

DOI: 10.12086/oe.2022.210318

## FLEET 光学系统参数优化

王建新<sup>1,2\*</sup>, 陈爽<sup>3</sup>, 陈力<sup>3\*</sup>, 杨文斌<sup>3</sup>,  
邱荣<sup>1,2</sup>, 白福忠<sup>4\*</sup>, 李同洪<sup>5</sup>

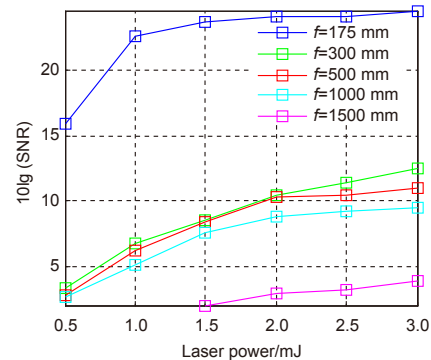
<sup>1</sup>西南科技大学 极端条件物质特性联合实验室, 四川 绵阳 621010;

<sup>2</sup>四川省军民融合研究院, 四川 绵阳 621010;

<sup>3</sup>中国空气动力研究与发展中心, 设备设计与测试技术研究所,  
四川 绵阳 621000;

<sup>4</sup>内蒙古工业大学 机械工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

<sup>5</sup>国家金刚石工具质量检验检测中心, 湖北 鄂州 436000



**摘要:** FLEET 流场测速时, 荧光丝的形态和特征影响流场速度测量的精度和覆盖范围, 而这些参数又取决于 FLEET 光学系统参数, 有必要对 FLEET 光学系统参数对荧光丝的影响规律进行研究。本文研究了光学系统的主要参数飞秒激光脉冲能量和聚焦透镜焦距对荧光丝长度、光丝峰值强度、功率密度、信噪比的影响, 并在最优实验参数条件下, 对不同压强下空气飞秒荧光丝的寿命进行探测。实验表明, 飞秒荧光丝的激发存在功率密度阈值, 本实验中大致在  $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ , 光学系统参数优化应以飞秒荧光丝信噪比高且光丝强度分布均匀为基准。飞秒荧光丝的寿命约为几微秒, 因此, 两次测速采样的时间间隔应小于微秒量级。本文研究结果可以为 FLEET 光学系统主要参数确定提供依据。

**关键词:** FLEET; 流速测量; 荧光寿命; 图像处理

中图分类号: O439

文献标志码: A

王建新, 陈爽, 陈力, 等. FLEET 光学系统参数优化 [J]. 光电工程, 2022, 49(4): 210318

Wang J X, Chen S, Chen L, et al. Parameters optimization of FLEET optical system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(4): 210318

## Parameters optimization of FLEET optical system

Wang Jianxin<sup>1,2\*</sup>, Chen Shuang<sup>3</sup>, Chen Li<sup>3\*</sup>, Yang Wenbin<sup>3</sup>,  
Qiu Rong<sup>1,2</sup>, Bai Fuzhong<sup>4\*</sup>, Li Tonghong<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

<sup>2</sup>Sichuan Civil-military Integration Institute, Mianyang, Sichuan 621010, China;

<sup>3</sup>Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamic Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China;

<sup>4</sup>School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot, Inner Mongolia 010051, China;

<sup>5</sup>National Center of Quality Inspection and Testing on Diamond Tools, Ezhou, Hubei 436000, China

**Abstract:** Using FLEET to measure flow field velocity, the shape and feature of fluorescent filament impact on the accuracy and range of the velocity measurement, and are determined by the parameters of the FLEET optical

收稿日期: 2021-09-30; 收到修改稿日期: 2022-01-14

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (11902277); 国家自然科学基金面上项目 (62165011, 51765054)

\*通信作者: 王建新, wangjianxinkitty@163.com; 陈力, chenli\_03@163.com; 白福忠, fzbaim@163.com。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

system. Therefore, it is necessary to study the influence of FLEET optical system parameters on fluorescent filament. In this paper, the influences of main parameters for optical system, namely pulse energy of femtosecond laser and focal length of the focusing lens, on the length of filament, peak intensity, energy density of filament and signal to noise ratio are investigated by experiment. The lifetime of air fluorescent filament under different pressures are measured with the optimum experiment parameters. Experiments show that there is a power density threshold for femtosecond fluorescent filaments excitation, which is about  $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$  in this experiment. The optimization of optical system parameters should be based on the high signal-to-noise ratio and uniform intensity distribution of filament. The lifetime of femtosecond fluorescent filaments is about several microseconds. Therefore, the time interval between two velocity measurement samples should be less than microseconds. The results are useful for determining the main parameters of FLEET optical system.

**Keywords:** FLEET; velocity measurement; fluorescent lifetime; image processing

## 1 引言

FLEET (Femtosecond laser electronic excitation tagging) 是 Miles<sup>[1]</sup> 在 2011 年提出的一种新型流场测速技术, 它以氮分子作为示踪粒子, 利用飞秒激光器激发含氮气体产生的荧光作为探测信号, 从流场中的荧光丝的相对位置变化计算出流场速度<sup>[2-3]</sup>。即, 用一台飞秒激光器、一个 ICCD 相机及一个控制时序的信号触发器, 配合相应的光学系统, 就可以进行流场速度测量。与其它示踪流场测量技术相比<sup>[4-5]</sup>, 该技术无需添加示踪粒子, 不存在示踪粒子跟随性和污染流场的问题, 流速计算原理简单清晰, 具有十分广阔的发展前景。

目前, 国内外研究者对 FLEET 光谱特性<sup>[6]</sup>、流场速度测量<sup>[7-10]</sup> 及荧光丝对周围的温度场<sup>[11-15]</sup> 影响等方面开展研究, 在实验室环境下对高声速和超高声速的流场进行流速测量的实验验证, 取得了良好效果。

荧光丝作为反演速度的信号载体, 其形态对测量精度和测量范围都有明显影响。其中, 荧光丝的横截面宽度会影响空间分辨率、荧光丝的长度影响信号采集的覆盖范围、荧光丝的寿命将决定流场速度测量的时间采样频率、荧光丝图像的信噪比 (SNR) 将影响荧光丝的定位。所以, 需要深入研究 FLEET 光学系统

参数对荧光丝性能的影响。系统主要参数包括激光频率、激光重复频率、激光能量、聚焦透镜的焦距和探测器门宽, 其中, 激光频率、激光重复频率和探测器门宽已有研究<sup>[1]</sup>。本文在已有参数研究的基础之上, 主要研究激光能量和聚焦透镜对荧光丝形态影响的规律, 通过分析荧光丝的 ICCD 图像, 判断出飞秒荧光丝激发的阈值功率, 利用图像处理技术提取低信噪比下荧光丝尺寸, 并将信噪比高、荧光丝的强度分布连贯且均匀、荧光丝的长度适中作为优选光学参数的基本标准, 确定系统的优化参数。进而, 在所获得优化参数条件下, 对不同压强下的空气荧光丝寿命进行研究, 为 FLEET 流场测量的光学系统参数的确定提供依据。

## 2 实验系统分析

图 1 是 FLEET 实验光路示意图, 飞秒激光被聚焦透镜 L 聚焦, 将位于透镜后焦平面附近的含氮气体电离为原子, 在氮原子复合的过程中释放荧光, 形成飞秒荧光丝。通过信号触发器 DG645 控制飞秒激光器信号与 ICCD 之间的时间延迟, 就可以得到不同时间延迟下的荧光丝图像。

飞秒激光器的能量和聚焦透镜 L, 共同影响激发荧光丝的激光功率密度。假设聚焦透镜焦距用  $f$  表示,

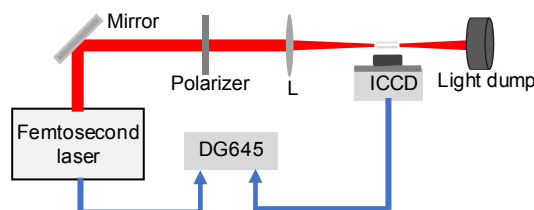


图 1 FLEET 实验光路示意图

Fig. 1 FLEET experiment schematic diagram

激光的束腰半径用  $\omega$  表示, 则在聚焦透镜后焦面的光腰宽度为

$$\omega_0 \approx \frac{f\lambda}{\pi\omega}, \quad (1)$$

而飞秒激发荧光丝基本出现在透镜 L 后焦平面的位置, 所以, 光腰位置的光斑横截面的功率密度可以近似表示为

$$P \approx \frac{E}{\pi\omega_0^2\tau_p}, \quad (2)$$

其中:  $E$  表示激光的能量,  $\tau_p$  表示飞秒的激光脉宽。

实验中, 采用的飞秒激光器是 Spectra Physics 的 Spitfire ACE 系列, 中心波长为  $(780 \pm 20)$  nm, 激光重复频率为 1000 Hz,  $M^2=1.45$ , 实际脉宽 50 fs, 采用刀口法测量束腰半径为 2.07 mm, 能量可调, 实验中最大的能量为 3 mJ。ICCD 是 Andor DH734, 空间分辨率 1024 pixels $\times$ 1024 pixels, 像元尺寸 13  $\mu$ m。ICCD 的快门宽度取已有报道的最优值 1  $\mu$ s。

ICCD 成像系统缩放比需要预先测量, 实验中利用直钢尺作为目标标尺, 利用 ICCD 获取其图像, 标尺像与标尺物之比即为成像系统的缩放比。

实验采集的标尺目标物见图 2(a), 利用二值化进行阈值分割, 利用 Radon 投影算法, 可以判断出图 2(b) 中红色圆点的位置坐标, 计算出标尺的倾斜度  $(-1.1^\circ)$ , 沿顺时针旋转  $1.1^\circ$ , 完成标尺的倾斜校正, 结果见图 2(c), 经计算该成像系统缩放比为 0.534。

### 3 实验及数据分析

通过更换不同的聚焦透镜及调节激光能量研究系统光学参数对飞秒荧光丝形态的影响。实验中, 聚焦透镜 L 依次使用 175 mm、300 mm、500 mm、1000 mm 及 1500 mm 共五种不同焦距, 每个聚焦透镜在激光能量从 0.5 mJ~3 mJ 等间隔分为 6 档的情况下, 对实验室的静止空气进行飞秒激光的电离激发, 共采集 30 幅图像, 部分结果见图 3。图中, 飞秒激光沿着左

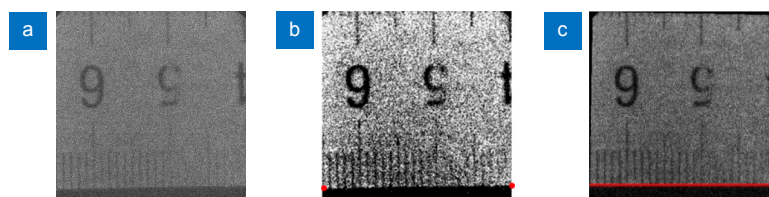


图 2 标尺校准。

(a) 标尺原图; (b) 阈值分割后标尺图; (c) 倾斜校正后标尺

Fig. 2 Scaling calibration.

(a) Original scale; (b) After threshold segmentation; (c) After tilt correction

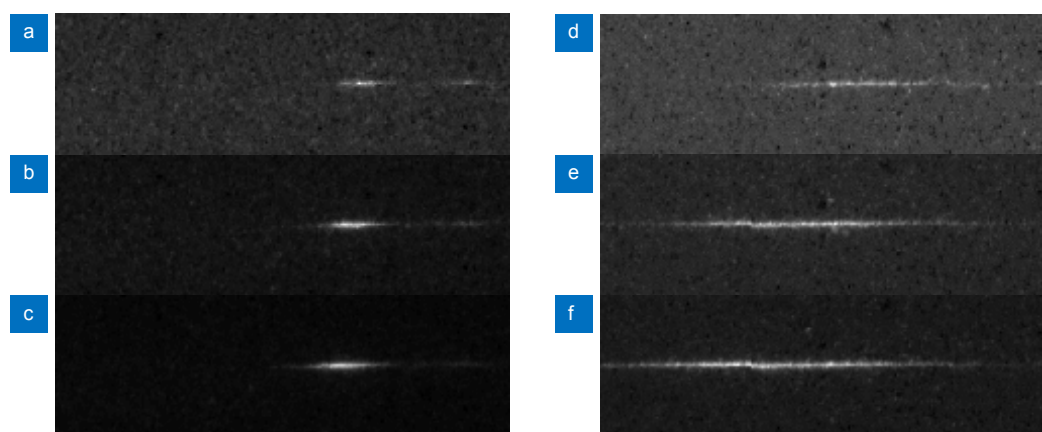


图 3 不同焦距和激光能量下的空气飞秒荧光丝对比图。

(a)~(c) 为焦距 300 mm, 激光能量依次为 1 mJ、2 mJ 和 3 mJ;

(d)~(f) 为焦距 1000 mm, 激光能量依次为 1 mJ、2 mJ 和 3 mJ

Fig. 3 Air fluorescent filament images excited by femtosecond laser with different focal length and laser energy.

(a)~(c) With 300 mm focus length and 1 mJ, 2 mJ and 3 mJ laser energy respectively;

(d)~(f) With 1000 mm focus length and 1 mJ, 2 mJ and 3 mJ laser energy respectively

侧向右侧传输, 每幅图片的灰度显示范围以各自峰值为上限做归一化处理。由于更换透镜的时候, 焦平面在 ICCD 中的位置略有差异, 所以, 不同焦距光丝中心位置对比, 不具有参考意义。

### 3.1 荧光丝图像处理

为准确获取荧光丝的长度和中心位置, 需要对图像进行处理<sup>[16]</sup>。处理步骤如下 (图 4):

① 将荧光图沿  $x$  轴方向投影, 见图 4(a) 中箭头指示, 得一维强度曲线  $I_y$ , 在曲线峰值附近两侧寻找最小值, 作为荧光丝上下两个边界, 用  $y_1$  和  $y_2$  表示, 见图 4(b) 中的红点。将  $y_1$  和  $y_2$  以内的图像, 作为有效图像, 用  $I_s$  表示, 将原始图像剔除  $I_s$  后的图像, 作为噪声背景, 用  $I_n$  表示。

② 将  $I_s$  和  $I_n$  分别沿  $y$  轴方向做投影, 得到  $I_{sx}$  和  $I_{nx}$  两条曲线, 见图 4(c)。图中可见噪声导致曲线起伏比较明显, 需进行去噪处理。

③ 采用空间频率域低通滤波对  $I_{sx}$  和  $I_{nx}$  进行平滑

处理, 图 4(d) 是  $I_{sx}$  滤波前后的对比结果。滤波处理后的信号与噪声曲线交叉点见图 4(e) 中绿色的方点, 作为飞秒荧光丝的有效区域左右两个边界, 用  $x_1$  和  $x_2$  表示。整个荧光丝的有效范围是图 4(f) 中长方形区域。

④ 将长方形区域内 ( $x \in (x_1, x_2); y \in (y_1, y_2)$ ) 灰度的平均值作为阈值, 对荧光丝图像进行二值化处理, 见图 5(a), 这样便可将飞秒荧光丝的有效区域与背景有效分离。

⑤ 利用数字形态学中的骨架提取得到荧光丝的中心线, 见图 5(b)。

利用这些数据, 可以计算出飞秒荧光丝在  $x$  轴方向和  $y$  轴方向的中心位置及光丝长度。

### 3.2 光学参数对荧光丝峰值强度和功率密度的影响

表 1 是不同聚焦透镜焦距和飞秒激光功率激发的荧光丝的峰值强度的实验结果, 结合图 3 飞秒荧光丝 ICCD 图像可以看出, 在焦距相同时, 随着激光能

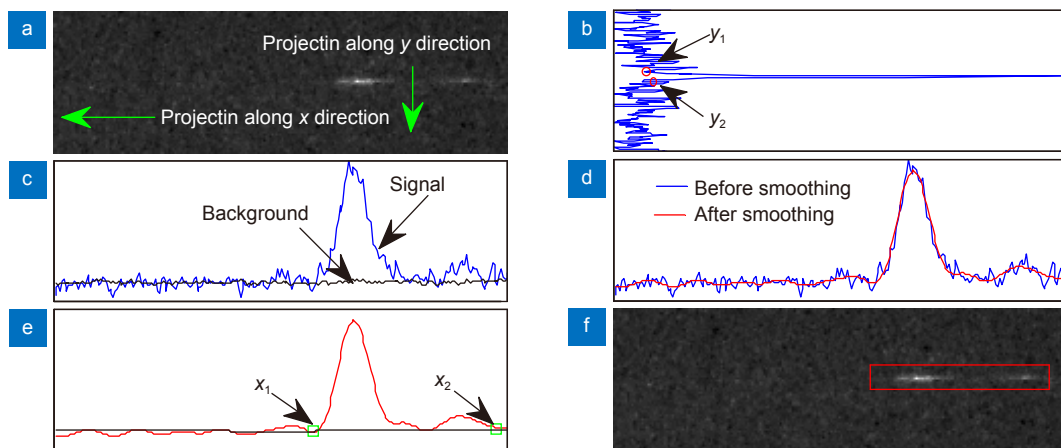


图 4 飞秒荧光丝的有效区域界定流程。

(a) 空气荧光丝投影方向; (b) 沿  $x$  轴方向投影后的一维曲线  $I_y$ ; (c)  $I_s$  和  $I_n$  分别沿  $y$  轴方向投影后的曲线; (d)  $I_{sx}$  在空间频率域滤波前后对比曲线; (e) 空间频率域低通滤波后的  $I_{sx}$  和  $I_{nx}$ ; (f) 飞秒荧光丝的有效区域

Fig. 4 Process for definition of effective area of fluorescent filament.

(a) Projection directions; (b) One dimension curve of projection along  $x$  direction,  $I_y$ ; (c) Projections of signal and background along  $y$  direction,  $I_s$  and  $I_n$ ; (d)  $I_{sx}$  curve before and after filtering in space frequency domain; (e) After space frequency filtering of  $I_{sx}$  and  $I_{nx}$ ; (f) Effective area of fluorescent filament



图 5 飞秒荧光丝几何特征提取。

(a) 二值化结果; (b) 中心线提取

Fig. 5 Geometric feature extraction of fluorescent filament.

(a) Result of binarization; (b) Center line extraction

表 1 激光功率和聚焦透镜焦距长度对光纤最强峰值的影响

Table 1 The maximum gray affected by laser power and focal length

Laser energy /mJ	Focal length of focus lens/mm				
	175	300	500	1000	1500
0.5	23759	1216	764	750	无信号
1.0	205599	3840	2375	1950	无信号
1.5	345641	5377	3614	2882	1071
2.0	541298	9239	6504	3711	1265
2.5	575889	13876	7844	4508	1497
3.0	610190	17881	10900	5118	1795

量增加光纤中心向左侧移动, 即向着聚焦透镜方向变长, 峰值灰度增加; 当激光能量相同时, 荧光丝随着焦距的增加而变长, 峰值灰度降低。

利用式 (1) 和式 (2), 可以计算出实验中激发空气荧光丝时在后焦平面处的激光功率密度, 结果见表 2。结合表 1 和表 2, 可以判断出激发荧光丝的阈值功率密度约为  $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 。飞秒激发荧光丝中会出现光纤钳制效应 (intensity clamping)<sup>[3]</sup>, 这是导致荧光丝的长度随着激光功率密度增加而变长的原因。

### 3.3 光学参数对荧光丝长度和图像信噪比的影响

图像信噪比是荧光丝图像和背景噪声均方根之比, 可以用下面公式计算:

$$SNR = \frac{\sqrt{\sum I_s^2/n_s}}{\sqrt{\sum I_n^2/n_n}}, \quad (3)$$

其中:  $n_s$  和  $n_n$  分别代表信号和噪声的采样点数。

对不同聚焦透镜和激光能量组合条件下获取的 30 幅荧光丝图像, 依次重复图 4 和图 5 的处理流程, 可获得信噪比和荧光丝长度, 见图 6。从实验结果可知, 激光能量保持不变时, 随着聚焦透镜焦距增加, 光纤变长且图像信噪比下降; 在焦距保持不变时, 随着激光能量的增加, 光纤变长且信噪比增加。飞秒激

光器的能量在 3 mJ 时, 会聚透镜焦距为 175 mm, 虽然信噪比最高, 但是光纤长度只有 1.09 mm, 不是最佳的流场测量信号载体; 会聚透镜焦距为 300 mm 时, 荧光丝是强度不均匀的两部分, 所以该荧光丝也非最优的信号载体。聚焦透镜焦距在 1500 mm 时, 光纤最长为 17.01 mm, 但是信噪比只有 2.44, 所以, 此时的系统参数亦不是最优。聚焦透镜在焦距为 500 mm 和 1000 mm 时, 得到的空气荧光丝强度分布均匀, 信噪比较高, 可作为优质信号载体。在选择系统参数时, 应该确保荧光丝信噪比高、光纤光强分布均匀且有一定的长度。获取长的荧光丝, 可优选长焦距的聚焦透镜, 然后根据阈值功率计算出最小使用的激光能量, 再通过测量的图像计算信噪比并观察光纤的强度分布情况, 选择最优激光能量。

### 3.4 荧光丝寿命

基于上述试验系统参数优化分析, 我们选择会聚透镜焦距为 500 mm、激光能量为 3 mJ 下, 对封闭气腔内压强分别为 0.14 kPa、1.3 kPa、13 kPa 及 1 atm 的静止空气进行飞秒荧光丝寿命的研究。利用 ICCD 采集飞秒激光发射后延迟时间  $\Delta t$  的图像, 就可以分析荧光丝的寿命, 图 7 是归一化的荧光丝图像的峰值强度随延迟时间  $\Delta t$  变化曲线。

表 2 透镜后焦平面处的激光功率密度随激光能量和聚焦透镜焦距变化情况

Table 2 The laser power density at back focal plane with different laser power and focal length/(W/cm<sup>2</sup>)

Laser energy /mJ	Focal length of focus lens/mm				
	175	300	500	1000	1500
0.5	$7.22 \times 10^{14}$	$2.46 \times 10^{14}$	$8.84 \times 10^{14}$	$2.21 \times 10^{13}$	$9.82 \times 10^{12}$
1.0	$1.44 \times 10^{15}$	$4.91 \times 10^{14}$	$1.77 \times 10^{14}$	$4.42 \times 10^{13}$	$1.96 \times 10^{13}$
1.5	$2.17 \times 10^{15}$	$7.37 \times 10^{14}$	$2.65 \times 10^{14}$	$6.63 \times 10^{13}$	$2.95 \times 10^{13}$
2.0	$2.89 \times 10^{15}$	$9.82 \times 10^{14}$	$3.54 \times 10^{14}$	$8.84 \times 10^{13}$	$3.93 \times 10^{13}$
2.5	$3.61 \times 10^{15}$	$1.23 \times 10^{15}$	$4.42 \times 10^{14}$	$1.11 \times 10^{14}$	$4.91 \times 10^{13}$
3.0	$4.33 \times 10^{15}$	$1.47 \times 10^{15}$	$5.30 \times 10^{14}$	$1.33 \times 10^{14}$	$5.89 \times 10^{13}$

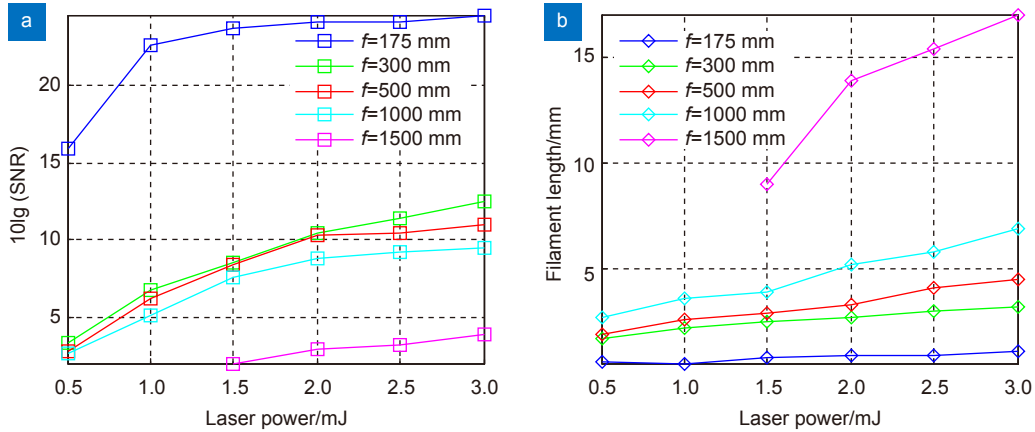


图 6 激光功率和聚焦透镜焦距, 对飞秒荧光丝的信噪比和光丝长度影响。

(a) 信噪比变化曲线; (b) 荧光丝的丝长变化曲线

Fig. 6 Fluorescent filament SNR and length vs laser power and focal length.

(a) SNR curve; (b) Filament length curve

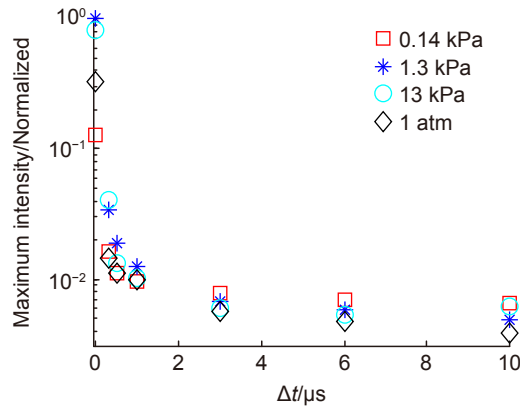


图 7 不同压强下, 空气飞秒荧光丝归一化峰值强度随延迟时间变化情况

Fig. 7 The normalized peak density of air fluorescent filament for different time delay under different pressures

从曲线可以看出, 压强会影响荧光丝的强度, 不同压强下, 荧光丝强度都是随着延迟时间增加而减弱, 但是, 荧光丝强度衰减率不同, 其中, 0.14 kPa 压强下, 荧光丝的衰减速度最慢, 1 atm 下荧光强度衰减最快。这是由于飞秒激发空气荧光丝时, 先是将氮气分子电离为原子, 在氮原子复合过程中释放出荧光, 当空气压强大时, 分子密度高, 氮气原子更容易发生碰撞复合为氮气分子而快速释放出荧光。在  $\Delta t=0$  时, 1.3 kPa 和 13 kPa 下的峰值强度较大, 在  $\Delta t=10 \mu s$  时, 最弱的光丝强度是最强光丝强度的 0.39%, 可见荧光丝的寿命可以达到几个微秒。

## 4 结论

搭建了飞秒激光激发气体荧光的实验系统。基于该系统研究了飞秒激光能量和聚焦透镜焦距这两个主要光学参数对产生的空气荧光丝的光丝峰值强度、功

率密度、信噪比以及光丝长度的影响, 并在优化的系统光学参数下, 对不同压强下静止空气的荧光丝寿命进行研究。实验结果表明, 飞秒荧光丝的产生存在激发功率密度阈值, 只有大于该阈值功率, 才会在聚焦透镜的后焦平面附近产生荧光丝, 飞秒激光器激发空气荧光丝所需的最低功率密度约为  $2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ ; 飞秒激光能量固定时, 聚焦透镜的焦距愈长, 光丝就愈长, 信噪比就低; 聚焦透镜焦距固定时, 荧光丝的长度随着激光能量增加而变长, 且荧光丝在  $x$  轴的中心位置随着能量增加沿着聚焦透镜方向移动。在实验研究的参数范围内, 聚焦透镜的焦距为 500 mm, 激光能量为 3 mJ 时荧光丝的品质比较优良。此时, 空气的荧光丝强度分布较均匀, 信噪比较高, 在此参数下, 测量空气在四种压强下的荧光丝寿命, 约为几微秒。因此, 采用该 FLEET 技术进行流场速度测量时, 两次测速采样的时间间隔应是微秒量级。

## 参考文献

- [1] Michael JB, Edwards MR, Dogariu A, Miles RB. Femtosecond laser electronic excitation tagging for quantitative velocity imaging in air[J]. *Appl Opt*, 2011, **50**(26): 5158–5162. doi: [10.1364/AO.50.005158](https://doi.org/10.1364/AO.50.005158).
- [2] Edwards M R, Dogariu A, Miles R B. Simultaneous temperature and velocity measurement in unseeded air flows with FLEET[C]//*Proceedings of 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Grapevine, 2013: 1–8. doi: [10.2514/6.2013-43](https://doi.org/10.2514/6.2013-43).
- [3] DeLuca N J, Miles R B, Kulatilaka W D, et al. Femtosecond laser electronic excitation tagging (FLEET) fundamental pulse energy and spectral response[C]//*Proceedings of 30th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, Atlanta, GA, 2014: 1–7. doi: [10.2514/6.2014-2227](https://doi.org/10.2514/6.2014-2227).
- [4] Ceglia G, Cafiero G, Astarita T. Experimental investigation on the three-dimensional organization of the flow structures in precessing jets by tomographic PIV[J]. *Exp Ther Fluid Sci*, 2017, **89**: 166–180.
- [5] Chen W, Wu Y, Luo J, et al. Theoretical research of point-measurement laser absorption spectroscopy[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, **46**(10): 180575.  
陈卫, 伍越, 罗杰, 等. 点测量激光吸收光谱技术理论分析[J]. *光电工程*, 2019, **46**(10): 180575.
- [6] Calvert C D, Zhang Y B, Miles R B. Characterizing FLEET for aerodynamic measurements in various gas mixtures and non-air environments[C]//*Proceedings of 32nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, Washington, D. C. , 2016: 1–16. doi: [10.2514/6.2016-3206](https://doi.org/10.2514/6.2016-3206).
- [7] Fisher J M, Smyser M E, Slipchenko M N, et al. Burst-mode femtosecond laser electronic excitation tagging for kHz-MHz seedless velocimetry[J]. *Opt Lett*, 2020, **45**(2): 335–338.
- [8] Hill J L, Hsu P S, Jiang N B, et al. Hypersonic N<sub>2</sub> boundary layer flow velocity profile measurements using FLEET[J]. *Appl Opt*, 2021, **60**(15): C38–C46.
- [9] Zhang Y B, Miles R B. Femtosecond laser tagging for velocimetry in argon and nitrogen gas mixtures[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(3): 551–554.
- [10] Zhang D Y, Li B, Gao Q, et al. Applicability of femtosecond laser electronic excitation tagging in combustion flow field velocity measurements[J]. *Appl Spectrosc*, 2018, **72**(12): 1807–1813.
- [11] Yang W B, Zhou J N, Chen L, et al. Temporal characterization of heating in femtosecond laser filamentation with planar Rayleigh scattering[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(10): 14883–14893.
- [12] Wang J X, Chen S, Chen L, et al. Measurement of FLEET influence on ambient air temperature by Rayleigh scattering[J]. *Opt Laser Technol*, 2022, **145**: 107456. doi: [10.1016/j.optlastec.2021.107456](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107456).
- [13] Limbach C M, Miles R B. Characterization of dissociation and gas heating in femtosecond laser plasma with planar Rayleigh scattering and Rayleigh scattering polarimetry[C]//*53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Kissimmee, Florida, 2015: 1–17. doi: [10.2514/6.2015-0932](https://doi.org/10.2514/6.2015-0932).
- [14] Limbach C M, Miles R B. Rayleigh scattering measurements of heating and gas perturbations accompanying femtosecond laser tagging[J]. *AIAA J*, 2017, **55**(1): 112–120.
- [15] Burns R A, Danehy P M, Peters C J. Multiparameter flowfield measurements in high-pressure, cryogenic environments using femtosecond lasers[C]//*Proceedings of 32nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, Washington, DC, 2016: 1–27.
- [16] Liao Q K, Lin S L, Lin Z X, et al. Electrowetting defect image segmentation based on improved Otsu method[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(6): 190388.  
廖钦楷, 林珊玲, 林志贤, 等. 基于改进Otsu的电润湿缺陷图像分割[J]. *光电工程*, 2020, **47**(6): 190388.

## 作者简介



【通信作者】王建新(1979-), 女, 博士, 副教授, 主要从事流场非接触式测量及自适应光学波前传感器的研究工作。

E-mail: wangjianxinkitty@163.com



【通信作者】白福忠(1979-), 男, 博士, 教授, 主要从事光学测量、机器视觉、图像处理方面的研究工作。

E-mail: fzbaiim@163.com

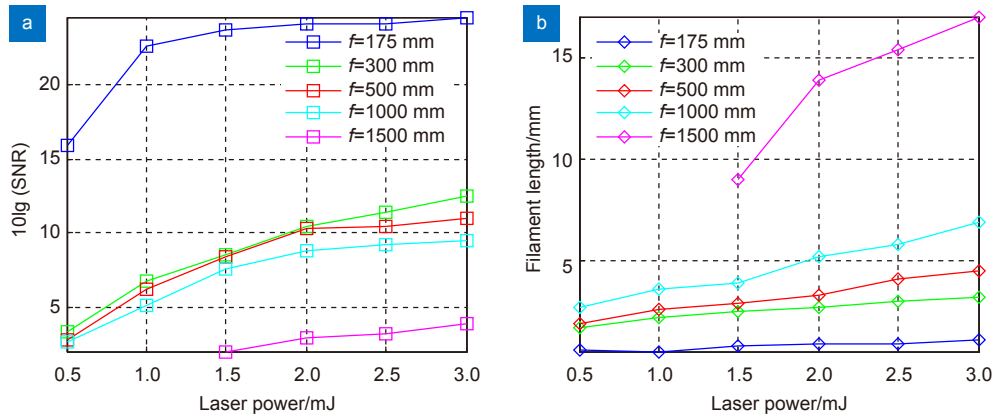


【通信作者】陈力(1980-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事流场显示与光学测量研究。

E-mail: chenli\_03@163.com

# Parameters optimization of FLEET optical system

Wang Jianxin<sup>1,2\*</sup>, Chen Shuang<sup>3</sup>, Chen Li<sup>3\*</sup>, Yang Wenbin<sup>3</sup>,  
Qiu Rong<sup>1,2</sup>, Bai Fuzhong<sup>4\*</sup>, Li Tonghong<sup>5</sup>



Fluorescent filament SNR and length vs laser power and focal length (a) SNR (b) filament length

**Overview:** Femtosecond laser electronic excitation tagging (FLEET) is proposed in 2011 as Molecular tagging velocity measurement technique. FLEET uses one femtosecond laser and one optical detector (usually ICCD) and one signal generator, and works with nitrogen fluorescence as tagging tracer. Its experimental system is simple and no injection problem of tracer particle, hence has a wide application prospect. Fluorescent filament features such as size and intensity distribution are very vital to the velocity measurement accuracy, which are decided by the optical system parameters. Therefore, it is particularly important to study the influence of optical system parameters on it.

In this paper, the effects of laser pulse energy and focal length are researched on the length, peak intensity, power density and signal-to-noise ratio of fluorescent filament by the experiment, and the threshold laser power of excited air fluorescent filament and the optimal system parameters are given. With optimal optical system parameters, the lifetime of still air fluorescence under 4 different pressures are shown.

The results show that there is a power density threshold for excitation of femtosecond fluorescent filaments. Only when femtosecond laser power is greater than threshold, the fluorescent filaments will be generated near the rear focal plane of the focusing lens. The minimum power density required for femtosecond laser to excite air fluorescent filaments is about  $2 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>. When the femtosecond laser energy is constant, the longer the focal length is, the longer the filament and the lower the signal-to-noise ratio are; When the focal length is constant, the length of the fluorescent filament becomes longer with the increase of laser energy, and the central position of the fluorescent filament in the  $x$ -axis direction moves toward the focusing lens. Within the parameter range of the experimental study, when the focal length of the focusing lens is 500 mm and the laser energy is 3 mJ, the quality of the fluorescent filament is relatively excellent. The filament has relative uniform intensity distribution and high signal-to-noise ratio. Under these parameters, the lifetime of air fluorescence under four pressures are about few microseconds. Therefore, when the flow field velocity is measured by FLEET, the time interval between two measurement samples should be less than a few microseconds. This research provides the basis for the optimization of optical system parameters in the flow field velocity measurement by FLEET.

Wang J X, Chen S, Chen L, et al. Parameters optimization of FLEET optical system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(4): 210318; DOI: 10.12086/oe.2022.210318

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11902277, 62165011, 51765054)

<sup>1</sup>Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; <sup>2</sup>Sichuan Civil-military Integration Institute, Mianyang, Sichuan 621010, China; <sup>3</sup>Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamic Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China; <sup>4</sup>School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot, Inner Mongolia 010051, China; <sup>5</sup>National Center of Quality Inspection and Testing on Diamond Tools, Ezhou, Hubei 436000, China

\* E-mail: wangjianxinkitty@163.com; chenli\_03@163.com; fzbaiim@163.com