

文章编号: 1001-4322(2002)02-0254-03

等离子体电子密度诊断的全息干涉法^{*}

彭能岭^{1,2}, 李文洪², 江少恩², 袁晓东², 唐 军², 刘永刚²

(1 四川大学 原子分子物理研究所, 四川 成都 610065; 2 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 全息干涉是诊断激光等离子体电子密度的一个有效测量方法, 它具有高时空分辨率的特点。介绍了在“星光 II”条件下设计的紫外皮秒紫外全息干涉系统的原理, 在研究 Abel 反演算法的基础上, 利用自行研制的基于 Windows 操作系统的实验数据处理软件对实验数据进行了处理和分析。

关键词: 激光探针; 全息干涉; 阿贝尔方程

中图分类号: TL 653; O 536

文献标识码: A

激光探针是激光等离子体冕区物理过程研究中十分重要的诊断手段, 可在短时间内“冻结”高速运动的等离子体像, 从而获取许多重要物理信息, 如等离子体电子密度的空间分布、等离子体中的不稳定性等。全息干涉是诊断激光等离子体电子密度的一个有力方法, 它具有高时空分辨率的特点^[1]。全息干涉系统采用两次曝光法记录等离子体运动图像, 一次记录加热主激光脉冲到达前的静态全息像, 另一次记录形成等离子体飞散过程的“动态”像。当探针光束经过变化的等离子体区域时, 由电子密度的变化引起折射率的变化, 探针光束通过这个区域产生的光程有所不同。再现时, 利用可见光激光器沿参考光路方向进行照明, 结果沿物光方向传播的两幅全息图在因等离子体引入光程差后将发生相互干涉, 从而把等离子体电子密度的变化情况在全息图上以条纹的形式反映出来。

1 实验原理和布局

实验原理图如图 1 所示。靶球受到来自主激光束 I 的照射, 紫外探针脉冲 II ($\lambda = 0.308 \mu\text{m}$) 的方向与其成一定角度。探针光分成具有一定时间间隔的双脉冲, 而且使主激光恰好在双脉冲间隙内轰击靶球。在同一张照相底片上第一次曝光时(主激光轰击靶球前)记录 1 张零全息图像, 第二次曝光时(主激光轰击靶球后)记录 1 张等离子体全息图像。再现时, 利用可见光激光器沿参考光路方向进行照明, 便可还原干涉图。

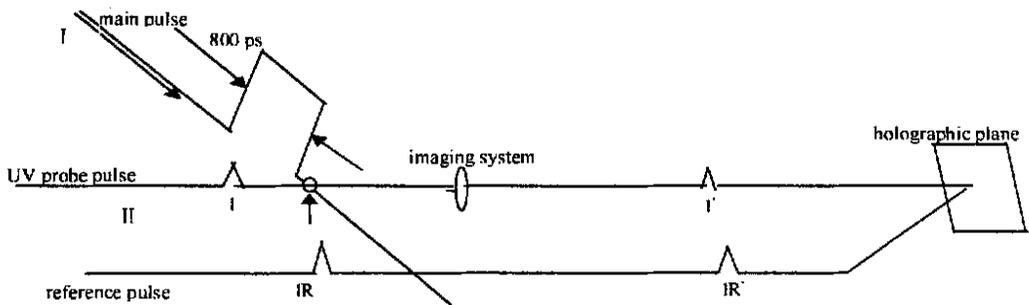


Fig. 1 Schematics of experimental principle

图 1 实验原理示意图

在“星光 II”激光装置条件下, 光源系统的实际输出能力仅为 Φ_{mm} , 约 $300 \mu\text{J}$ 。因此我们设计了单幅紫外皮秒激光探针全息干涉系统。根据光源系统的实际输出能力可对单幅系统进行一些改造, 使其成

* 收稿日期: 2001-11-29; 修订日期: 2002-01-14

基金项目: 国家 863 惯性约束聚变领域资助课题(863-416-3-4 2)

作者简介: 彭能岭(1977-), 男, 硕士生, 研究方向: 激光等离子体诊断及原子分子光谱研究, Email: pengnengling@263.net

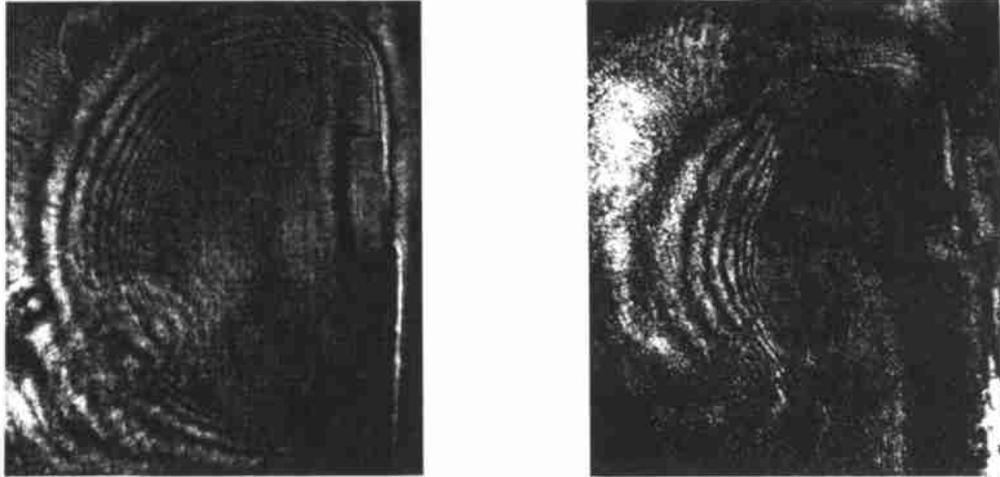
江少恩(1964-), 男, 研究员, 第一作者指导教师;

杨向东(1943-), 男, 教授, 博士生导师, 第一作者指导教师。

为四分幅紫外皮秒激光探针全息干涉系统。

2 实验结果和数据处理

实验靶型为圆盘靶, 实验获取的典型发次照片如图 2 所示。得到干涉条纹的分布后也就可以得到光程差的分布。所测图像为探针光通过等离子体后的二维图像, 图像上每一点强度都是沿光线传播路径的积分。在圆盘靶实验中, 等离子体往往具有轴对称性, 此时可利用著名的 Abel 变换及其逆变换求出等离子体电子密度的空间分布。Abel 变换示意图如图 3 所示。



target shot: 101205, Au disk target, $\Delta t = + 370\text{ps}$, $\tau = 90\text{ps}$ target shot: 102702, Au disk target, $\Delta t = + 370\text{ps}$, $\tau = 45\text{ps}$

Fig 2 interferogram obtained in experiments, where $\Delta t = + \times \times \times \text{ps}$ denote time that probe pulse delays main pulse and where τ denote probe pulse width

图 2 实验中获取的干涉条纹图像

等离子体电子密度满足关系式

$$2 \int_y^R n_e(r) \frac{rdr}{(r^2 - y^2)^{1/2}} = 2n_c D \lambda \tag{1}$$

式中: n_e 为等离子体电子密度; D 为干涉条纹移动个数; $\Psi(x) = D \lambda$ 即为光程差; $n_c = 1.113 \times 10^{21} \lambda^{-2} \text{cm}^{-3}$ 为探针光波长 λ 的临界密度, λ 为全息干涉的探针光波长, 以 μm 为单位。对式(1)进行逆 Abel 变换, 从而得到电子密度 n_e ^[2], 但事先无法确定光程差分布函数 $\Psi(x)$, 所以直接由逆 Abel 变换无法求得电子密度分布。这里我们将电子密度 n_e 用正交零阶 Bessel 函数系展开

$$n_e(r) = \sum_{i=1}^N a_i J_0(\mu_i r) \tag{2}$$

代入(1)式中, 在最小均方差的意义上可以获得关于展开系数 $\{a_i\}$ 的线性方程组^[3]

$$\sum_{i=1}^N a_i F_i(y_j) F_k(y_j) = \sum_{j=1}^M I(y_j) F_k(y_j) \tag{3}$$

其中

$$I(y_j) = 2n_c D \Psi(y_j) \tag{4}$$

$$F_i(y) = 2 \int_y^R J_0(\mu_i r) \frac{rdr}{(r^2 - y^2)^{1/2}} \tag{5}$$

按照求解一般线性方程组的方法解出系数组 $\{a_i\}$, 代入(2)式中, 即可得到电子密度 n_e 的表达式。

本工作研究 Abel 反演算法的数值计算精度可达到 1.6×10^{-5} 。在研究 Abel 反演算法的基础上, 编制了一套 Windows 环境下的实验数据处理软件, 计算处理获取的典型等离子体密度分布曲线如图 4 所

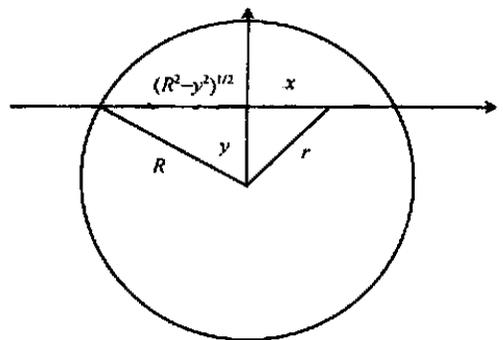


Fig 3 Schematics of Abel inversion, where x axis is probe direction

图 3 Abel 变换示意图

示。从图 4 可以看出, 等离子体电子密度在径向方向上逐渐减小, 在轴向上逐渐减小, 与激光等离子体膨胀模型符合, 验证了反演算法的正确性。

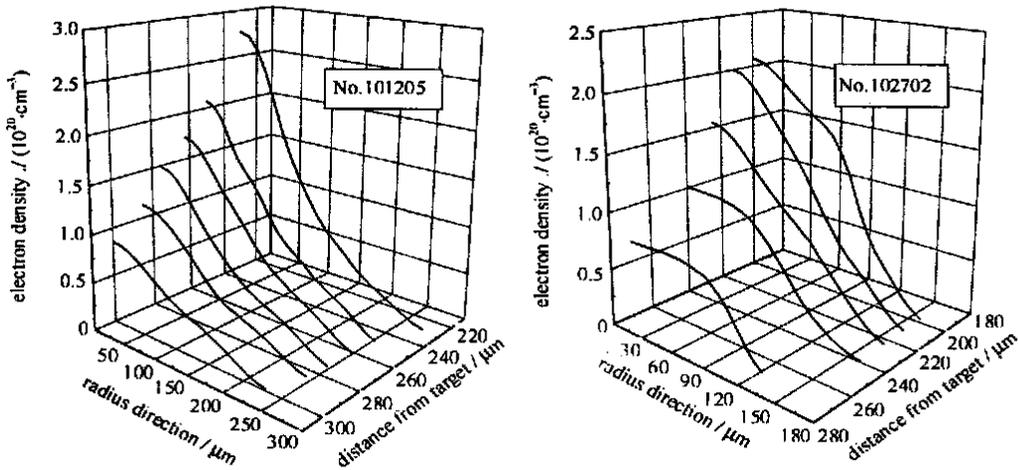


Fig. 4 Distribution of plasma electron density

图 4 等离子体电子密度分布曲线

3 结 语

数值模拟结果表明, 所探测的等离子体密度不超过对应于探针光临界密度的 $1/10$ 为宜, 本实验中所用探针光的波长约为 $0.3\mu\text{m}$, 其 0.1 倍的临界密度约为 $1 \times 10^{21}\text{cm}^{-3}$, 此即为能保证探测精度 (5×10^{-2}) 的电子密度的大致上限。实验表明, 光学系统必须具有足够大的汇聚孔径用于收集发生大角度偏折的折射光, 同时光学系统精确地聚焦在不均匀等离子体对称轴所在的平面上时, 可以大大减少折射误差。G E Bush, C L. Shepard 等人在八十年代中期作过同类实验^[1], 其性能指标为: 探针光脉宽 $15\sim 20\text{ps}$; 能量约 2mJ ; 幅间隔 $40\sim 200\text{ps}$; 物场空间分辨率 $1\mu\text{m}$, 可测等离子体密度 $0.6 \times 10^{21}\text{cm}^{-3}$ 。

参考文献:

- [1] Busch G E, Shepard C L, Siebert L D, et al Four-frame holographic probing system for plasma density measurement[J]. *Rev Sci Instrum*, 1985, **56**(5): 879—884
- [2] Buccellato R, Cunningham P F, Michaelis M M, et al Comparative electron density measurements for the refractive fringe diagnostic and Nomarski interferometry[J]. *Laser and Particle Beams*, 1992, **10**(4): 697—706
- [3] 郑坚, 俞昌旋, 李文洪, 等 全息干涉诊断等离子体电子密度的数值研究[J]. 强激光与粒子束, 1997, **9**(2): 173—177. (Zheng J, Yu C X, Li W H, et al Numerical study of measuring electron density with holographic interferometry. *High power laser and particle beams*, 1997, **9**(2): 173—177)

Holographic interferometry of plasma electron density diagnosis

PEN G Neng-ling^{1,2}, LI W en-hong², J IAN G Shao-en², YUAN Xiao-dong²,
TAN G Jun², LI U Yong-gang², YANG Xiang-dong¹

(1. *Atom and Molecule Physics Institute, Sichuan University, Chengdu 610065, China;*

2. *Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-986, Mianyang 621900, China)*

Abstract Holographic interferometry is an effective measurement method to diagnose the electronic density of laser plasma. It has very high temporal and spatial resolution. In this paper, ultraviolet Holographic interferometry system on "XG-II" is explained briefly, and the experimental results are presented. A window-s-based data processing software is developed.

Key words laser probe; holographic interferometry; Abel inversion