

有限宽全息干涉技术对等离子体电子密度的诊断

雷 岚 曹 娜 曹 亮 徐 青 韩长材 段宝军

西北核技术研究所, 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

摘要 利用Nd:YAG激光器产生的1064 nm激光束(光斑直径为100 μm , 脉冲能量为60 mJ, 脉冲宽度为200 ps)聚焦击穿大气形成激光大气等离子体。采用全息干涉技术对激光击穿空气等离子体的电子密度分布进行了诊断, 获得的无限宽条纹图直观反映了位移量的等位线, 从有限宽条纹图获得了电子密度的分布, 结果表明激光大气等离子体中各种离子和电子呈橄榄形分布, 即沿激光束方向不对称, 而垂直激光束方向对称分布, 且最大电子密度为 10^{18} cm^{-3} 量级。

关键词 全息; 激光大气等离子体; 电子密度; 全息干涉; 激光探针

中图分类号 TL 653; TN 247; TN 26 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0102008

Investigation on Plasma Electron Density Distribution with Finite Holographic Interferometry

Lei Lan Cao Na Cao Liang Xu Qing Han Changcai Duan Baojun

State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology,
Xi'an, Shaanxi 710024, China

Abstract Laser-induced air plasma is produced by focusing an 1064 nm Nd:YAG laser beam (spot diameter of 100 μm , pulse energy of 60 mJ, pulse width of 200 ps). The electron density distribution is diagnosed by holographic interferometry. The displacement isoline is obtained from infinite interferogram, and the electron density distribution is calculated from finite interferogram. The results indicate that the ion and electron in laser-induced air plasma form in an olivary shape, which has symmetrical distribution in the vertical direction but unsymmetrical distribution in the horizontal direction, and the maximal electron density is about 10^{18} cm^{-3} .

Key words holography; laser-induced air plasma; electron density; holographic interferometry; laser probe

OCIS codes 140.3440; 280.5395; 120.2880; 350.5400

1 引 言

电子密度是等离子体重要的基本参数, 对研究激光等离子体相互作用的各种机制有重要的意义, 是等离子体诊断中的主要内容^[1-4]。干涉法是诊断等离子体的有力手段。普通干涉仪由于很难消除光学元件缺陷的影响, 因而对光学元件的加工质量要求高, 应用代价高且精度差^[5-6]; 双曝光全息干涉法具有高时空分辨、信息量大以及能自动抵消光学元件缺陷的影响等优点, 是诊断等离子体电子密度的一个较好方法, 至今已有40多年的应用历史。

在不同等离子体的研究中, 全息诊断技术不断提高^[7]。High Temperature Plasma实验室和Los Alamos实验室等对全息诊断的研究十分重视, 研究内容较为全面, 主要涉及: 全息干涉诊断等离子体的理论及可行性研究、任意形状透明位相物体的折射率测量研究、测量灵敏度研究及提高灵敏度的技术研究等内容^[8-14]。国内采用全息干涉诊断等离子体的研究单位也较多^[15-19], 但实验基本采用无限宽干涉图。无限宽干涉图在实验中不用引入参考条纹, 操作简单, 但条纹符号的意义不明确, 需要对被测场有先验知识才能定量求解物理

收稿日期: 2014-04-14; 收到修改稿日期: 2014-07-17

作者简介: 雷 岚(1984—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事脉冲激光全息诊断技术方面的研究。E-mail: leilan@nint.ac.cn

量。有限宽干涉图由于引入了参考条纹,可以直接从实验图求出所需物理量,应用更为方便。本文采用有限宽全息干涉技术对激光击穿空气等离子体进行诊断,获得了高质量的干涉图,并得到了电子密度分布。

2 理论分析

全息干涉是将同一束光在不同时间记录在同一全息干板上,然后将这些波前同时再现发生干涉。二次曝光全息干涉法是在记录过程中对一张全息干板进行两次曝光,两次曝光分别记录初始物光波与被测试光波,当用再现光波对干板再现时,两个物光波同时再现并发生干涉,产生干涉条纹。由于干涉原理给出干涉图相位差 $\Delta\varphi$ 与折射率 N 的关系为

$$\Delta\varphi = \int (k_{\text{plasma}} - k_0) dl = \int (N - N_0) \frac{\omega}{c} dl, \quad (1)$$

式中 N, N_0 分别为等离子体折射率与参考折射率,通常近似认为 $N_0 = 1$ 。在等离子体密度足够小而满足 $\frac{n_e}{n_c} \ll 1$ (n_c 为截止密度)时,可将(1)式转化为相位差 $\Delta\varphi$ 与等离子体电子密度 n_e 的关系:

$$\Delta\varphi = \frac{\omega}{2cn_c} \int n_e dl. \quad (2)$$

干涉原理给出相位差 $\Delta\varphi$ 与条纹位移量 D 的关系为

$$\Delta\varphi = 2\pi D, \quad (3)$$

由(2)式与(3)式获得电子密度 n_e 与条纹位移量 D 的关系为

$$\int n_e dl = 2D\lambda n_c, \quad (4)$$

获得干涉条纹的位移量后,就可根据(4)式经 Abel 反演计算求得等离子体的电子密度。

3 实验系统

对激光击穿空气产生的等离子体进行了全息干涉模拟诊断实验,实验系统如图1所示。由信号发生器触发两台 Nd:YAG 激光器,分别作为激发光和探测光。

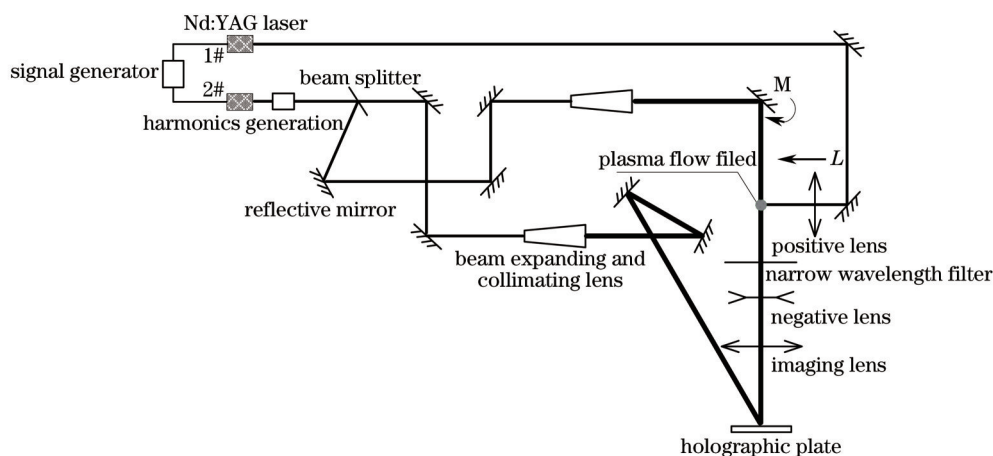


图1 全息干涉法测量等离子体电子密度的实验系统示意图

Fig.1 Experimental diagram of measuring plasma electron density with holographic interferometer

1# Nd:YAG 激光器发出的激光作为激发光,波长为 1064 nm,光斑直径为 100 μm ,脉宽为 200 ps,能量为 60 mJ,因此其斑点处的最高功率密度为 $3.8 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$,高于空气击穿阈值 2 个量级,可以实现空气的击穿。激发光经凸透镜聚焦后,在其焦点处的空气被击穿而生成等离子体。

2# Nd:YAG 激光器发出的激光经倍频后作为探测光(波长为 532 nm),经分光镜后分成两束,分别作为参考光与物光,其中参考光直接入射到干板,而物光经等离子体区域后再垂直入射到干板。由于激光击穿空气等离子体的尺度很小,直接记录不便于后期图像处理,故在物光路中采用凹透镜与成像透镜的组合将等离子体区域的信号放大(放大倍数为 2)。另外,物光路中的窄带通可以排除等离子体自发杂光对测量的影响。

在拍摄有限宽条纹干涉图时,在空场时(没有等离子体)进行第一次曝光,在有等离子体时进行第二次曝光。在两次曝光之间,将物光路中反射镜M顺时针旋转一个小角度,即将物光束引入一个倾斜角,产生参考条纹。参考条纹的光程差沿激光束方向 L 增加,当所得干涉图向 L 方向凸起或凹陷时,表明被测场的折射率相对于空场的折射率是增加或减小的。参考条纹的空间频率与物光束的倾斜角有关,物光倾斜角越大,参考条纹的空间频率越大,实验中应根据测量对象特征和测试需要来选择合适的条纹空间频率,本实验中的条纹空间频率为 5.5 mm^{-1} 。

完成拍摄后,将二次曝光的全息干板进行化学处理,随后将得到的全息图经再现系统再现,获得变化前后的物光波的干涉图,利用Apogee 16E型CCD(灵敏面积 $36.8\text{ mm}\times 36.8\text{ mm}$,像素尺寸 $9\text{ }\mu\text{m}$)将干涉图存储在计算机中进行后续的图像处理,即对干涉图进行骨架提取和基线拟合得到条纹位移量,根据条纹位移量与电子密度的关系,采用Abel反演计算得到等离子体的电子密度。

4 数据分析

实验获得的激光击穿空气等离子体的全息干涉图如图2所示,其中图2(a)为无限宽条纹图,图2(b)为有限宽条纹图,图中 L 沿激光束方向, R 垂直于激光束方向。从图2可以看出,激光大气等离子体中各种离子和电子呈橄榄形分布,且其沿激光束方向不对称,而垂直激光束方向对称分布,与Beduneau等^[20-21]采用光谱测量方法给出的研究结果一致。

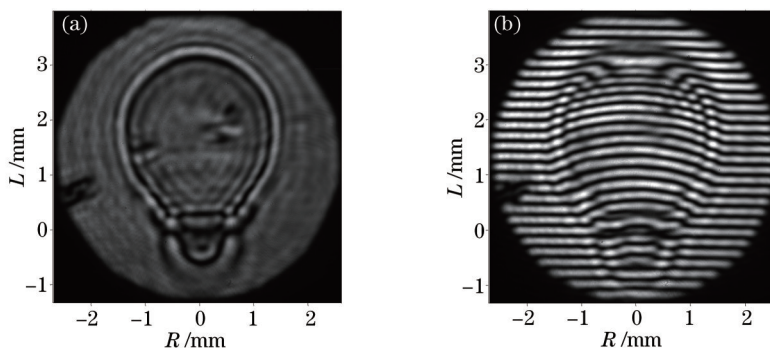


图2 激光击穿空气等离子体的(a)无限条纹和(b)有限条纹全息干涉图

Fig.2 Holographic interferograms of laser-induced air plasma in fringes of (a) infinite and (b) finite widths

全息干涉测量法的计量原理是利用条纹中的相位变化获取待测物理量的信息,因此需要从干涉图中获取条纹的位移量。无限宽条纹图的条纹反映了条纹位移量的等位线,从有限宽条纹图[图2(b)]经骨架提取及基线拟合后计算获得的典型的条纹位移量等位线如图3所示,可见其与图2(a)反映的位移量等位线一致。计算得到的沿激光束方向不同距离处(相对击穿位置)的电子密度垂直分布图如图4所示,可见最大电子密度为 10^{18} cm^{-3} 量级,其标准不确定度小于10%。与林兆祥等^[22]采用光谱测量方法获得的研究结果一致。

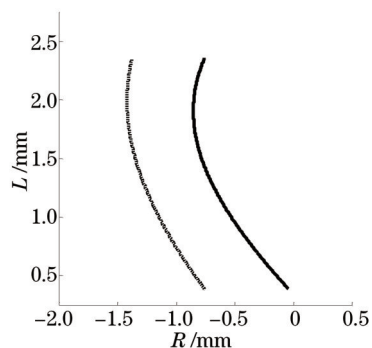


图3 有限宽干涉图的位移量等位线

Fig.3 Displacement isoline calculated from finite interferogram

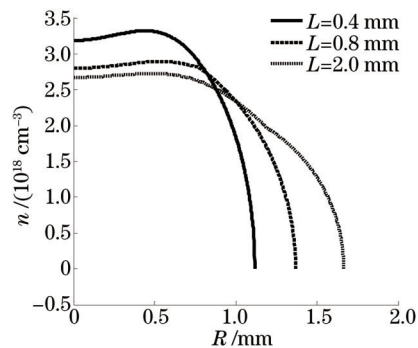


图4 沿激光束方向不同距离处激光空气等离子体电子密度的垂直分布

Fig.4 Vertical distribution of electron density of laser-induced air plasma at different horizontal spaces

5 结 论

采用有限宽全息干涉技术对激光大气等离子体进行了诊断,获得了清晰的全息干涉图,并反演计算出电子密度的分布特征。结果表明:激光大气等离子体中各种离子和电子呈橄榄形分布,其沿激光束方向不对称,而垂直激光束方向对称分布,最大电子密度为 10^{18} cm^{-3} 量级。应用的有限宽全息干涉技术可以为等离子体电子密度的诊断研究提供技术支持,获得的实验数据可为基于激波动力学的新技术应用提供一定帮助。

参 考 文 献

- 1 H Г Basov. Dense Plasma Diagnostics[M]. Mianyang: High Power Laser and Particle Beams Press, 1992.
H Г巴索夫. 稠密等离子体诊断学[M]. 绵阳: 强激光与离子束杂志社, 1992.
- 2 A N Zaidel, G V Ostrovskaya. Laser Methods of Plasma Research[M]. Leningrad: Nauka, 1977.
- 3 Luo Wenfeng, Zheng Xiaomin, Zhu Haiyan, *et al.*. Analysis of the characteristic parameters of CuCl_2 aqueous solution plasma using LIBS[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(12): 121402.
罗文峰, 郑晓敏, 朱海燕, 等. 激光诱导氯化铜溶液等离子体特征参数的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(12): 121402.
- 4 Hu Zhenhua, Zhang Qiao, Ding Lei, *et al.*. Temperature and electron number density of liquid jet double-pulse laser induced breakdown Ca plasma[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0430004.
胡振华, 张巧, 丁蕾, 等. 液体射流双脉冲激光诱导击穿Ca等离子体温度和电子数密度研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0430004.
- 5 Yu I Ostrovsky, M M Butusov, G V Ostrovskaya. Interferometry by Holography[M]. New York: Berlin Springer, 1980.
- 6 V M Ginzburg, B M Stepenov. Holography: Methods and Apparatus[M]. Moscow: Sov Radio, 1974.
- 7 G V Ostrovskaya. Holographic diagnostics of the plasma: a review[J]. *Technical Physics*, 2008, 53(9): 1103–1128.
- 8 Jahoda F C, Jeffries R A, Sawyer G A. Fractional-fringe holographic plasma interferometry[J]. *Appl Opt*, 1967, 6(8): 1407–1410.
- 9 R H Huddlestone, S L Leonard. Plasma Diagnostic Techniques[M]. New York: Academic Press, 1965.
- 10 Attwood D T, Coleman L W, Sweeney D W. Holographic micro interferometry of laser-produced plasmas with Frequency-tripled probe pulses[J]. *Appl Phys Lett*, 1975, 26(11): 617–620.
- 11 A N Zaidel. Application of holographic interferometry for plasma diagnostics[J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1986, 29(5): 447–466.
- 12 G V Ostrovskaya. Holographic interferometry of physical processes—the scientific legacy of Professor Yu. I. Ostrovsky[J]. *Opt & Laser Technol*, 1996, 28(4): 237–249.
- 13 G V Ostrovskaya, A Frank, S Bogdanov, *et al.*. Holographic investigations of current sheets plasma dynamics in 3D magnetic fields with X lines[C]. *SPIE*, 2005, 6252: 625228.
- 14 J J Moschella, R C Hazelton, E P Carlson, *et al.*. Holographic interferometry measurements on a 12-CM diameter double-shell argon gas-puff Z-pinch[C]. *International Conference on Plasma Science*, 2006.
- 15 Feng Wei, Li Enpu, Zhang Lin, *et al.*. Double-exposed holographic interferometry diagnose in microwave plasma thruster's plume and simulation by computer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(8): 1233–1236.
冯伟, 李恩普, 张琳, 等. 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[J]. *光子学报*, 2005, 34(8): 1233–1236.
- 16 Zheng Jian, Yu Changxuan, Li Wenhong, *et al.*. Numerical study of measuring electron density with holographic interferometry[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, 9(2): 173–177.
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.
- 17 Feng Shan, Wang Shuyan, Wang Guozhi, *et al.*. The measurement of plasma electronic density distribution by pulse laser holographic interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(11): 1339–1342.
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[J]. *光子学报*, 2001, 30(11): 1339–1342.
- 18 Kuang Longyu, Wang Chuanke, Wang Zhebin, *et al.*. Data processing program for electron density diagnoses of laser plasma[J]. *Software Technique*, 2006, 25(3): 88–89.
况龙钰, 王传珂, 王哲斌, 等. 激光等离子体电子密度诊断数据处理程序[J]. *软件技术*, 2006, 25(3): 88–89.
- 19 Li Junyue, Liu Jinhe, Lian Jinrui. Diagnostics of the arc plasma by monowavelength pulsed laser holographic interferometry[J]. *Jointing Transaction*, 1984, 5(3): 132–144.

- 李俊岳, 刘金合, 廉金瑞. 电弧等离子体的单波长脉冲激光全息诊断[J]. 焊接学报, 1984, 5(3): 132-144.
- 20 J L Beduneau, Y Ikeda. Spatial characterization of laser-induced sparks in air[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2004, 84(2): 123-139.
- 21 Y L Chen, J W L Lewis, C Parigger. Spatial and temporal profiles of pulsed laser-induced air plasma emissions[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2000, 67(2): 91-103.
- 22 Lin Zhaoxiang, Chen Bo, Wu Jinqun, *et al.*. Study on the electron density distribution of laser-induced air plasmas[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(1): 18-22.

林兆祥, 陈 波, 吴金泉, 等. 激光大气等离子体的电子密度空间分布特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(1): 18-22.

栏目编辑: 何卓铭