

## 高真空激光等离子体的同步移相干涉诊断及仿真

许贝贝, 陆健, 张宏超, 高楼, 唐懋

### Simultaneous phase-shifting interferometer diagnosis and simulation of high vacuum laser plasma

引用本文:

许贝贝, 陆健, 张宏超, 高楼, 唐懋. 高真空激光等离子体的同步移相干涉诊断及仿真[J]. *激光技术*, 2024, 48(1): 14–19.

XU Beibei, LU Jian, ZHANG Hongchao, et al. Simultaneous phase-shifting interferometer diagnosis and simulation of high vacuum laser plasma[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 48(1): 14–19.

## 您可能感兴趣的其他文章

### 1. 纳秒脉冲激光辐照铝靶碎片动态响应的仿真研究

引用本文: 张萌, 方英武, 张广鹏. 纳秒脉冲激光辐照铝靶碎片动态响应的仿真研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(4): 541–546.

### 2. 组合脉冲激光铝等离子体的数值模拟研究

引用本文: 赵佳伟, 吴涛, 廖青, 等. 组合脉冲激光铝等离子体的数值模拟研究[J]. *激光技术*, 2022, 46(6): 835–840.

### 3. 脉冲Nd:YAG激光诱导水滴等离子体的实验研究

引用本文: 尹培琪, 王新兵, 武耀星, 等. 脉冲Nd:YAG激光诱导水滴等离子体的实验研究[J]. *激光技术*, 2020, 44(6): 726–731.

### 4. CO<sub>2</sub>激光诱导空气等离子体放电通道特性研究

引用本文: 李凤舞, 左都罗, 王新兵. CO<sub>2</sub>激光诱导空气等离子体放电通道特性研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 831–835.

### 5. CO<sub>2</sub>激光诱导液滴射流等离子体的实验研究

引用本文: 陈子琪, 王新兵, 左都罗. CO<sub>2</sub>激光诱导液滴射流等离子体的实验研究[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 888–891.

文章编号: 1001-3806(2024)01-0014-06

## 高真空激光等离子体的同步移相干涉诊断及仿真

许贝贝, 陆健, 张宏超\*, 高楼, 唐懋  
(南京理工大学理学院, 南京 210094, 中国)

**摘要:** 为了解决在高真空环境下, 等离子体膨胀迅速、外围羽流引起的条纹偏移小、单幅干涉条纹图难以检出的问题, 采用同步移相干涉测试技术得到了  $1.333 \times 10^{-4}$  Pa 和  $1.333 \times 10^{-3}$  Pa 真空度下激光诱导铝等离子体电子密度分布; 同时采用 2 维轴对称流体动力学模型, 对高真空环境下激光诱导等离子体的膨胀过程进行了数值仿真, 得到了电子密度的 2 维分布, 并分析了数值仿真结果存在偏差的原因及改进方法。结果表明, 等离子体的中心电子密度在 50 ns 时下降至  $1.4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ; 数值仿真结果与实验结果吻合较好, 验证了模型的正确性。该研究为高真空下激光等离子体的研究提供了一定的参考。

**关键词:** 激光技术; 激光诱导等离子体; 高真空; 同步移相; 电子密度; 数值仿真

中图分类号: O439; TN249 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.01.003

### Simultaneous phase-shifting interferometer diagnosis and simulation of high vacuum laser plasma

XU Beibei, LU Jian, ZHANG Hongchao\*, GAO Lou, TANG Mao

(School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of rapid plasma expansion and small fringe offset caused by peripheral plumes in the high vacuum environment, it was difficult to detect a single interference fringe pattern. The electron density distributions of the laser-induced aluminum plasma under  $1.333 \times 10^{-4}$  Pa and  $1.333 \times 10^{-3}$  Pa pressure were obtained by using simultaneous phase-shifting interference. At the same time, the expansion process of laser-induced plasma under a high vacuum environment was simulated numerically by using a 2-D axisymmetric fluid dynamics model, and the two-dimensional distribution of electron density was obtained and analyzed for the reasons for the deviation of numerical simulation results and the improvement methods. The results show that the central electron density of plasma decreases to  $1.4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  at 50 ns. The numerical simulation results are in good agreement with the experimental results, which verifies the reliability of the model. This research provides some reference for the study of laser plasma under high vacuum.

**Key words:** laser technique; laser-induced plasma; high vacuum; simultaneous phase-shifting; electron density; numerical simulation

## 0 引言

激光等离子体在激光诱导击穿光谱<sup>[1-2]</sup>、真空开关<sup>[3-4]</sup>、脉冲激光沉积<sup>[5-6]</sup>、激光加工<sup>[7-9]</sup>等方面具有广泛的应用。国外对于高真空环境下激光诱导等离子体的研究相对较早。2012年, VERHOFF 等人<sup>[10]</sup>利用光谱法研究了高真空下纳秒和飞秒激光诱导黄铜等离子体的演化特征, 研究发现, 在纳秒激光等离子体的早期阶段, 连续发射和离子发射占主导地位, 其次是原子发

射。2014年, FARID 等人<sup>[11]</sup>利用光谱成像研究了从高真空到环境气体下压力对于纳秒激光诱导铜等离子体的影响, 研究发现, 背景压力水平显著地控制了激光等离子体羽流的动力学特征。近年来, 国内也开始了这方面的研究。2020年, CAO 等人<sup>[12]</sup>利用快速成像和干涉法, 测量了高真空环境下单脉冲及双脉冲激光等离子体的电子密度分布, 研究发现, 激光诱导等离子体在真空腔中快速膨胀, 电子密度有较大的空间梯度。在数值仿真方面, 2021年, WANG 等人<sup>[13]</sup>提出了等离子体在背景气体中膨胀的 2 维轴对称辐射流体动力学模型, 对不同气压下激光诱导铝等离子体进行了仿真, 获得了等离子体参数的时空演化, 研究发现, 由于背景

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11774176)

\* 通信作者: hongchao@njjust.edu.cn

收稿日期: 2022-11-11; 修回日期: 2023-02-16

气体的存在,等离子体的尺寸和速度较真空条件下的小,且等离子体的边缘速度降低。同年,GAO 等人<sup>[14]</sup>研究了高真空环境下激光烧蚀铜铝合金诱导等离子体演化光谱及相应的辐射流体动力学仿真,研究结果揭示了多元素激光等离子体膨胀过程中的离子演化规律。

背景气体压力大小对于等离子体动态特性的影响非常显著。目前对于高真空环境下激光诱导等离子体的研究,主要以数值仿真为主。在高真空环境下,由于几乎没有背景气体的作用,利用传统的干涉法或阴影法很难对等离子体进行诊断。在精度方面,传统的干涉测量精度只能达到  $\lambda/10 \sim \lambda/20$ <sup>[15]</sup> ( $\lambda$  为探测光波长)。2019 年,南京理工大学 ZHENG<sup>[16]</sup> 通过求解矩阵方程精确提取相位,说明了基于微偏振阵列的同步移相干涉的复原精度优于  $\lambda/100$ 。不同于单幅干涉图利用快速傅里叶变换<sup>[17]</sup> 方法处理相位,该微偏振阵列与电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)是像素级匹配,其中每相邻的 4 个移相单元透振方向依次相差  $45^\circ$ ,因此在 CCD 相机靶面上可以得到相位差为  $\pi/2$  的干涉图。

本文中利用同步移相干涉技术<sup>[18]</sup>,实现了高真空下激光等离子体的诊断。实验所用靶材为铝,放置在真空腔中,其背景气压由机械泵和分子泵控制,其中分子泵可以使真空腔气压下降至  $10^{-5}$  Pa 量级。在数值仿真方面,利用 2 维轴对称流体动力学模型,对等离子体羽流膨胀过程进行数值仿真,并将仿真结果与实验结果进行了对比分析。

## 1 实验

### 1.1 实验装置

激光等离子体的同步移相干涉诊断实验装置如图 1 所示。图中,filter 是滤波器,纳秒激光器(nanosecond laser, NS) NS 2 作为激发光源,输出波长为 1064 nm,脉冲宽度为 10 ns;半波片(half-wave-plate, HWP)和偏振分光镜(polarizing beam splitter, PBS)的组合对激光能量进行衰减;之后经分光镜(beam splitter, BS) BS 3,其反射光和透射光的比率为 1:9,其中反射光到达能量计(energy meter, EM)实现实时记录;透射光经反射镜  $M_4$ ,并通过凸透镜  $L_3$  将脉冲激光聚焦在真空腔中的靶材上(光斑大小约为 1 mm)。

探测激光由激光器 NS 1 提供,输出波长为 532 nm,脉宽为 7 ns。光束经反射镜  $M_1$ ,通过分光镜 BS 1 后,形成参考光和测试光,其中经反射镜  $M_3$  的测试光,通

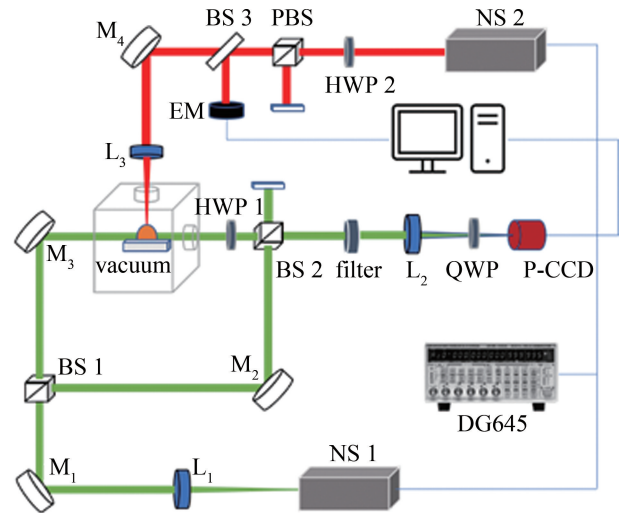


图 1 同步移相实验系统装置图

Fig. 1 Diagram of simultaneous phase-shifting experimental system

过真空腔后携带了等离子体的相位信息;旋转半波片 HWP 1 使已满足干涉条件的测试光和参考光形成一对正交偏振光,并在分光镜 BS 2 处进行合束;接着光束通过  $\lambda/4$  波片(quarter-wave-plate, QWP)形成左旋和右旋圆偏振光后进入微偏振阵列相机(polarizing CCD, P-CCD)进行图像采集;通过图像处理将其分开后,采用四步移相算法和相位解缠,即可恢复待测等离子体相位。系统延迟由延迟信号发生器(DG645)控制,对探测光和激发光的延迟时间(即等离子体的膨胀时间)进行设定,得到等离子体的时间序列干涉图。

### 1.2 实验结果

图 2 是激光诱导等离子体的时间序列移相干涉图。这里的干涉条纹被调成了无限宽,更有利于观察测量。其中红色箭头为激光入射方向,激光能量为 160 mJ,真空度约为  $1.333 \times 10^{-4}$  Pa,通过控制 DG645

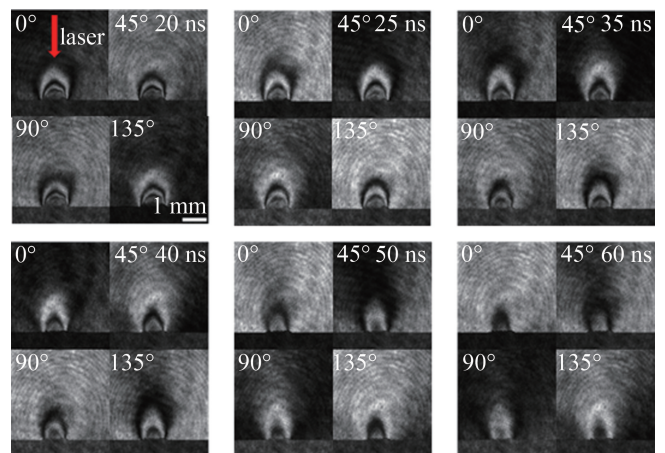


图 2 激光诱导等离子体时间序列移相干涉图

Fig. 2 Time series phase-shifting interferogram of laser-induced plasma



得到等离子体在 20 ns、25 ns、35 ns、40 ns、50 ns、60 ns 的干涉图。每一时刻的干涉图由 4 幅图像组成,如图 所示偏振角度依次成  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 。

## 2 数据处理方法

设测试光  $T$  到达 BS 2 时的琼斯矩阵<sup>[19]</sup>为  $\begin{bmatrix} a \\ 0 \end{bmatrix} \times \exp[i(\omega_0 t + \varphi)]$ , 其中,  $a$  是测试光的振幅;  $\omega_0$  是角频率;  $\varphi$  是参考光与测试光的相位差。同时参考光  $R$  的琼斯矩阵为  $\begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} \exp(i\omega_0 t)$ , 其中,  $b$  为参考光的振幅,  $\lambda/4$  波片的琼斯矩阵  $Q = (\sqrt{2})^{-1} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}$ , 微偏振阵列相机中检偏器的琼斯矩阵  $P = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix}$ , 其中,  $\alpha$  为检偏器的偏振角度。因此到达检偏器上的光可以表示为:

$$E = P \cdot Q \cdot (T + R) \quad (1)$$

因此到达每个检偏器上的光强为两个分量的强度之和:

$$I = E_x^2 + E_y^2 \quad (2)$$

式中:  $E_x$  和  $E_y$  为  $x$  轴和  $y$  轴方向的光矢量。

分别代入  $\alpha$  为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  得到  $I_1, I_2, I_3, I_4$ 。因此参考光与测试光的相位差  $\varphi = \arctan[(I_3 - I_1)/(I_2 - I_4)]$ , 由此公式计算的相位分布在  $-\pi$  和  $+\pi$  之间, 发生了  $2\pi$  的相位跃变, 本文中采用同步相位展开和去噪算法<sup>[20]</sup>进行相位解缠以恢复真实相位。

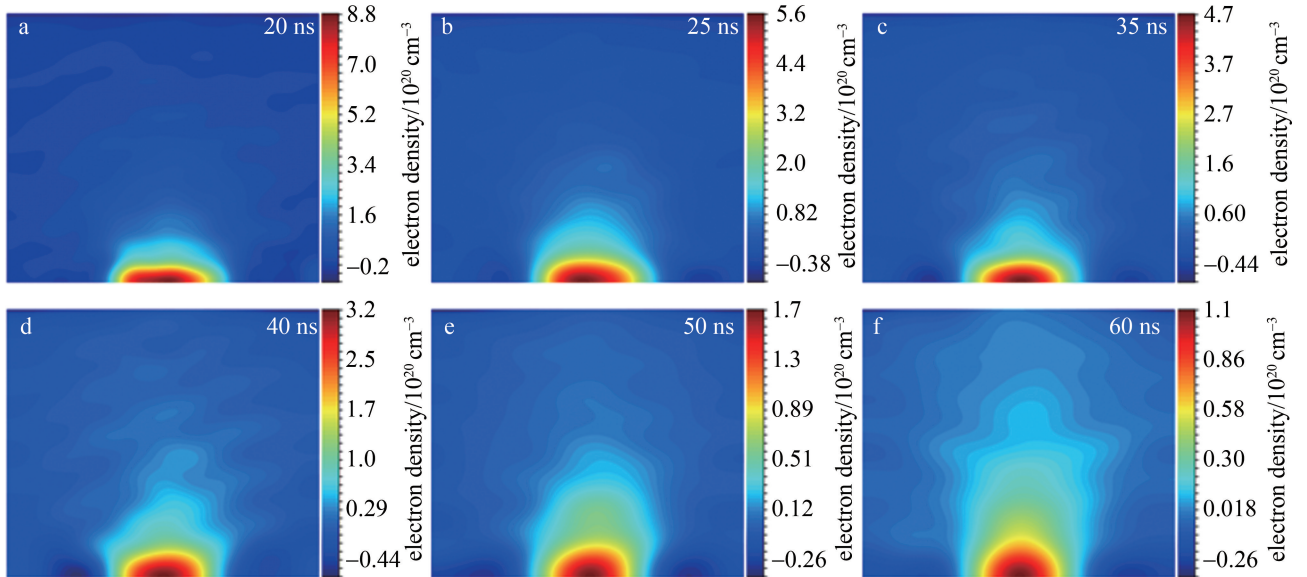


图3 等离子体的电子密度分布图

Fig. 3 Plasma electron density distribution diagram

等离子体的折射率基于 Abel 逆变换<sup>[21]</sup>得出, 其计算公式如下:

$$n - n_0 = -\frac{\lambda}{\pi} \int_r^R \frac{d\varphi/dx}{\sqrt{x^2 - r^2}} dx \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为探测光波长;  $n$  为等离子体折射率;  $n_0$  为空气折射率;  $r$  和  $R$  表示到原点的距离。

在高真空环境下, 因为电子对等离子体折射率起主导作用, 一般可表示为<sup>[22]</sup>:

$$n = 1 - \frac{e^2}{8\pi^2 \epsilon_0 m c^2} \lambda^2 N \quad (4)$$

式中:  $e$  为元电荷;  $m$  为电子质量;  $\epsilon_0$  为真空介电常数;  $c$  为真空中的光速;  $N$  为电子密度。

因此, 采用单波长法进行测量时, 可对电子密度进行近似计算:

$$N = -\frac{8\pi^2 \epsilon_0 m c^2}{e^2 \lambda^2} (n - 1) \quad (5)$$

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 等离子体电子密度演化特性

图 3 为利用上述数据处理方法得到的等离子体电子密度分布。图 4 为靶材表面的电子密度径向分布。

从图 4 可观察到, 在 20 ns 时, 等离子体中心电子密度最高可达  $8.8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , 外围电子密度呈近似单调递减的特征。随着时间的推移, 由于等离子体的膨胀, 60 ns 时中心电子密度下降至  $1.135 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  左右, 此时等离子体羽流已经在整个视场中扩散。从整体看, 等离子体的中心电子密度较大, 远离中心区域后

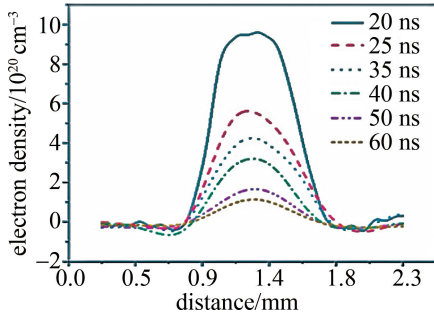


图 4 等离子体电子密度横截面分布

Fig. 4 Cross sectional electron distribution in plasma

电子密度迅速衰减,且垂直靶材的方向膨胀速度较快。

### 3.2 不同真空度下等离子体特性

此外,实验中还研究了相同激光能量密度  $1.333 \times 10^{-4}$  Pa 和  $1.333 \times 10^{-3}$  Pa 真空度下等离子体的演化特性,如图 5 所示。由图 5 可以看出,  $1.333 \times 10^{-3}$  Pa 真空度下相较于  $1.333 \times 10^{-4}$  Pa 真空度下,中心电子密度较高,45 ns 时等离子体的中心电子密度为  $3.15 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,到 85 ns 时,等离子体的中心电子密度下降至  $5.75 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。同样,在  $1.333 \times 10^{-4}$  Pa 真空度下,45 ns 时等离子体中心电子密度为  $2.87 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,85 ns 后下降至  $2.39 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。

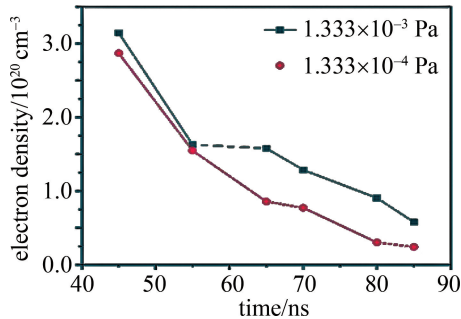


图 5 不同真空度下等离子体中心电子密度图

Fig. 5 Central electron density of plasma diagram under different vacuum

## 4 数值仿真分析

### 4.1 理论模型

2 维轴对称流体动力学模型可以仿真等离子体羽流在背景气体中的膨胀过程。高真空环境下,由于背景气体含量很少,等离子体的动力学演化几乎不受影响,因此对模型进行了一定的简化,将等离子体羽流视为非粘性流。真空中等离子体的膨胀运动可以用以下的方程组表示:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}^2) = -\nabla p \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho (E + \mathbf{v}^2/2)}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho \mathbf{v} + (E + \mathbf{v}^2/2)] = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \quad (8)$$

式中: $\rho$  是质量密度; $\mathbf{v}$  表示等离子体羽流的速度; $p$  是压强; $E$  表示比内能。

这里将羽流视为理想气体,遵循理想气体定律,则压强和内能密度可以表示为:

$$p = (1 + x_e) \frac{\rho k T}{m} \quad (9)$$

$$\rho E = \frac{\rho}{m} \left[ \frac{3}{2} (1 + x_e) k T + I_0 x_i \right] \quad (10)$$

式中: $x_e$  和  $x_i$  为电子和离子的电离率; $k$  为玻尔兹曼常量; $T$  为气体温度; $m$  为气体质量; $I_0$  为铝的 1 级电离能。

假设等离子体处于局部热平衡状态,且模型只考虑 1 阶电离,结合萨哈方程与电荷守恒方程<sup>[23]</sup>,即可以计算等离子体中离子的数密度。

对本实验中  $1.333 \times 10^{-4}$  Pa 真空度下所产生的等离子体羽流进行了数值仿真。由实验可知,激光结束后等离子体的径向和轴向尺寸分别约为 1 mm 和 0.1 mm,初始等离子体中心处的蒸汽密度约为  $1.3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 、温度约为 2 eV。由于等离子体初始电子密度及温度服从高斯分布,所以等离子体电子密度  $n(x, y)$  及温度  $T(x, y)$  为:

$$\begin{cases} n(x, y) = n_0 \exp\left(-\frac{x^2}{2X_0^2} - \frac{y^2}{2Y_0^2}\right) \\ T(x, y) = T_0 \exp\left(-\frac{x^2}{2X_0^2} - \frac{y^2}{2Y_0^2}\right) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $X_0$  和  $Y_0$  分别为激光结束时等离子体的径向和轴向尺寸; $n_0$  和  $T_0$  为激光结束时等离子体中心处蒸汽密度与温度。

### 4.2 仿真结果

由数值仿真计算结果可以看出,2 维流体动力学模型可以仿真等离子体羽流的动态演化过程,如图 6 所示。等离子体的中心电子密度在 5 ns 时约为  $1.3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ,到 50 ns 时衰减为  $1.4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。

为了较为直观地分析,对前 50 ns 等离子体中心电子密度的数值仿真结果与实验结果进行对比,如图 7 所示。可以看出,数值仿真的计算结果与实验结果较为吻合,存在偏差的原因有以下几点:(a) 数值仿真运用 2 维轴对称流体动力学模型,忽略了等离子体的黏性应力等参数,忽略背景气体的作用力;(b) 在考虑电离方程时只考虑了铝离子的 1 阶电离而未考虑 2

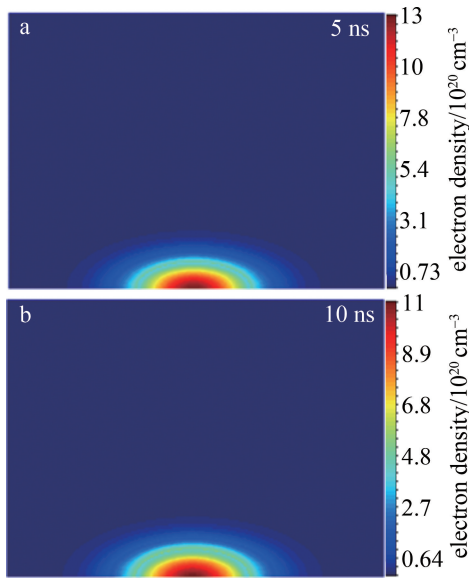


图6 等离子体的数值仿真电子密度分布图

Fig. 6 Numerical simulation plasma electron density distribution diagram

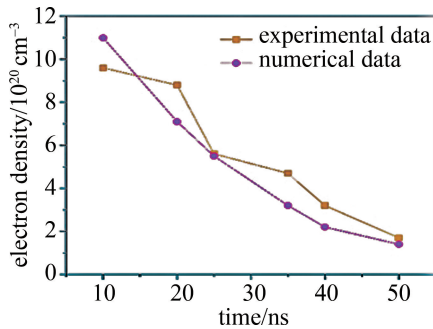


图7 数值仿真与实验结果分析

Fig. 7 Analysis of numerical simulation with experimental results

阶、3阶电离,这是模型以后需要改进的地方;(c)在实验过程中,真空泵的气压值不能稳定地停在固定值,导致气压与实际产生偏差。

## 5 结论

本文中利用同步移相干涉测试技术,研究了  $1.333 \times 10^{-4} \text{ Pa}$  和  $1.333 \times 10^{-3} \text{ Pa}$  真空度下激光诱导铝等离子体的动态特性。结果表明,同步移相干涉技术可以很好地对高真空下激光等离子体进行诊断测量。高真空环境下,激光诱导铝等离子体的中心区域电子密度较高,外围电子密度迅速衰减,呈现出较大的空间梯度;相比于  $1.333 \times 10^{-4} \text{ Pa}$  真空度下,  $1.333 \times 10^{-3} \text{ Pa}$  下等离子体的中心电子密度较高。同时,2维轴对称流体动力学数值仿真结果与实验结果较为吻合,验证了模型的正确性。

## 参考文献

[1] CHEN L, YOU L B, WANG Q Sh, *et al.* Application and develop-

ment of UV laser induced breakdown spectroscopy[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(5): 619-625(in Chinese).

陈亮,游利兵,王庆胜,等. 紫外激光诱导击穿光谱的应用与发展[J]. *激光技术*, 2017, 41(5): 619-625.

[2] DING Y, YANG L Y, CHEN J, *et al.* Quantitative analysis of mg element in aluminium alloy based on laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(13): 1314006(in Chinese).

丁宇,杨淋玉,陈靖,等. 基于激光诱导击穿光谱法的铝合金中Mg元素定量分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(13): 1314006.

[3] LIN H Zh, WANG Y, HE Zh H, *et al.* Experimental study on spectrum and conduction properties of laser triggered vacuum switch[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(1): 24-28(in Chinese).

林华中,王英,何正浩,等. 激光触发真空开关光谱和导通特性实验研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(1): 24-28.

[4] KE W, CHEN M Y, YUAN H, *et al.* Influence of focusing degree in laser-induced plasma on vacuum detection of vacuum switch[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(10): 4224-4232(in Chinese).

柯伟,陈敏源,袁欢,等. 激光诱导等离子体中聚焦程度对真空开关真空度检测的影响[J]. *高电压技术*, 2022, 48(10): 4224-4232.

[5] OJEDA-G-P A, DÖBELI M, LIPPERT T. Influence of plume properties on thin film composition in pulsed laser deposition[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2018, 5(18): 1701062.

[6] DENG Zh Y, JIA Q, FENG B, *et al.* Research progress on fabrication and applications of high-performance films by pulsed laser deposition[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(8): 0802010(in Chinese).

邓钟扬,贾强,冯斌,等. 脉冲激光沉积高性能薄膜制备及其应用研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(8): 0802010.

[7] ZHAO W Q, MEI X S, WANG W J. Ultrashort pulse laser drilling of micro-holes (part 1)-Theoretical study[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 140-148(in Chinese).

赵万芹,梅雪松,王文君. 超短脉冲激光微孔加工(上)——理论研究[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(1): 140-148.

[8] WU Ch Sh, FENG G Y, LIU C F. Research on drilling hole of single crystal by pulse laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 140-145(in Chinese).

吴常顺,冯国英,刘彩飞. 脉冲激光对单晶硅打孔的研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 140-145.

[9] LUO J F, SONG Sh J, WANG P Q, *et al.* Study on removal mechanism of micro-/nano-particles on silicon surface by laser plasma[J]. *Laser Technology*, 2018, 42(4): 567-571(in Chinese).

罗锦锋,宋世军,王平秋,等. 激光等离子体对硅表面微纳粒子去除机理研究[J]. *激光技术*, 2018, 42(4): 567-571.

[10] VERHOFF B, HARILAL S S, FREEMAN J R, *et al.* Dynamics of femto- and nanosecond laser ablation plumes investigated using optical emission spectroscopy[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(9): 93303.

[11] FARID N, HARILAL S S, DING H, *et al.* Emission features and expansion dynamics of nanosecond laser ablation plumes at different ambient pressures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(3): 33107.

[12] CAO Sh Q, SU M G, LIU J, *et al.* Expansion dynamics and compression layer in collinear double-pulse laser produced plasmas in a

- vacuum[J]. *Physics of Plasmas*, 2020, 27(5): 052101.
- [13] WANG J X, WANG Sh Q, ZHANG L, *et al.* A two-dimensional axisymmetric model of laser-induced plasma expansion in background gas[J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2022, 45(5): 1254-1261(in Chinese).  
王俊霄,王树青,张雷,等. 激光诱导等离子体在背景气体中膨胀的二维轴对称模型[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2022, 45(5): 1254-1261.
- [14] GAO Ch L, MIN Q, LIU J Zh, *et al.* Time evolution of copper-aluminum alloy laser-produced plasmas in vacuum [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, 274: 107855.
- [15] DING Y. Research on key technology of dynamic Mach-Zehnder interferometer[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2019: 1-12(in Chinese).  
丁煜. 动态马赫-曾德尔干涉仪及其关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019: 1-12.
- [16] ZHENG D H. Research on spatial phase-shifting interferometry and its key technologies[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2019: 17-32(in Chinese).  
郑东晖. 空间相移干涉测量方法及其关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019: 17-32.
- [17] KEMAO Q. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: Principles, applications and implementations[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(2): 304-317.
- [18] ZUO F, CHEN L. Development of anti-vibration technology in simultaneous phase-shifting interferometry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(11): 43-48(in Chinese).  
左芬,陈磊. 同步移相抗振光干涉测量技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(11): 43-48.
- [19] QIAN K M, MOU H, WU X P. A real-time polarization phase shifting technique for dynamic measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(1): 64-67(in Chinese).  
钱克矛,缪泓,伍小平. 一种用于动态过程测量的实时偏振相移方法[J]. *光学学报*, 2001, 21(1): 64-67.
- [20] PINEDA J, BACCA J, MEZA J, *et al.* SPUD: Simultaneous phase unwrapping and denoising algorithm for phase imaging[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(13): D81-D88.
- [21] ZHENG F, ZHANG H Ch, LU J, *et al.* Image processing of interference fringes of laser-induced-plasma [J]. *Journal of Nanjing University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 33(5): 668-671(in Chinese).  
郑峰,张宏超,陆健,等. 激光等离子体干涉条纹的图像处理方法研究[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(5): 668-671.
- [22] ZHANG Ch H, LU J, ZHANG H Ch, *et al.* Dual-wavelength interferometric diagnosis of double-pulse laser induced aluminium plasma [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(2): 441-447(in Chinese).  
张楚蕙,陆健,张宏超,等. 双脉冲激光诱导铝等离子体的双波长干涉诊断[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(2): 441-447.
- [23] BOGAERTS A, CHEN Zh Y, GJIBELS R, *et al.* Laser ablation for analytical sampling: What can we learn from modeling? [J]. *Spectrochimica Acta*, 2003, B58(11): 1867-1893.