

二次曝光全息术对微波等离子体推进器羽流的 诊断及计算机模拟

冯伟¹ 李恩普^{1,*} 张琳¹ 范琦¹ 林榕²

(1 西北工业大学理学院, 西安 710072)

(2 西北工业大学航天学院, 西安 710072)

摘要 二次曝光全息术是诊断等离子体电子数密度的一个有效测量方法, 具有非接触式测量及不受等离子体发光干扰等优点. 根据阿贝尔变换公式, 通过计算机应用 matlab 程序数值模拟了各种不同电子数密度状态下的等离子体干涉图. 同时拍摄了航天器中微波等离子体推进器羽流的二次曝光全息图, 再现了不同状态下的干涉图样. 通过分析和对比两次干涉图, 得出了羽流的电子数密度.

关键词 二次曝光全息术; 等离子体; 羽流; 阿贝尔变换

中图分类号 O438.1; O53 **文献标识码** A

0 引言

小推力的微推进在航天器飞行过程中具有重要的意义, 目前的微推进主要包括液体推进、电推进以及固体推进. 由于比冲高、寿命长、体积小和污染轻等优点, 电推进中的微波等离子体推进器 (Microwave Plasma Thruster, 简称 MPT) 在国外已经广泛地应用到航天器中, 国内科研工作者也对 MPT 在航天器上的应用进行了探索性的地面研究工作^[1], 但作为等离子体羽流场的重要参量——电子数密度尚未定量测量. 测量等离子体电子数密度的方法主要有朗缪尔 (Langmuir) 探针法^[2]、差分发射探针^[3]、及二次曝光全息术^[4~6]等. 二次曝光激光全息术的非接触式测量以及不受等离子体发光的干扰特性, 使其在等离子体羽流的诊断中有着非常重要的意义. 但是二次曝光全息干涉图条纹的判读有一定的难度. 本文利用计算机模拟各种电子数密度状态下的干涉图样, 分析和对比模拟条纹与实际测量的干涉条纹, 方便快捷地得到了羽流的电子数密度.

1 基本原理

1.1 二次曝光检测的基本原理

二次曝光法是将初始物光波面与变化以后的物光波面相比较. 在记录过程中对一张全息干板作两次曝光, 一次记录初始物光波的全息图; 一次记录变化以后的物光波的全息图. 这两张全息图记录在同一张干板上, 记录时顺序也可以颠倒. 当用照明光波再现时, 可再现出两个物光波面, 这两个波面是相

干的, 可以观测到它们之间的干涉条纹. 通过干涉条纹的分布情况, 可以了解波面的变化.

设参考光波为 $r(x, y) = R_0 \exp [j\varphi_R(x, y)]$, 初始物光波为 $o(x, y) = O_0(x, y) \exp [j\varphi_0(x, y)]$, 变化以后的物光波 $o'(x, y) = O'_0(x, y) \exp \{j[\varphi_0(x, y) + \Delta\varphi_0(x, y)]\}$. 两次曝光的时间同时选择为 t , 则在线性记录条件下, 全息图的振幅透射系数 τ_H 与日落光量成正比, 即

$$\tau_H(x, y) \propto t(|o+r|^2 + |o'+r|^2) = t\{(O_0^2 + R_0^2) + O_0 R_0 \exp [j(\varphi_0 - \varphi_R)] + O_0 R_0 \exp [-j(\varphi_0 - \varphi_R)]\} + t\{(O_0'^2 + R_0^2) + O'_0 R_0 \exp [j(\varphi_0 + \Delta\varphi_0 - \varphi_R)] + O'_0 R_0 \exp [-j(\varphi_0 + \Delta\varphi_0 - \varphi_R)]\} \quad (1)$$

再现时候用原参考光波, 则再现光波为

$$i = t\{(O_0^2 + R_0^2)r + O_0 R_0^2 \exp [j\varphi_0] + O_0 R_0^2 \exp [-j(\varphi_0 - 2\varphi_R)] + (O_0'^2 + R_0^2)r + O'_0 R_0^2 \exp [j(\varphi_0 + \Delta\varphi_0)] + O'_0 R_0^2 \exp [-j(\varphi_0 + \Delta\varphi_0 - 2\varphi_R)]\} \quad (2)$$

式中第一、四项为直射光, 二、五项为原始象项, 三、六项为共轭象项. 现在只考虑原始象项. 其复振幅为 $A = t\{O_0 R_0^2 \exp [j\varphi_0] + O'_0 R_0^2 \exp [j(\varphi_0 + \Delta\varphi_0)]\}$, 考虑到位相物体, 对于 O' 的影响很小, 可以不考虑其变化, 忽略其他不重要的常数项, 则光强

$$\Phi \propto 1 + \cos [\Delta\varphi_0(x, y)] \quad (3)$$

通过这个公式可以看出, 条纹的形状完全取决于位相差函数 $\Delta\varphi_0(x, y)$.

1.2 全息检测等离子体的基本原理

由等离子体物理给出, 电子密度与折射率有如下关系

$$n_e = (1 - \frac{N_e e^2 \lambda^2}{2\pi m_e C^2}) = 1 - 4.46 \times 10^{-14} \lambda^2 N_e \quad (4)$$

式中 n_e 为等离子体的折射率; N_e 为电子数密度; e

* Tel: 029-88494083 Email: lienpu@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2004-06-23

为电荷; m_e 为电子质量; C 为光速; λ 为探测光的波长.

在实验中,由微波在谐振腔内击穿氩气,从而使氩气电离,形成等离子体,由喷口喷出,形状近似为锥体,探测光垂直于喷射方向穿过等离子体区域,如图 1(a). 在某一横截面内光线行迹如图 1(b),假设

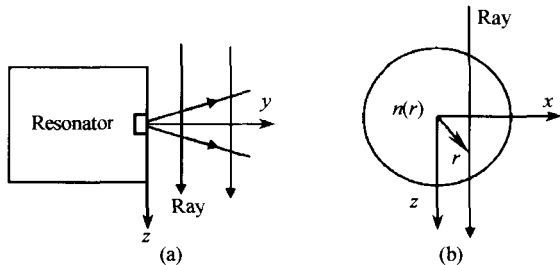


图 1 (a)等离子喷射;(b)光线在等离子体中的行迹
Fig. 1 (a)Abridged general view of plasma ejecting;
(b)Optical rays traversing a plasma field

其区域内为轴对称的位相场,则探测光经过位相介质后的光程为

$$\delta(x) = 2 \int_x^{r_0} (r^2 - x^2)^{-1/2} n(r) r dr \quad (5)$$

方程(5)是阿贝尔变换积分形式,折射率 $n(r)$ 就是它的阿贝尔变换

$$n(r) = (-1/\pi) \int_r^{r_0} (x^2 - r^2)^{-1/2} (d\delta/dr) dx \quad (6)$$

再现喷射电离氩气前后的二次曝光全息图,得到干涉条纹. 通过干涉条纹辨读出位相的变化,经过阿贝尔变换式(6),推导出其折射率的变化,代入式(4),就可以得到等离子体的电子数密度.

2 实验及模拟结果

实验装置如图 2,由 He-Ne 激光器发出激光,平

面镜 M_1 反射后,经半透半反镜 BS 分成两束,一束经 M_2 反射后扩束作为参考光,另一束经 M_3 反射后扩束,经过等离子体区域,在干板 H 处与参考光相干,干板记录两次全息图.

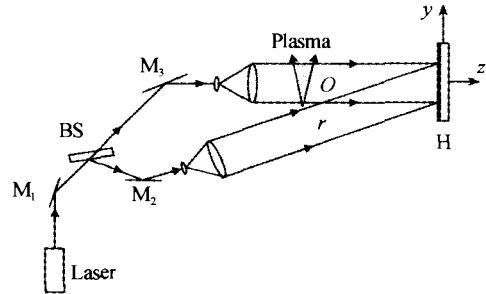


图 2 二次曝光实验图
Fig. 2 Setup of double-exposure hologram experiment

计算机模拟的算法是在已知等离子体的电子数密度、喷射角度的情况下,用 matlab 编写程序进行计算机仿真模拟,获得扰动前后两次物光波干涉叠加的条纹图像.

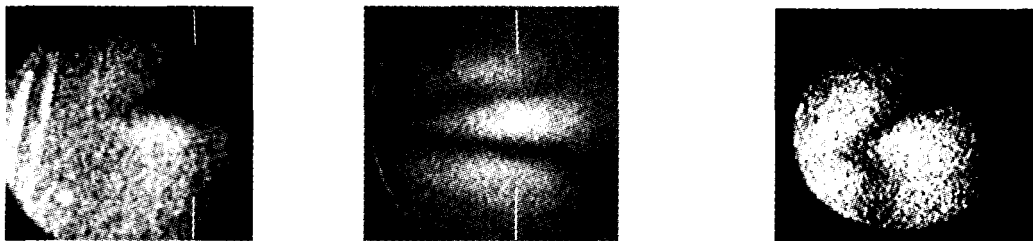
程序中,设平行光沿 z 轴传播,光波传播表达式简化为

$$E = E_0 \exp(jkz) \quad (7)$$

式中透过等离子体区域内的光波近似认为传播方向及强度不变,仅仅位相发生变化,其光波表达式为

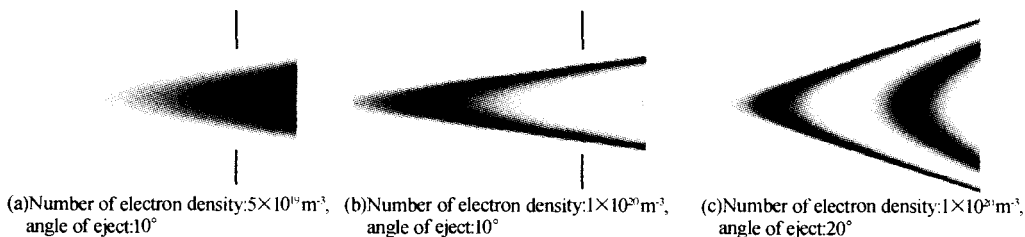
$$E_p = E_0 \exp(jkz_p) \quad (8)$$

式中 z_p 为经过等离子体后的光程. 在已知等离子体电子数密度情况下,利用式(4)、(5)计算出 z_p ,使两束光波干涉叠加,得到模拟的干涉图像. 在模拟过程中需要离散化,以方便计算机运算,在本程序中离散为 512×512 个象素点. 图 3 为再现的二次曝光等离子体的干涉图;图 4 为计算机模拟的结果.



(a) Power of microwave source: 30 W, object beam near the ejector nozzle
(b) Power of microwave source: 40 W, Distance of object beam and the ejector nozzle: 3 cm
(c) Power of microwave source: 40 W, Distance of object beam and the ejector nozzle: 5 cm

图 3 再现等离子体干涉图像
Fig. 3 Reproduced plasma's interferogram



(a) Number of electron density: $5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, angle of eject: 10°
(b) Number of electron density: $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, angle of eject: 10°
(c) Number of electron density: $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, angle of eject: 20°

图 4 计算机模拟干涉图像
Fig. 4 Simulation interferogram

对应地对比上面的两组图片,条纹分布基本吻合,其中某一截面(如图上竖线标识位置)的强度对比如图 5.

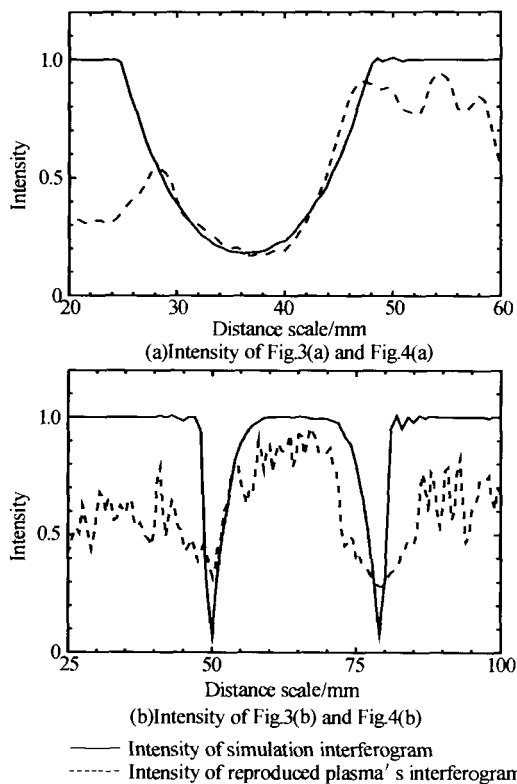


图 5 再现干涉图与模拟干涉图的强度对比

Fig. 5 Intensity contrast of reproduced plasma's interferogram and simulation interferogram

由图 5 的对比可以看出,在微波源功率为 30 W 的时候,干涉图像与电子数密度为 $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 的模拟图像的波谷以及宽度吻合;当功率增加到 40 W 时,干涉图像与电子数密度为 $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 的模拟图像的波谷以及两个波谷之间的距离吻合. 由于再现过程中,再现光束宽度以及激光散斑的影响,其峰值处出现不相等及振荡的现象,这对于条纹形状的辨读没有影响. 在 MPT 羽流远离喷口后,由于等离子体被空气中中和的原因,其曲线逐渐变形,与模拟的结果有一定的误差,但其基本形状与模拟的第二个干涉条纹一致. 由以上分析可以看出,计算机模拟在干扰比较小的情况下非常理想;对于外界干扰特性模拟,有待进一步研究.

3 结论

本文针对 MPT 拍摄了羽流等离子体的干涉图,利用计算机模拟得到了相同条件下的干涉图,对比得到 MPT 羽流的电子数密度. 电子数密度作为主要的参量,通过二次曝光全息术检测得到,为 MPT 的研究提供了有力的支持. 由以上分析可以看出,对比法简单快速,特别适用于一些比较理想的干涉测量中,但在干涉图不理想的情况下,对比法有一定的局限性.

现在,数字全息术正蓬勃发展,在实验中把干板记录改成 CCD 记录,计算机采集、处理干涉条纹,不但节省了曝光、干板冲洗的过程,而且可以把得到的干涉图直接与数据库中的干涉图进行比较,由相关算法,直接找到对应干涉图的电子数密度,为实时测量提供了有力的技术保证,现在正在实验研究中.

参考文献

- 1 韩先伟,毛根旺,何洪庆. 微波等离子体推力器真空羽流模拟计算. 固体火箭技术, 2002, 25(2): 21~24
Han X W, Mao G W, He H Q. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2002, 25(2): 21~24
- 2 Anisimovai, Vinogradovni, Golantue. Method of investigating electron spatial distribution in a plasma. *Soviet Phys-Tech Phys*, 1961, 6: 939~943
- 3 Wang E Y, Intrator T, Hershkovitz N. Direct indication technique of plasma potential with differential emissive probe. *Rev Sci Instrum*, 1985, 56(4): 519~524
- 4 Jahoda F C, Jeffries R A, Sawyer G A. Fractional-fringe holographic plasma interferometry. *Appl Opt*, 1967, 6(8): 1407~1410
- 5 丰善,王淑岩,王国志,等. 用脉冲激光全息干涉术测量稠密等离子体电子密度分布. 光子学报, 2001, 30(11): 1339~1342
Feng S H, Wang S Y, Wang G Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(11): 1339~1342
- 6 高益庆,龚勇清,赵希圣. 用正交光路全息干涉 CT 技术重建电弧等离子体三维温度场. 光子学报, 1998, 27(1): 24~28
Gao Y Q, Gong Y Q, Zhao X S. *Acta Photonica Sinica*, 1998, 27(1): 24~28

Double-exposed Holographic Interferometry Diagnose in Microwave Plasma Thruster's Plume and Simulation by Computer

Feng Wei¹, Li Enpu¹, Zhang Lin¹, Fan Qi¹, Lin Rong²

¹ School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

² College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

Received date: 2004-06-23

Abstract Double-exposed holographic interferometry is an effective means in the plasma number density of electronic diagnosis, for it has such merits as non-contact measurement and non-disturbance by plasma luminescence. According to Abel transform, simulated interferograms of various plasma's electron densities are obtained; by double-exposed holographic interferometry, interferograms of various spacecraft microwave plasma thruster's plumes are gotten. The electron density of plume is gained by analyzing and contrasting the measured interferograms and simulated ones.

Keywords Double-exposed holographic interferometry; Plasma; Plume; Abel transform

Feng wei was born in Dec. 1979. He graduated from Applied Physics Department of Northwestern Polytechnical University (NWPU). Now he is a master student in School of Science of NWPU. His interest focuses on double-exposed holographic interferometry.

