光系统^[1]上进行的。

光学系统

实验诊断光路如图1所示。A、B是入射主激光束,波长1.06微米,每束可聚焦功率约 0.5×10^{11} 瓦,脉宽100微微秒。用 $\frac{f}{2}$ 的非球面透镜将激光聚焦于靶丸,中心平均功率密度达 10^{15} 瓦/厘米²。用来产生激光等离子体的靶丸有二种,一种是氘化聚乙烯 $[(CD_2)_n]$,另一种是薄玻璃壳靶。等离子体的光学信息从反激光方向(D方向)和90°方向(E方向)引出,经放大成像导入专门暗室进行诊断。诊断项目包括等离子体对波长

1.06微米主激光脉冲的散射图象、等离子体的二次谐波(波长 5300 \AA)发光图象。显微成像放大倍数 $20 \times$,空间分辨率优于2.5微米。

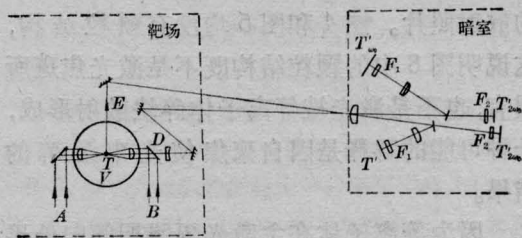


图 1

V—真空室; T—靶球; T'—靶球象面; F₁—黑色滤光片; F₂—5300 Å 干涉滤光片

强激光在等离子体中的丝状通道

只考虑有质动力的非线性效应,入射平面强激光束发生局部不稳增长的阈值功率密度是^[2]:

收稿日期:1980年6月16日。

$$p_1 = c\epsilon_0\lambda^2/8\pi\epsilon_2 a^2 \quad (1)$$

式中 c 是光速; $\epsilon_0 = 1 - \omega_p^2/\omega^2$, ω 是入射激光频率, $\omega_p = \left(\frac{4\pi n_0 e^2}{m}\right)^{1/2}$ 是等离子体频率; n_0 、 e 、 m 分别是电子的密度、电荷和质量; λ 是入射激光波长, a 是局部不稳区域线度; $\epsilon_2 = \frac{e^2}{2m\omega^2 kT} \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$, 其中 k 是玻尔兹曼常数, T 是电子温度。

设 $a = 10$ 微米, 对于不同数量级的 T 值, 分别画出阈值功率密度 p_1 与电子密度 n_0 的关系曲线如图 2, 虚线所框出的是我们目前实验中外围等离子体的参数范围, 说明可能见到自聚焦现象。图 3 是在反激光方向拍摄的等离子体的 1.06 微米波长的散射光图象, 它由二部分组成。中心是光斑核, 由正面激光束 (B 束) 从临界密度面反向散射形成, 大小约 $\phi 120$ 微米, 中心强区约 75 微米, 与焦斑结构大体相符。光斑的外光环由背面激光束 (A 束) 透过等离子体形成, 由放射型的群点组成, 颗粒结构十分显著, 每一斑点的平均尺寸约 5 微米, 斑点间的平均间距约 10 微米。图 4 是主激光束的焦斑照片。图 5 是从 90° 方向拍摄的等离子体对 1.06 微米激光的散射照片。图 4 和图 5 均没有颗粒结构, 这说明图 3 中的颗粒结构既不是激光焦斑所固有, 也不是激光被等离子体碎块散射形成, 一种可能的解释是因自聚焦使光束裂解的结果。

因为等离子体在主激光辐照期间向外迅

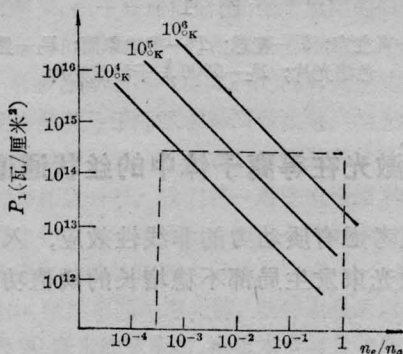


图 2

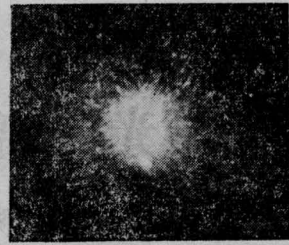


图 3

每束激光能量 9.4 焦耳; 薄玻壳靶 $\phi 64$ 微米; 壁厚 0.6 微米



图 4

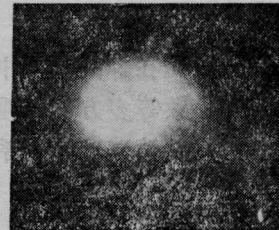


图 5

速膨胀, 表征丝状通道的颗粒结构呈现向外放射的形态。由放射线的长短和主激光的脉宽估算等离子体的膨胀速度, 数量级为 10^7 厘米/秒, 与其他方法测得的结果符合。

预脉冲的作用

激光振荡器的锁模脉冲有有限的信噪比, 以致在主激光脉冲到达靶球之前先有一定量的激光到达, 这就是预脉冲。预脉冲使靶丸在主激光到达之前烧熔膨胀, 从而破坏向心聚爆过程的实现。简单的计算表明, 对

于直径 70 微米、壁厚 1 微米的薄玻壳靶, 应力求将预脉冲抑制到 50 微焦耳以下。

从 90° 方向拍摄的等离子体对 1.06 微米主激光的散射照片, 可以形象地给出在预脉冲作用下靶丸熔化膨胀的情况, 图 6 就是一例。在成象光路中, 插入一块平行平板, 平板二个面的二次反射, 形成两重象的剪切迭合。图 6 中虚线勾出的是一个光斑的轮廓。图中剪切区域内清楚的干涉条纹特别值得注意, 它表明等离子体壳层结构在主激光脉冲到达不久就破裂了, 否则壳层膨胀运动微米就会使干涉条纹湮没。而对主激光束波面相干度的监测表明: 当单束能量甚大时(接近 10 焦耳), 激光束的空间相干度随时间变坏, 以致激光波前的时间积分剪切干涉花样完全湮没。所以图 6 所记录的只是前期主激光脉冲在等离子体壳层上的散射图象, 由于壳层结构迅即破碎, 后期主激光脉冲不能被散射到底片上。此外, 照片右面有一黑洞, 正对着入射主激光束, 它表征等离子体壳层结构最早破碎之处。与黑洞相对应的位置, 干涉条纹有明显的弯曲, 它说明在这个局部区域等离子体壳层的形状确实有陡的变化。图中虚线勾出的轮廓表示主脉冲到来时, 靶丸已烧熔膨胀到 170 微米左右, 预脉冲的脉宽有数毫微秒, 所以膨胀速度是 10^6 厘米/秒的数量级。



图 6

$E_A=13.5$ 焦耳; $E_B=15$ 焦耳; 薄玻壳靶 $\phi 62$ 微米; 壁厚 0.7 微米

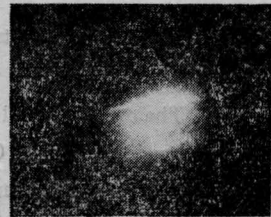
主激光光路中添置非线性饱和吸收染料盒(透过率 4×10^{-3})可以显著压制预脉冲量。

图 5 是抑制预脉冲后从 90° 方向所拍摄的等离子体对 1.06 微米主激光的散射照片。靶丸和激光能量参数与图 6 相仿, 但是除了光路中的剪切平板。图 5 表明减小预脉冲使靶球的前期熔化膨胀受到显著抑制, 靶丸轮廓清楚, 悬挂薄玻壳靶用的细玻璃丝也尚可辨认。照片中间的光核表示主激光脉冲开始辐照时的靶丸轮廓, 光斑的外沿表示主激光脉冲后期的临界面位置。由此估计临界面的外推速度为 3×10^7 厘米/秒, 与上节的结果相符。

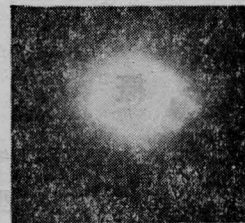
激光靶面焦斑结构的定性测量

用反激光方向的二次谐波(5320 Å)发光图象来测量焦斑结构是一种理想的方法。二

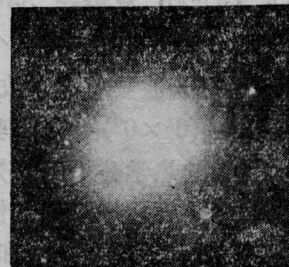
(下转第 22 页)



(a)



(b)



(c)

图 7

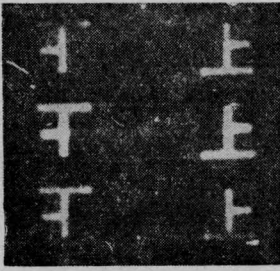


图6 位相修正后 Lohmann 全息图的再现象

计算机绘的图其尺寸是 500×500 毫米², 光缩 250 倍, 全息图尺寸是 2×2 毫米²。最好是光缩 500~1000 倍, 使全息图尺寸为 1×1

~ 0.5×0.5 毫米²。

再现现象是按夫琅和费衍射条件再现的, 见图 6。

参 考 文 献

- [1] B. R. Brown, A. W. Lohmann; *Appl. Opt.*, 1966, **5**, No. 6, 967.
- [2] A. W. Lohmann, D. P. Paris; *Appl. Opt.*, 1967, **6**, No. 10, 1739.
- [3] B. J. Thompson, J. B. Develis (Editors); "Developments in Holography", 1971, **25**, 43.
- [4] B. R. Brown, A. W. Lohmann; *IBM Journal of Research and Development*; 1969, **13**, No. 2, 160.

(上接第 25 页)

次谐波发射是在临界面处通过激光与等离子体纵波之间的耦合而产生的^[3], 它有一定的阈值, 因而反映了激光辐照的高强度区域; 又由于二次谐波波长短, 较少受到等离子体壳层偏折效应^[4]的影响, 所以能较准确地反映焦斑的结构。

图 7 的三张照片都是从反激光方向拍摄的二次谐波发光图象。均为 $(CD_2)_n$ 靶, 直径约 500 微米。照片(a)有能量最集中的焦斑, 虽然能量小(每束 4 焦耳), 但中子讯号颇强; 照片(b)的焦斑尺寸约 80 微米, 每束能量 16 焦耳, 中子讯号却比(a)小; 照片(c)焦斑尺寸最大(~150 微米), 虽每束能量达 17 焦耳,

但没有中子讯号输出。

上海光机所六路激光系统(包括靶场)全体同志为本工作提供实验条件; 王之江, 徐至展同志就本工作进行了有价值的讨论; 谨表谢意。参加本工作的还有戎忠华、田莉同志。

参 考 文 献

- [1] 徐至展等; 《物理学报》, 1980, **29**, No. 4, 439.
- [2] M. S. Sodha et al.; *Progress in Optics*, 1976, **X111**, 171~265.
- [3] A. V. Vinogradov, V. V. Pastovalov; *Sov. Phy. -JETP*, 1973, **36**, 492.
- [4] D. W. Sweeney et al.; *Appl. Opt.*, 1976, **15**, No. 5, 1126.