

对飞秒激光等离子体中成丝现象的研究*

李玉同¹⁾²⁾ 张 杰¹⁾ 陈黎明¹⁾²⁾ 赵理曾¹⁾ 夏江帆¹⁾

腾 浩¹⁾²⁾ 李英骏¹⁾ 朱成银²⁾ 江文勉²⁾

¹⁾ 中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100080)

²⁾ 中国工程物理研究院西南核物理与化学研究所, 绵阳 919 信箱, 621900)

(2000 年 7 月 27 日收到)

采用光学阴影法和散射光成像, 对飞秒激光等离子体中的局域密度涨落进行了研究. 在实验中观察到了成丝不稳定性现象. 从理论上对有质动力引起的局域密度涨落进行了分析. 分析表明, 这种成丝不稳定性主要是由有质动力造成的.

关键词: 飞秒激光等离子体, 有质动力成丝

PACC: 5250J, 5225

激光等离子体的时空演化过程和能量耦合过程非常复杂. 入射激光的非均匀性、靶面不平整等因素均会造成等离子体的局域密度涨落. 局域密度涨落与激光等离子体相互作用中的许多复杂现象相联系. 比如密度涨落会影响激光脉冲在等离子体中的传播, 甚至使光束破裂、成丝. 激光成丝现象已被实验证实. Willi 等人用干涉法和阴影照相法直接观察到了激光成丝造成的局域密度扰动^[1]. Young 等人使用光学诊断法, 对线聚焦和点聚焦产生的等离子体中的成丝不稳定性进行了比较^[2]. Baldis 等人使用 Thomson 散射技术研究了 CO₂ 激光脉冲产生的大尺度等离子体中的成丝现象^[3]. 使用 X 射线针孔像^[4]和二次谐波发射^[5]也可间接研究激光成丝不稳定性. 在 ICF 研究中, 激光成丝不稳定性会影响靶丸辐照均匀度和诱发或增强其他不稳定性, 所以要采用无规相位板等光束平滑技术对其进行抑制^[6,7]. 而在强场物理研究中, 超短超强激光脉冲的成丝和自聚焦对快点火概念^[8,9]、激光引雷^[10]、电子尾波加速^[11]等均有重要意义.

本文利用光学诊断法, 对飞秒激光等离子体中的成丝现象进行了实验观测, 并从理论上对有质动力引起的密度涨落进行了讨论.

实验在中国科学院物理研究所的掺钛蓝宝石飞秒激光器上进行. 具体参数: 激光脉宽 150 fs, 输出能量 5 mJ, 重复频率 10 Hz, 波长 800 nm. 激光入射

角为 0°或 45°, 靶面功率密度约为 $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$. 实验采用两类靶型, 一类是 70 μm —100 μm 厚的 Al 箔, 一类是镀于玻璃底衬上的 3 μm 厚铝膜. 靶台具有三维平动和一维转动. 实验中一般采用单发打靶模式, 每打一发后, 靶台沿与入射激光垂直的方向平动 0.1 mm, 确保激光每发都与新靶面作用.

为了研究入射激光光强分布对等离子体局域密度涨落的影响, 从下面三个方面来设计实验. 1) 对入射激光束进行了调制, 以降低入射激光的均匀性; 2) 控制实验参数, 提高热成丝阈值强度, 使有质动力成丝占主导地位, 将物理过程简化; 3) 引入预脉冲, 使成丝不稳定性有足够的空间发展. 实验诊断包括两个方面, 一是对斜入射情况时等离子体角向散射光进行直接成像; 二是使用 $2\omega_0$ 激光探针, 对等离子体进行光学诊断^[12]. 图 1 给出了实验布局示意图. 在图 1(a) 中, 激光入射角为 45°, 在角反射方向测量等离子体散射光图像. 光学系统的放大倍数为 9, 经 800 nm 干涉滤光片(带宽 10 nm)选通后, 由 CCD 相机记录. 16 比特、1152 × 1242 阵列的 CCD 相机动态范围 65000, 其像元 25 μm . 在图 1(b) 中, 800 nm 基频光经 BBO 晶体倍频后, 对等离子体进行阴影成像, 放大倍数为 14, 具体细节见文献^[13]. 系统的时间分辨本领为探针光的脉宽, 约 150 fs, 由 CCD 像元大小限制的空间分辨本领约 2 μm .

图 2 为激光脉冲 45°入射时沿靶面反射方向观

* 国家自然科学基金(批准号: 10075075 和 19825110)和国家高技术惯性约束聚变(ICF)基金资助的课题.

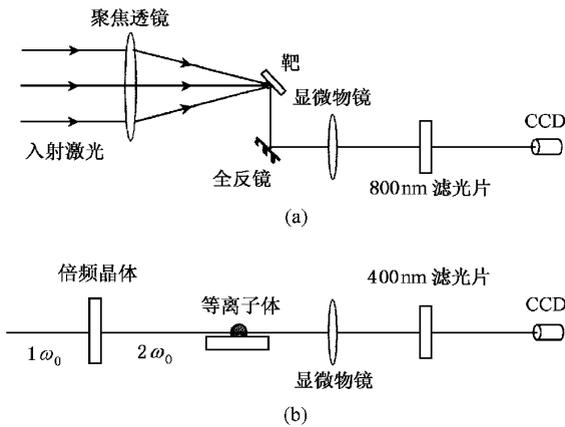


图1 实验布局示意图 (a)为等离子体基频散射光图像测量;
(b)为使用 $2\omega_0$ 光进行等离子体光学诊断测量

测的 A1 等离子体基频散射光图像. 为了清楚地显示强度分布, 对图像进行了增强对比度处理. 对入射激光的反射方向的反射光进行测量, 可对等离子体进行诊断. 探测器接受到的反射光主要来自三种相互作用, 受激 Raman 散射 (SRS), 受激 Brillouin 散射 (SBS) 和角反射 (specular reflection). SRS 发生区域为 $n_e \leq n_c/4$ 的区域, 特征频率为 $\omega_0/2$. SBS 可发生在整个 $n_e \leq n_c$ 的整个区域, 特征频率为 ω_0 . 这两种散射都属于不稳定性过程. 角反射类似于镜面反射, 主要方向为入射激光的反射方向, 对于斜入射情况, 激光反转点密度为 $n_e = n_c \cos^2 \theta$, θ 为激光入射角. 由于角向散射光路径为亚稠密等离子体区, 所以亚稠密等离子体区的物理过程会对角向散射光的性质 (发散角、偏振态、光谱等) 产生影响. 连续改变入射角, 可连续改变反转点密度, 比如 $0^\circ - 60^\circ$ 激光入射角对应的反转点密度为 $n_c - n_c/4$ 区域. 由于我们使用了 800 nm 基频光干涉滤光片, 所以 CCD 接收到的散射光主要是角反射和 SBS 的贡献. 与入射角 45° 对应的反转点密度为 $n_c/2$, 因此此图反映的是 $n_c/2$ 以下区域的散射光强度分布. 由图可见, 等离子体的散射光强度分布极不均匀, 破裂成了几束. 大家知道, 入射激光强度的非均匀性有可能导致激光脉冲在等离子体中的成丝现象. 为了进一步确定是否在等离子体中出现了成丝, 我们利用倍频光对等离子体进行了光学诊断. 图 3 为激光等离子体作用后 5 ps 时的铝等离子体阴影图, 实验条件为 50 ps 预脉冲, 激光正入射. 很明显, 在等离子体中出现了很亮的丝状结构. 由于对入射激光脉冲进行了人为调制, 所以实验所用激光束的强度分布不是很均匀,

但是比图 2 所示的强度变化好得多. 这说明实验所观测到的光束破裂和丝状结构的原因是不稳定性, 而不是入射激光的非均匀性直接结果.

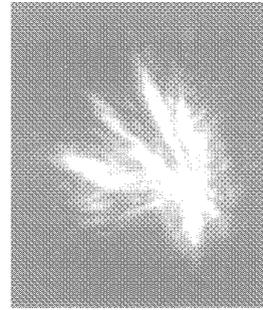


图2 用 CCD 在入射激光反射方向拍摄的等离子体基频散射光图像

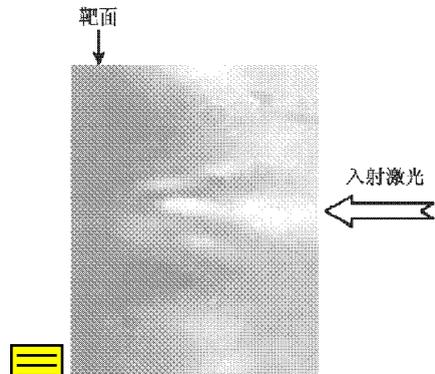


图3 激光主脉冲过后 5 ps 时的等离子体阴影图, 在亚稠密等离子体区出现了丝状结构

下面我们考虑一个强度分布不均匀的激光脉冲对等离子体局域密度的影响. 在超短激光脉冲与等离子体相互作用中, 离子可以看成不动背景的条件为^[14]激光脉宽 τ 远小于离子运动时间 t_i , 这里 $t_i = \sqrt{10m_i/m_e}/\omega_p$. 对于 $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ 的激光脉冲产生的铝等离子体, 在 $0.1n_c$ 区域, 离子运动时间尺度为 0.93 ps. 本实验中使用的激光脉冲宽度为 150 fs, 所以, 可以将离子看成不动的背景, 而只考虑电子在高频激光场中的振荡. 在这种情况下, 电子密度和离子密度可写为

$$n_e = n_0 + \delta n_e, n_i = n_0. \quad (1)$$

Poisson 方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = -4\pi e \delta n_e, \quad (2)$$

这里 \mathbf{E} 为电荷分离引起的电场. 入射激光电场的非均匀性会产生场压强梯度, 即有质动力

$$f_p = -\frac{e}{c} \mathbf{u} \times (\nabla \times \mathbf{A}) - (\mathbf{u} \cdot \nabla) p$$

$$= -m_e c^2 \nabla \gamma, \quad (3)$$

其中 γ 为相对论因子. 对于不同激光偏振态, γ 值不同.

对于振幅为 $a^2 = a_0^2 (\sin^2 \omega_0 t + \cos^2 \omega_0 t)$ 的圆偏振光, $\gamma = \gamma_0 = \sqrt{1 + a_0^2}$, 这里 a_0 为归一化电场振幅

(归一化电子振荡动量), $a_0 = \frac{eE_0}{m_e c \omega_0} = 0.853 [I_{18} \lambda_{\mu\text{m}}^2]^{1/2}$. 可见, 振幅和有质动力都与时间无关. 对于

线偏振的入射激光, 其振幅 $a^2 = a_0^2 \cos^2 \omega_0 t = \frac{1}{2} a_0^2 (1 + \cos^2 \omega_0 t)$, 相对论因子可展开为 $\gamma = \gamma_0 + \gamma_2 \cos^2 \omega_0 t + \dots$. 有质动力除了含有一般意义下的光压项外, 还有二倍频的振荡分量. 此振荡分量对激光能量吸收和电子加速有重要影响^[15-17].

为了简单起见, 这里只考虑圆偏振态情况. 由电子密度涨落引起的电荷分离场会反作用于有质动力, 二者平衡时有

$$f_p = eE, \quad (4)$$

即

$$m_e c^2 \nabla^2 \gamma_0 = 4\pi e^2 \delta n_e. \quad (5)$$

在于 $z = z_0$ 的界面上 (5) 式可以写为

$$m_e c^2 \left\{ \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) (1 + a_0^2)^{1/2} \right\} = 4\pi e^2 \delta n_e. \quad (6)$$

对于我们现有的实验条件, $a_0 \ll 1$, 上式可以简化为

$$\delta n_e = \frac{1}{m_e c \omega_0^2} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right), \quad (7)$$

式中 I 为激光强度. 至此我们得到归一化的电子密度分布

$$N_e = 1 + \frac{\partial n_e}{n_0} = 1 + \frac{c}{\omega^2 n_0} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right). \quad (8)$$

为简单起见, 考虑光强非均匀性为一维分布情况. 设激光强度分布由两部分组成, 均匀分量 I_0 和非均匀分量 $I = I_0 \beta \cos kx$, 这里用 β 表示强度非均匀性, k 为非均匀性空间波数. 由 (8) 式得

$$N_e = 1 + \frac{1}{m_e c \omega_0^2 n_0} (I_0 \beta k^2 \cos kx). \quad (9)$$

可见, 有质动力引起的密度涨落和激光强度的非均匀性成正比.

激光强度非均匀性引起的局域密度涨落对激光传播有重要影响. 在低密度涨落区, 等离子体折射系

数增大, 激光波面弯曲, 光束汇集, 导致激光强度增高, 密度进一步降低, 此正反馈过程将导致光束破裂、成丝. 成丝不稳定性又会诱发或加剧其他不稳定性. 成丝不稳定性按产生机制的不同, 可分为热成丝、有质动力成丝和激光强度很高时的相对论成丝. 实验中对实验条件进行了控制, 使热成丝阈值强度远大于所用激光强度.

热成丝机制在稠密冷等离子体中是比较重要的, 其发生阈值为^[18]

$$I_{\text{th}} = 2 \times 10^{19} \left(\frac{n_c}{n_e} \right) \left(\frac{\lambda_{\mu\text{m}}}{L_{\mu\text{m}}} \right)^2 \frac{T_{\text{keV}}^5}{Z^2}, \quad (10)$$

式中 L 为等离子体尺度, λ 为入射激光波长, T 为电子温度, Z 为等离子体平均电离态, 式中已标明各量的单位. 对于 $L = 100 \mu\text{m}$, $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$, $T = 5 \text{ keV}$ ^[19], $Z = 10$, $n_c/n_e = 0.1$, 有 $I_{\text{th}} = 4 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$. 所以热成丝在我们的实验条件下不是很重要. 和入射激光强度直接相关的有质动力成丝发生阈值为^[20]

$$I_p = 2 \times 10^{15} L_{\mu\text{m}}^{-1} \lambda_{\mu\text{m}}^{-1} T_{\text{keV}} \frac{n_c}{n_e}. \quad (11)$$

使用上面列出的参数, 有 $I_p = 1.25 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$. 结合本实验条件 ($I = 5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$) 可知, 激光脉冲可以发生有质动力成丝不稳定性.

从 Brillouin 散射关系出发, 可以得到有质动力成丝不稳定性的最大空间增长率和时间增长率^[21, 22]

$$k_i = \frac{1}{8} \left(\frac{v_{\text{os}}}{v_e} \right)^2 \left(\frac{\omega_p^2}{k_0 c^2} \right),$$

$$k_r = \frac{1}{2} \frac{v_{\text{os}}}{v_e} \frac{\omega_p}{c}, \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{1}{8} \left(\frac{v_{\text{os}}}{v_e} \right)^2 \left(\frac{\omega_p^2}{\omega_0} \right),$$

这里 k_r 表示垂直于光波传播方向的空间增长率, k_i 为平行于激光传播方向的空间增长率, γ 为时间增长率. v_{os} 为电子的 quiver 速率, v_e 为电子的热速率. 对于本实验的典型等离子体参数, $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$, $T = 5 \text{ keV}$, $m_e/n_e = 0.1$, $I = 5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$, 有质动力成丝最小增长尺度约为 $40 \mu\text{m}$, 空间波长约 $10 \mu\text{m}$, 时间增长尺度约 100 fs . 由于实验中采用了预脉冲技术, 在主脉冲到达之前已经产生了一个约 $70 \mu\text{m}$ 尺度的预等离子体^[12], 所以成丝有足够的发展空间.

在实验中我们还得到了激光成丝的其他证据. 在 45° 入射时, 我们测量了等离子体在角反射方向发射的二次谐波, 发现二次谐波强度随入射激光功

率呈非线性增长¹⁾,这是激光成丝的有力证据^[23].在使用 NaI 闪烁体测量等离子体硬 X 射线的实验中,能量大于 300 keV 的光子产额占了一定比例,由硬 X 射线连续谱推算的超热电子温度达几十 keV,比传统的定标率高很多^[24].一般的非线性超热电子产生机理对实验结果很难解释.成丝不稳定性可能是产生高能硬 X 射线的原因之一.

成丝不稳定性可以激发或增强其他等离子体不稳定性 and 非线性效应^[15-22].如果等离子体不稳定性

增长率大,会导致等离子体局域密度分布的极端非均匀性,甚至湍流.

我们采用光学阴影照相法和散射光成像,对飞秒激光等离子体中的局域密度涨落进行了研究.在实验中观察到了成丝不稳定性现象,机制为有质动力成丝.我们还从理论上对有质动力引起的局域密度涨落进行了简单分析.

感谢中国科学院物理研究所光物理实验室飞秒激光器运行组对本工作的大力支持.

- [1] O. Willi, P. T. Rumsby, *Opt. Commun.*, **37** (1981) 45.
- [2] P. E. Young, *Phys. Fluids*, **B3** (1991) 2331.
- [3] H. A. Baldis, P. B. Corum, *Phys. Rev. Lett.*, **45** (1981) 1502.
- [4] R. A. Hass, M. J. Boyle, K. R. Manes, J. E. Swain, *J. Appl. Phys.*, **47** (1976) 1318.
- [5] J. A. Stamper, R. H. Lehmburg, A. Schmitt *et al.*, *Phys. Fluids*, **28** (1985) 2563.
- [6] Y. Kato, K. Mima, *Appl. Phys.*, **B29** (1982) 186.
- [7] S. Skupsky, R. W. Short, T. Kessler *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **66** (1989) 3456.
- [8] J. Fuchs *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **80** (8) (1998) 1658.
- [9] M. Tabak *et al.*, *Phys. Plasmas*, **1** (5) (1994) 1626.
- [10] X. M. Zhao, J. C. Diels, C. Y. Wang, J. M. Elizondo, *IEEE J. Quantum Elect.*, **31** (1995) 599.
- [11] P. Sprangle, E. Esarey, J. Krall *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **69** (1992) 2200.
- [12] Y. T. Li, J. Zhang, L. M. Cheng *et al.*, *Science in China* (accepted) [李玉同、张杰、陈黎明等,中国科学(已接收)].
- [13] Yu-tong Li, Jie Zhang, Li-ming Chen *et al.*, *Acta Physica Sinica*, **49** (2000) 1400 (in Chinese) [李玉同、张杰、陈黎明等,物理学报, **49** (2000) 1400].
- [14] D. C. Barnes, T. Kurki, T. Tajima, *IEEE Transactions on Plasma Science*, **15** (2) (1987) 154.
- [15] W. L. Kruer, K. Estabrook, *Phys. Plasmas*, **28** (1985) 430.
- [16] W. Yu *et al.*, *Phys. Rev.*, **E58** (2) (1998) 2456.
- [17] W. Yu *et al.*, *Phys. Rev.*, **E58** (5) (1998) 6533.
- [18] W. L. Kruer, *Comments Plasma Phys. Contr. Fusion*, **9** (1985) 63.
- [19] P. Zhang *et al.*, *Phys. Rev.*, **E57** (1998) 1.
- [20] P. E. Young, J. H. Hammer, S. C. Wilks, W. L. Kruer, *Phys. Plasmas*, **2** (7) (1995) 2825.
- [21] W. L. Kruer, *The physics of laser plasma interactions*, Addison-Wesley publishing company Redwoodcity, California, 1988.
- [22] Jia-tai Zhang, *Physics of Laser Plasma Interaction and Simulation* (Henan Publishing Company of Science and Technology, Zhengzhou, 1999) p. 174. (in Chinese) [张家泰,激光等离子体相互作用物理与模拟(河南科学技术出版社,郑州,1999) p. 174].
- [23] E. Schifano, S. D. Baton, N. Biancalana *et al.*, *Laser and Particle Beams*, **12** (1994) 435.
- [24] P. Zhang *et al.*, *Phys. Rev.*, **E57** (1998) R3746.

1) 赵理曾,私人通讯.

STUDY ON FILAMENTATION IN FEMTOSECOND LASER PLASMAS^{*}

LI YU-TONG^{1,2)} ZHANG JIE¹⁾ CHEN LI-MING^{1,2)} ZHAO LI-ZENG¹⁾ XIA JIANG-FAN¹⁾ TENG HAO^{1,2)}

LI YING-JUN¹⁾ ZHU CHENG-YIN²⁾ JIANG WEN-MIAN²⁾

¹⁾ *Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

²⁾ *Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

(Received 27 July 2000)

ABSTRACT

The local density fluctuation in femtosecond laser plasmas has been studied using optical shadowgraphy and scattering imaging techniques. The instability of filamentation in the laser plasma has been observed and the local density fluctuation studied. The result shows that this instability of filamentation is caused by the ponderomotive force.

Keywords : femtosecond laser plasmas , ponderomotive filamentation

PACC : 5250J , 5225

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10075075 and 19825110) and the Inertial Confinement Fusion Foundation of the National High Technology Development Program.