

利用多分幅光学探针诊断系统 研究激光等离子体*

江志明 徐至展¹⁾ 陈时胜 林礼煌 张伟清 钱爱娣

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

1988年1月4日收到

在六路钹玻璃激光等离子体实验装置上,建立了波长 $0.63\mu\text{m}$,脉宽 50ps 的多幅可见光探针诊断系统。利用该系统对激光产生的等离子体进行了干涉和阴影照相、干涉和法拉第旋转测量等分幅综合诊断研究,并且进行了五时间点分幅的干涉或阴影照相及条纹相机快速扫描诊断研究,得到了等离子体中电子密度轮廓的变化、不均匀性喷流结构、自生磁场等重要物理信息。

一、引 言

利用强激光辐照靶生成高温、高密度等离子体,是实现可控核聚变的一条探索途径,同时也为在实验室条件下研究高温、高压的物质状态提供了有效的手段。

激光生成的等离子体其空间尺度一般小于 1mm ,而时间尺度则在 ns — ps 量级内。因此,为精确诊断等离子体状态及其时间演化过程,需要有 μm 量级的空间分辨率和 ps 量级的时间分辨能力的诊断系统。

激光探针是目前激光等离子体诊断中最有力的高时空分辨的诊断手段之一。可见或紫外光波段的 ps 脉宽的光学探针,与光学干涉、阴影照相和纹影照相等手段结合起来,能够探测等离子体冕区的重要物理信息,如等离子体中的电子密度的空间分布^[1]、自生磁场^[2]、不均匀性喷流结构^[3]、等离子体中的不稳定性^[4]和靶流体力学效率^[5]等。精确调整光学探针与加热靶的激光脉冲间的时间延迟,就能获得这些物理信息的时间演化过程。

在本所六路钹玻璃激光等离子体实验装置上,我们建立了可见光探针系统^[6],进行了多分幅光探针诊断方法的研究,并用这些方法在激光等离子体性质的研究中得到了许多重要的物理结果。

二、可见激光探针系统

一些作者已报道了各种光学探针系统^[3,7]。对于几百微微秒脉宽的钹玻璃激光(波长

* 国家自然科学基金资助的课题。

1) 中国高等科学技术中心(世界实验室)凝聚态与辐射物理分中心。

1.06 μm) 打靶实验, 最简单可行的方法是从加热靶的主激光束中分出一部分作为产生探针光束的光源, 然后通过倍频和受激喇曼散射过程得到合适波长和脉宽的探针光脉冲^[3]。

在我们的实验中^[6], 采用受激喇曼后向散射过程, 取代了以往通常所用的前向散射, 以使探针光的脉宽得到更大的压窄, 提高探针诊断的时间分辨能力。探针光系统光路如图 1 所示。六路装置^[8]中的一路前几级激光放大器输出(1.06 μm ,

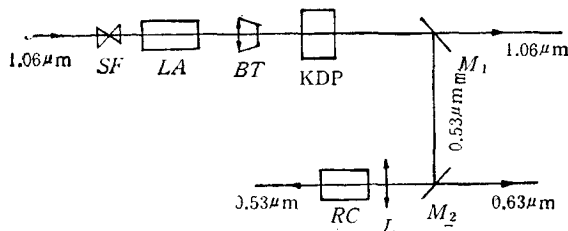


图 1 可见光探针光路图

BT——缩孔望远镜; KDP——倍频晶体; L——透镜; LA——激光放大器; M_1, M_2 ——专用反射镜; RC——喇曼盒; SF——空间滤波器

250—400ps (FWHM), 几百毫焦耳) 经过 KDP 晶体倍频和二甲亚砜($(\text{CH}_3)_2\text{SO}$) 液体的受激喇曼后向散射, 变成波长为 6298 $\text{\AA}$ 的探针光脉冲。用可见光条纹相机测量, 探针光脉宽在 50—100ps (FWHM), 即后向散射过程使光脉冲得到了很大的压缩, 明显地优于前向散射^[6]。虽然后向散射方式能量转换率较低, 探针光能量仅 200 μJ 左右, 但已足够使后面所述的多分幅诊断系统正常工作。

三、多分幅光学探针诊断

由于激光产生的等离子体具有运动速度快、持续时间短的特点, 要求在每次激光打靶中获得尽量多的信息, 以便减少激光参数不一致对探测结果的影响, 更准确地了解等离子体的运动过程和演变情况。为此发展了高速分幅诊断技术。用窄脉宽的探针光进行的高速分幅诊断主要包括两个方面: 其一是同时获得不同类型的图象, 如阴影图和干涉图, 这样能得到互为补充的结果, 有利于综合分析; 其二是多时间点的测量, 即得到不同时刻的等离子体图象, 能够完整准确地了解等离子体的演变过程, 减少激光参数不一致性的影响。根据诊断物理内容的需要, 设计和应用了几种分幅诊断系统, 并在实验中得到了激光等离子体的大量物理信息。

1. 阴影-干涉或干涉-法拉第旋转的同时测量

如图 2 所示, 在诊断光路中使用了一块 Rochon 棱镜作为分束器, 使垂直于加热激光入射的非偏振探针光成为二束光强大致相等的线偏振光, 这样就提供了偏振光干涉仪^[9]和法拉第旋转测量^[10]所需要的线偏振光。二束光中, 其中一束(a)供阴影照相或法拉第旋转测量使用, 另一束(b)则进入由一块 Wollaston 棱镜和检偏器构成的偏振光干涉仪, 获得等离子体干涉图。干涉图上的干涉条纹数据用 Abel 变换程序处理, 就能得到等离子体中电子密度的分布轮廓。

法拉第旋转方法是测量等离子体中自生直流磁场分布的有效方法, 它需要同时得到偏振光经过等离子体后偏振方向的改变和电子密度的分布轮廓。在图 2 的光路中增加一块起偏器 P' (图 2 中虚线所示), 就能满足测量要求。调整时, 旋转 P' 的方向使静态(打靶前)阴影图上没有象。当靶等离子体中出现自生磁场时, 探针光穿过等离子体后其偏振

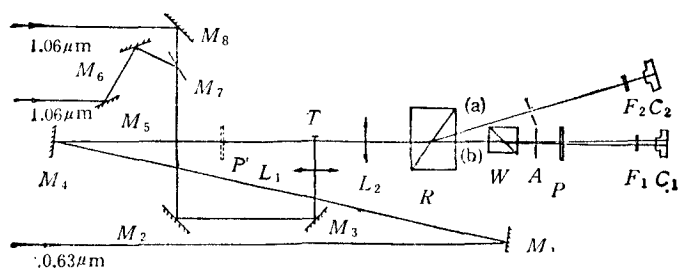


图2 等离子体阴影-干涉或干涉-法拉第旋转测量

A——光阑；C——照相机；F——干涉滤光片；L——透镜；M——专用反射镜；
P——偏振片；R——Rochon 棱镜；W——Wollaston 棱镜

面发生偏转，偏转部分被 Rochon 棱镜分出并由 C_2 接收，从而得到 0° 法拉第旋转图和干涉图。旋转 P' ，就能得到不同角度的法拉第图。

上述分幅测量方法结构很简单，采用合适的光学材料后能适用于很宽的波长范围。

用干涉和阴影诊断法研究了线状聚焦激光辐照金属平面靶所形成的等离子体状态。图3（见图版I）是在一次线状聚焦激光打靶实验中同时拍摄到的等离子体阴影图和干涉图。探针光的方向平行于2 mm长的焦线，探针光脉冲与打靶光脉冲峰值间的延迟时间 $\Delta t = 2.9 \text{ ns}$ 。

从阴影图（图3(a)）中可以看出，在热等离子体与冷的固体靶面交界处，形成了大尺度的类似于“牛角尖”状的等离子体喷流结构。喷流的平均膨胀速度约为 $6.0 \times 10^6 \text{ cm/s}$ ，比背景等离子体的速度高两倍以上。而从干涉图上围绕喷流的干涉条纹花样可以知道，喷流内部的电子密度要比周围密度高许多。这种“牛角尖”状的喷流结构可能是由于高温等离子体与冷的固体靶间的相互作用，如离子溅射等原因引起的。然而，它对等离子体的均匀状态产生了很大的破坏作用，会对利用线状聚焦激光产生的线状等离子体作为增益介质，实现X射线激光发射的方法带来“增益损耗”^[11]，有必要做进一步细致的研究。

实验表明，激光等离子体中自生直流磁场的产生不仅与靶的材料和结构尺寸有关，而且也与激光功率密度、脉冲宽度有关。功率密度越高，磁场也就越强。图4（见图版I）是用前述诊断系统在一次打靶实验中同时拍摄到的 5° 法拉第偏振图（a）和干涉图（b）。点状聚焦的激光功率密度为 $6.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 。由于功率密度并不很高，围绕入射光轴的大尺度直流磁场^[12]并不很显著。但是，在等离子体边缘的密度不均匀结构附近，则有较明显的直流磁场，幅值约0.1兆高斯以下，其空间尺度与不均匀性结构相当。这种较小尺度的直流磁场的存在，能在局部范围影响等离子体的热传导过程，造成异常输运，影响等离子体的发展状态^[12]。

2. 多时间点的分幅测量

在研究等离子体的动力学行为或者是等离子体中不均匀性结构的时间演变过程等实验中，采用多时间点分幅测量技术得到一系列随时间变化的干涉图或阴影图，显得尤为重要。在图2的基础上稍加改动，即能得到双时间分幅的干涉图^[13]。当探针光能量足够大时，我们可以进一步提高分幅数。利用普通照相机上的五棱镜，实现了五时间点分幅的等离子体干涉或阴影照相诊断。

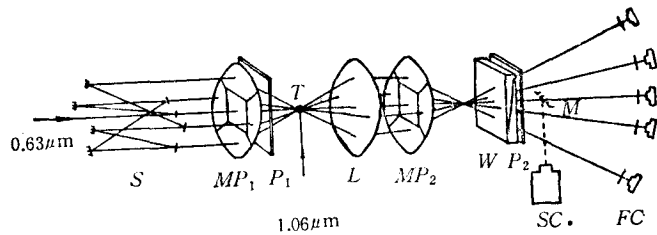


图5 五时间点分幅诊断光路图

C——照相机; F——干涉滤光片 M——反射镜; MP——五棱镜; L——透镜;
P——偏振片; S——部分透射镜和反射镜列阵; W——Wollaston 棱镜

五时间点分幅诊断光路如图5所示。探针光经过一对部分透射镜和反射镜列阵后,分成五束强度相等的探针光束,它们彼此间的时间延迟可根据实验需要调节,由可见光条纹相机测定。五束光由一个五棱镜(MP_1)会聚到等离子体靶上,然后由第二个五棱镜(MP_2)和透镜(L)的组合系统分别成像到五架照相机上,从而获得五幅不同时刻的干涉图。除去构成偏振光干涉仪的元件(P_1 , P_2 和 W),则可得到五幅不同时刻的阴影图。

图6(见图版II)是用该系统拍摄到的典型的等离子体干涉图。其中,靶为 $10\mu\text{m}$ 厚的钴箔,打靶激光功率密度为 $4 \times 10^{14}\text{ W/cm}^2$ 。探针光与打靶光间的延迟时间见图下标识。由于五束光在空间呈梅花状对称分布,经过棱镜后四侧光线与中心光线成 9° 角,形成三幅图[图6(a), (c), (e)]的诊断方向平行于靶面,而另两幅[图6(b), (d)]则与靶面成 9° 角。因此,在平面靶实验中,该两幅图的部分信息被靶阻挡了。但在球靶或柱靶实验中,则影响较小。

从图6中干涉条纹的变化情况可以得到等离子体的时间演化过程和电子密度的变化情况。对于图6(c),干涉条纹清晰且条纹密度大,这反映了在 $\Delta t = 2.8\text{ ns}$ 时等离子体处于相对稳定的状态,电子密度分布平坦。之后,由于等离子体膨胀,尺寸增大,电子密度降低。

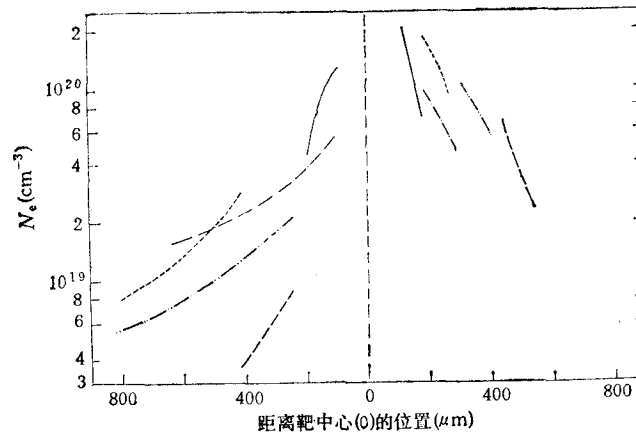


图7 采用 Abel 变换技术从图6的干涉图中得到的电子密度沿轴向分布及其随时间的演化
右上角给出了典型的数据误差范围。激光从左向右入射,中心位置为靶
—— 为 0.61 ns ; ---- 为 1.41 ns ; - · - · - 为 2.81 ns ;
- - - - - 为 4.11 ns ; — · — 为 5.21 ns

假设等离子体的分布是相对于入射激光轴中心对称后,用 Abel 变换技术来处理干涉数据,得到了不同时刻电子密度的分布轮廓.图 7 给出了沿激光入射方向的电子密度分布随时间的变化.电子密度的分布轮廓及其时间演变,包含了激光与等离子体相互作用的大量的物理过程.诸如激光能量吸收、能量输运过程.把电子密度的实际分布与计算机模拟结果相比较,就能得到这些过程的定量结果^[14].

五时间点分幅照相系统不仅适用于激光与等离子体相互作用的诊断研究上,也可以方便地运用到其它小型对称物体的超高速诊断上,确定高速运动物体的状态,并且可以进一步提高分幅数.上述五分幅照相系统中由于采用了五棱镜引进了象散,对成像质量有所影响.若将透镜和五棱镜组合系统用五个相同的小透镜组取代,则能大大地提高象的质量.此系统的研究正在进行中.

3. 可见光条纹相机扫描诊断

五时间点分幅诊断系统的时间分辨率由探针光的脉宽所决定.如果采用高速可见光条纹相机,选取五幅中的一幅图象进行时间扫描,就能得到高时间分辨的等离子体连续变化的信息.显然,在这种条件下,探针光的脉宽不再成为时间分辨的限制,将由条纹相机的时间分辨决定.较宽的探针光脉冲反而能得到较长时间范围内等离子体的连续变化情况,它较多地用于激光等离子体的动力学特性的研究上^[14].我们采用了最高时间分辨率为 2ps 的可见光条纹相机进行了成像时间扫描诊断的实验.

如图 5 中虚线所示,选取第一束光路供条纹相机诊断,而其它则仍作为时间积分测量.图 8 是条纹相机得到的扫描阴影图象,其中靶为 $3.7\ \mu\text{m}$ 厚的铝箔,激光在靶面的功率密度为 $3.0 \times 10^4\ \text{W}/\text{cm}^2$.条纹相机的入口狭缝($30\ \mu\text{m}$ 宽)方向如图 8(b) 所示.从图 8 中

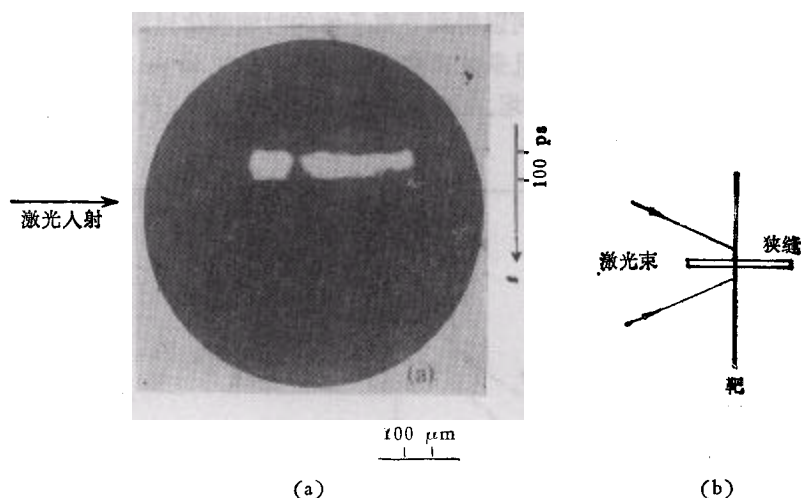


图 8 用条纹相机拍摄到的等离子体阴影图 (a) 点状聚焦激光功率密度为 $8.5 \times 10^{14}\ \text{W}/\text{cm}^2$; 探针光与主激光的峰值延迟时间为 110ps. (b) 表示条纹相机入口狭缝的方向和位置取法

可以看到,在延迟时间 $\Delta t = 210\text{ps}$ 左右时,等离子体在靶的前部和后部形成,并基本上是线性地向外膨胀,速度为 $1.3 \times 10^7\ \text{cm}/\text{s}$. 由于所用的探针光脉冲宽度较窄,观察到的等离子体的时间变化范围不大,没有充分体现出条纹相机的优越性.这样,高时间分辨的时间积分诊断(用照相底片记录)和条纹相机扫描诊断对光探针的脉宽提出了不同的要求.

四、小 结

用光学探针多分幅诊断方法研究等离子体的性质能够比单幅诊断得到更多、更精确的物理信息,减少了激光打靶参数不一致性的影响。采用上述方法得到了有关电子密度轮廓变化及其时间演化、自生磁场,特别是等离子体中大尺度喷流结构等激光与等离子体相互作用研究中的重要信息。如果将上述方法运用到紫外波段的光学探针诊断上,则能研究更高密度的等离子体区的状态性质。条纹相机的运用不仅提高了时间分辨率,并且它的图象是随时间连续变化的,更适合于实验值与理论值的比较。

作者特别感谢本所六路激光等离子体装置运行组对本工作的支持和协助。

- [1] A. Raven and O. Willi, *Phys. Rev. Lett.*, **43**(1977), 278.
- [2] J. A. Stamper and B. H. Ripin, *Phys. Rev. Lett.*, **34**(1975), 138.
- [3] O. Willi *et al.*, *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-17**(1981), 1909.
- [4] J. Grun *et al.*, *Phys. Fluids*, **26**(1983), 588.
- [5] G. Thiell and B. Meyer, *Laser & Particle Beams*, 3, pt. 1, 51(1985).
- [6] 江志明等,核聚变与等离子体物理, **7**(1987),127.
- [7] Maaswinkel *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **55**(1984), 48.
- [8] 徐至展等,中国物理, **1**(1981),548.
- [9] R. Benattar, C. Popovics and R. Sigel, *Rev. Sci. Instrum.*, **50**(1979), 1583.
- [10] 项志遴、俞昌旋,高温等离子体诊断技术,上海科学技术出版社, (1983),73 页.
- [11] H. R. Griem, *Phys. Rev.*, **A33**(1986), 3580.
- [12] C. E. Max, *Laser-plasma Interaction*, ed. by R. Batin and J. Ad J. Adam, (1982), p. 305.
- [13] 江志明等,中国激光, **14**(1987),247.
- [14] R. Benattar *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **42**(1979), 766.

INVESTIGATION OF LASER-PRODUCED PLASMA USING MULTI-FRAME OPTICAL PROBING DIAGNOSTICS

JIANG ZHI-MING XU ZHI-ZHAN CHEN SHI-SHENG LIN LI-HUANG

ZHANG WEI-QING QIAN AI-DI

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

ABSTRACT

In the six Nd:glass laser facility, a multi-frame optical diagnostic system with a 0.63 μm , 50 ps (FWHM) probing beam is set up. We use this system to investigate the states of laser-produced plasmas by means of simultaneous measurements of interferometry and shadowgraphy or Faraday rotation. Moreover, we have used five-time-frame interferometry or shadowgraphy and streaked shadowgraphy in our experiments. The results such as electron density profiles and their evolution, inhomogeneous plasma jet structure and self-generated magnetic field are obtained.