

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.02.12

基于飞秒激光光丝引导放电的氨气测量技术

朱志峰¹, 李晓峰¹, 武腾飞^{1,2*}, 冯展宇³, 高强³, 李博³

(1. 中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所 计量与校准全国重点实验室, 北京 100095;
2. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 3. 天津大学 先进内燃动力全国重点实验室, 天津 300350)

摘要: 针对氨气(NH₃)精准检测的需求, 提出一种基于飞秒激光光丝引导放电的NH₃浓度测量技术。通过飞秒激光在空气中形成的长光丝引导放电, 结合光谱采集系统, 获取NH₃在不同条件下的等离子体发射光谱。利用发射光谱中的特征谱线峰面积比值和数据标定方法, 获得NH₃浓度的标定曲线, 分析了该谱线强度的一维空间分布。研究表明: 特征谱线峰面积比值和NH₃浓度具有优异的线性响应, 同时特征谱线强度的一维空间分布具有良好的稳定性。基于飞秒激光光丝引导放电的NH₃浓度测量技术可以实现NH₃的实时定量测量, 为NH₃的实时原位检测提供了新方法。

关键词: 飞秒激光; 光丝引导放电; 等离子体发射光谱; 氨气测量; 特征谱线; 一维空间分布; 数据标定; 实时原位检测

中图分类号: TB9; O43

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 02-0140-07

Ammonia measurement technology based on femtosecond laser filament-triggered discharge

ZHU Zhifeng¹, LI Xiaofeng¹, WU Tengfei^{1,2*}, FENG Zhanyu³, GAO Qiang³, LI Bo³

(1. National Key Laboratory of Metrology and Calibration, AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China; 2. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: To meet the demand for the precise measurement of ammonia (NH₃), this paper proposes an ammonia concentration measurement technology using femtosecond laser filament-triggered discharge. Through long filament-triggered discharge formed in air by femtosecond laser pulses, the plasma emission spectra of NH₃ under different conditions were obtained by using a spectral acquisition system. The calibration curve for NH₃ concentration was obtained by utilizing the ratio of peak areas of characteristic spectral lines in the emission spectra. The one-dimensional spatial distribution of the spectral line intensity was analyzed. The research results demonstrate that the ratio of characteristic spectral line peak areas exhibits excellent linear response to NH₃ concentration, and the one-dimensional spatial distribution of characteristic spectral line intensities exhibits good stability. The NH₃ concentration measurement technology based on femtosecond laser filament-triggered discharge enables real-time quantitative ammonia measurement, providing a new method for real-time in-situ detection of NH₃.

Key words: femtosecond laser; filament-triggered discharge; plasma emission spectra; ammonia measurement; characteristic spectral lines; one-dimensional spatial distribution; calibration; real-time in-situ detection

收稿日期: 2025-11-10; 修回日期: 2026-02-06; 录用日期: 2026-02-15; 发表日期: 2026-04-28

基金项目: 国家“十四五”计量技术基础科研项目(JSJL2022205XXXX)

引用格式: 朱志峰, 李晓峰, 武腾飞, 等. 基于飞秒激光光丝引导放电的氨气测量技术[J]. 计测技术, 2026, 46(2): 140-146.

Citation: ZHU Z F, LI X F, WU T F, et al. Ammonia measurement technology based on femtosecond laser filament-triggered discharge[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(2): 140-146.



0 引言

NH_3 是工业生产中的关键原料,若泄漏则会引发中毒、爆炸风险,需实时精准测量 NH_3 含量,保障生产安全^[1]。同时, NH_3 作为大气中重要的碱性气体,对二次颗粒物形成和酸沉降具有显著影响,是大气污染与农业面源排放的重要指标^[2-3]。另外, NH_3 是一种极具前景的氢载体的替代燃料,无碳结构使其成为缓解气候变化的清洁燃料,并且在生产 NH_3 的过程中不产生碳基温室气体排放^[4-5]。 NH_3 的精确监测是 NH_3 燃料生产和使用过程中的重要组成部分。快速、精准的测量 NH_3 浓度对化工安全、环境监测、工业生产及农业可持续发展具有重要意义^[6-7]。传统 NH_3 测量方法如离子色谱法、电化学传感器法等^[8-9],存在预处理复杂、响应速度慢或空间分辨力低等局限,难以满足复杂场景下的测量需求,而光学诊断技术,尤其是激光测量技术由于其原位非接触测量等优势,在 NH_3 的测量领域发挥着重要的作用。

目前,应用于 NH_3 浓度测量的光学诊断技术有:可调谐半导体激光吸收光谱技术(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)^[10-11]、激光诱导荧光技术(Laser-induced Fluorescence, LIF)^[12-14],激光诱导击穿光谱技术(Laser-induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)^[15]等。TDLAS技术通过检测 NH_3 分子在特定波长激光路径上的特征吸收,实现对其浓度的定量测量,属于视线测量技术,然而空间分辨力有限;LIF技术能够实现 NH_3 的高空间分辨力测量,但是进行 NH_3 浓度精确定量测量时,会受到荧光猝灭的影响。LIBS技术利用激光诱导产生等离子体,利用等离子体发射光谱进行 NH_3 浓度测量,该技术所使用的装置简单,具有可实时在线检测等优势。但是常见的纳秒激光诱导击穿光谱技术一般为单点测量,且易受连续辐射背景影响、定量分析结果稳定性不足。飞秒激光诱导击穿光谱技术可以有效地降低连续辐射背景影响,但飞秒激光诱导的等离子体信号强度通常较弱,限制了其测量灵敏度^[16-17]。飞秒激光在空气中传播可以产生一条长光丝(等离子体)^[18],利用该光丝可以引导长程放电,产生的放电等离子体

发射光谱的强度很高,且具有一维空间分辨特性^[19],在气体浓度测量领域具有一定的优势。

为满足 NH_3 精准检测的需求,本文提出一种基于飞秒激光光丝引导放电的 NH_3 浓度测量技术。通过飞秒激光在空气中形成的长光丝引导放电,在气体中形成稳定、可控的放电通道,激发气体分子产生特征发射光谱,结合光谱采集系统,实现对 NH_3 浓度的定量测量。系统分析飞秒激光光丝引导放电的 NH_3 测量的等离子体发射光谱,以及光谱寿命变化规律,建立特征发射光谱峰面积比值与 NH_3 浓度之间的标定模型,验证该技术进行 NH_3 测量的可行性,之后分析特征发射谱线强度的一维空间分布,为 NH_3 一维测量技术的发展提供实验支撑。

1 实验原理及装置

本文利用飞秒激光光丝引导放电进行氨气测量,主要利用飞秒激光成丝和飞秒激光光丝引导放电现象产生激光引导放电等离子体,利用等离子体发射光谱进行氨气组分测量。飞秒激光脉冲的峰值功率极高,飞秒激光在透明介质之中传播时,当激光功率超过钳制功率,非线性克尔效应会诱导飞秒激光自聚焦,多光子电离产生等离子体,而等离子体会导致激光散焦。当克尔效应和等离子体散焦两种作用达到动态平衡,激光脉冲将维持聚焦在透明介质之中传播,最终在介质中留下一条长且连续的等离子体通道^[19-20];利用飞秒激光产生的等离子体通道引导放电,可以产生稳定可控的放电等离子体通道^[19];之后利用等离子体发射光谱的谱线强度信息来标定气体组分浓度,实现对氨气组分的测量。基于上述原理搭建了由飞秒激光光源、高压放电系统、探测系统以及流场产生系统等组成的实验装置。

图1为飞秒激光光丝引导放电的氨气测量实验装置示意图。所用光源为钛宝石飞秒激光器(型号为Spitfire Ace),其重复频率为10 Hz,输出波长为800 nm,脉冲宽度为45 fs,脉冲能量为2.8 mJ,激光光束直径为12 mm。该激光经球面透镜(焦距为750 mm)聚焦后在空气中产生飞秒激光光丝。激光聚焦后的峰值功率密度为 $7.92 \times 10^{18} \text{ W/m}^2$ 。高压直流脉冲电源(型号为HVP20)用于产生方波电

压脉冲,使用两个圆锥形电极分别连接电源正极和负极,将电极平行放置在光丝两端,电极间距离约10 mm,光丝与电极尖端几乎重合。电源输出电压为12 kV、脉冲频率为10 Hz、脉冲宽度为1 μ s、上升/下降时间均为50 ns的方波电压脉冲,电路中放置一个阻值为1 k Ω 的限流电阻。在飞秒激光光丝的触发与引导下,放电路径会沿着光丝分布。放电路径上产生的等离子体发射光谱通过一个球面透镜(焦距为100 mm)耦合进入成像光谱仪(型号为Acton SP-2300i)的狭缝,成像光谱仪结合增强型电荷耦合器件(Intensified Charge Coupled Device,

ICCD)相机(型号为PIMAX3)进行光谱采集。入射狭缝与光丝平行,沿激光方向记录等离子体空间分辨光谱。实验中,NH₃和N₂混合气通过McKenna burner(麦肯纳燃烧器)产生不同的测量流场,McKenna burner中心位置是一个简单的射流管(内径为3 mm),可以产生自由射流,中心管外侧可以产生均匀平面层流流场,供气速度以及混合气体中NH₃的浓度由质量流量计控制和调节。将飞秒激光光丝引导放电产生的等离子体置于流场中进行发射光谱采集。实验周围环境为空气,压力为0.1 MPa,温度为300 K。

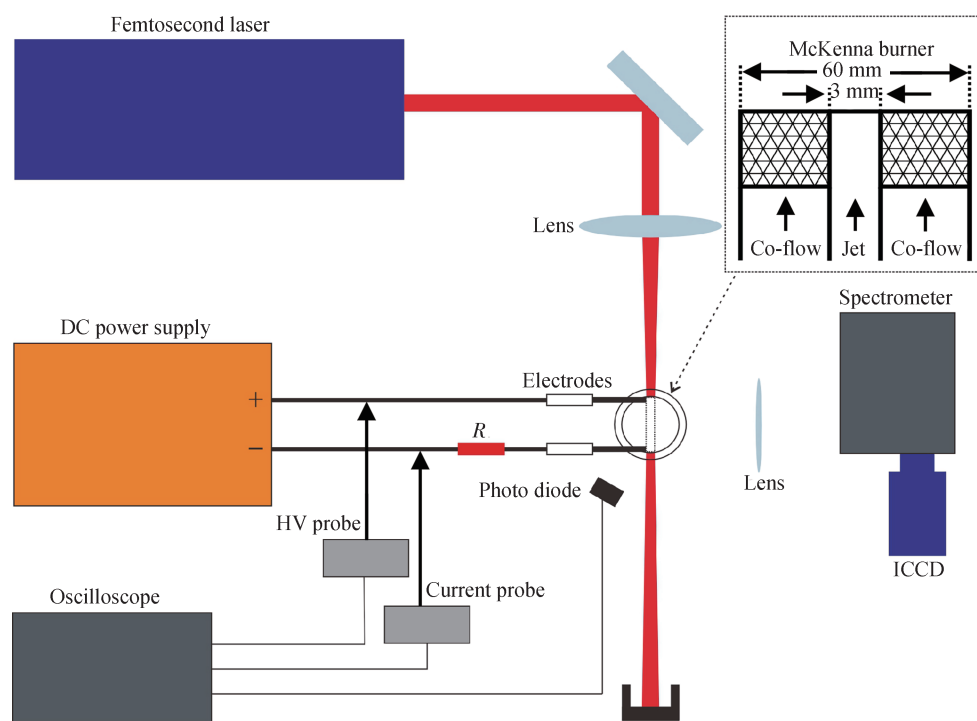


图1 实验装置

Fig.1 Experimental setup

使用数字延迟脉冲发生器(型号为DG645)同步飞秒激光器、高压电源以及光谱仪的时序。在电源正极放置高压探头(型号为P6015A),电源负极放置电流探头(型号为TCP2020),并连接示波器(型号为WaveRunner 606zi)监测放电过程的电压和电流,将光电二极管(型号为DET10A/M)连接示波器,监测等离子体发光信号。

图2为飞秒激光光丝引导放电在NH₃和N₂混合气体射流中的放电时序,射流由McKenna burner产生,气体为NH₃和N₂混合气体(5%的NH₃),射流

出口速度为2 m/s,McKenna burner周围Co-flow(共流)保护气体为纯N₂。由于激光信号只用于判别激光和电压电流之间的时序关系,所以图中没有标注其大小。定义激光到达时刻为时间零点,约100 ns之后放电电压开始上升,达到设定值之后,在约257 ns时,放电电压急剧下降,实现放电击穿,经振荡后放电电压维持在极低水平,直至方波结束。电流初期上升之后振荡,然后趋于平稳,直至方波结束。激光脉冲与电压脉冲频率一致,且每次激光脉冲均可触发放电击穿。实验过程中,

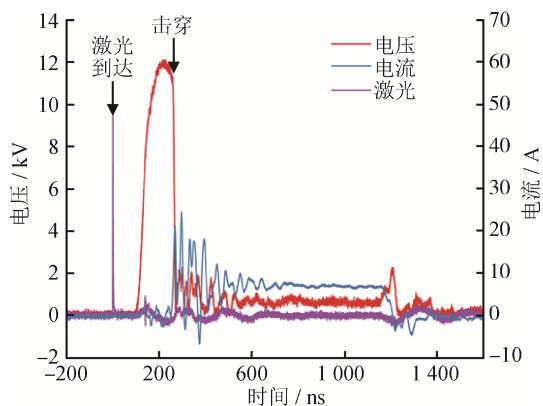


图2 飞秒激光光纤引导放电在NH₃和N₂混合气体射流中的放电时序

Fig.2 Time-sequence of femtosecond laser filament-triggered discharge in a jet flow field of NH₃ and N₂ mixtures

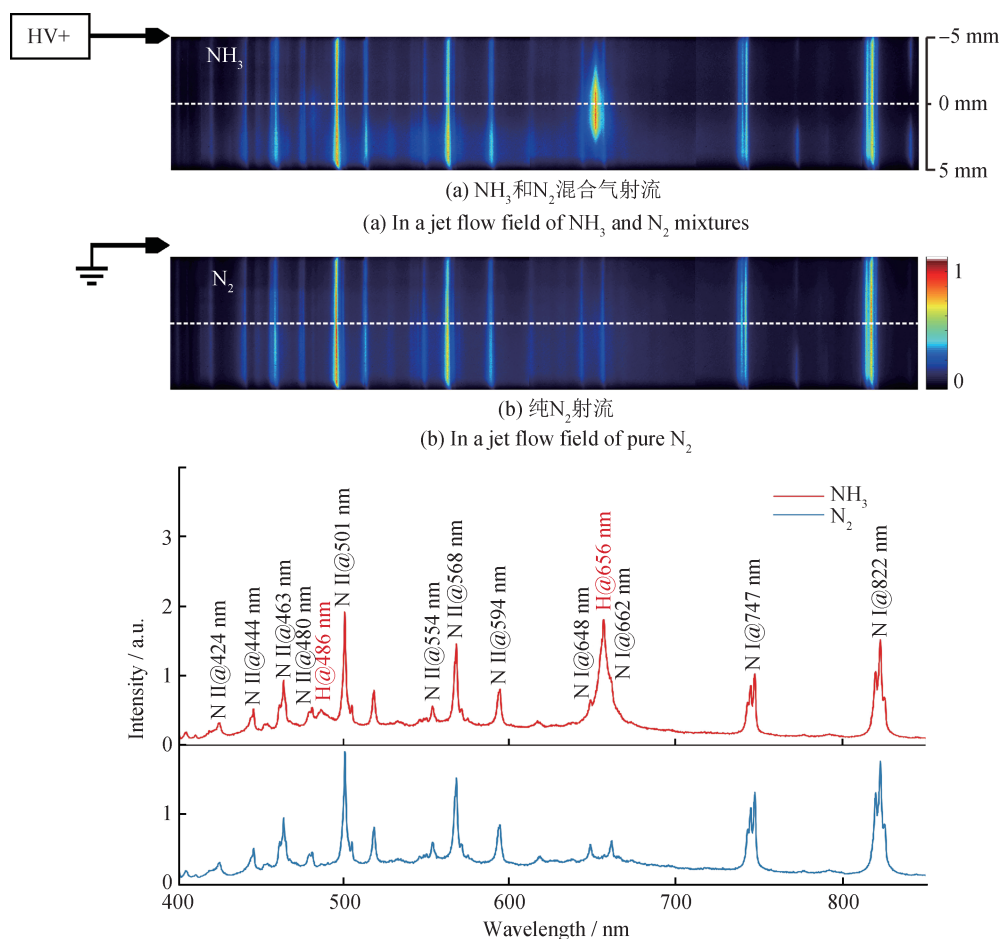
为了降低飞秒激光光纤本身等离子体发射光谱对放电产生的等离子体发射光谱的影响，选择在激

光到达后约 100 ns 施加高压脉冲。

2 实验结果与讨论

2.1 光谱特征与寿命分析

图3为飞秒激光光纤引导放电的等离子体在射流场中的空间分辨光谱图。图3(a)为NH₃和N₂(5%的NH₃)混合气射流的结果；图3(b)为纯N₂射流的结果，图3(b)右侧为图片信号强度归一化的颜色条；图3(c)为图3(a)和图3(b)中白色虚线位置的光谱曲线。光谱的采集延迟为100 ns，门宽为10 μs，光谱图像为相机单幅拍摄的结果，可以看出：该方法可以实现单帧快速测量。在纯N₂流场中，主要出现的谱线为N原子和N离子的特征谱线，如N I @822 nm、N I @747 nm、N II @594 nm、N II @501 nm等，这是放电过程对N₂分子的解离和激发



(c) 图3(a)和图3(b)中白色虚线位置的光谱曲线

(c) The spectral curve at the position of the white dashed line in figure 3(a) and figure 3(b)

图3 飞秒激光光纤引导放电等离子体光谱

Fig.3 Femtosecond laser filament-triggered discharge plasma spectra

所致。在 NH_3 和 N_2 混合气体中，除了N原子和N离子的特征谱线，还出现了H原子谱线，典型如H@486 nm、H@656 nm，这是 NH_3 分子在放电过程中 NH_3 分子被解离产生H原子并被激发所致。该特征谱线为 NH_3 的识别与定量分析提供了关键标识物。

图4展示了飞秒激光光丝引导放电等离子体光谱谱线随时间变化的寿命曲线。光谱采集的时间延迟为100 ns，门宽为50 ns。图4清晰地呈现了H原子谱线(H@486 nm、H@656 nm)与N原子和离子谱线(N II@501 nm、N II@568 nm、N II@594 nm、N I@747 nm、N I@822 nm)的强度随时间延迟的衰减规律，可以看出：不同粒子谱线强度的衰减变化呈现不同趋势。N II@594 nm、N II@568 nm等强度衰减较快，持续时间较短；N I@747 nm、N I@822 nm持续时间较长；H@656 nm持续时间很长。不同粒子的寿命差异反映了其在放电过程中解离激发过程的动力学特性的不同，为后续光谱数据采集的时间参数选取提供了实验参考与依据。

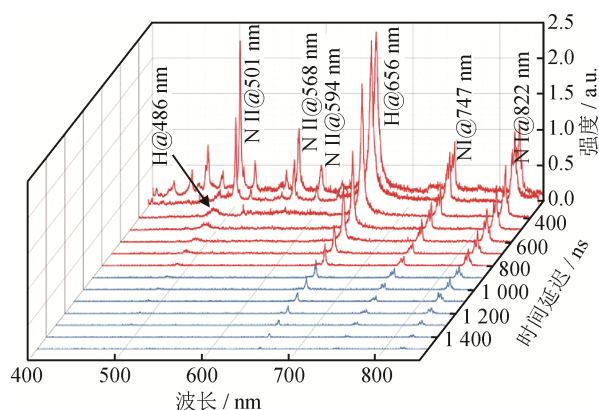


图4 飞秒激光光丝引导放电等离子体光谱谱线随时间变化的寿命曲线图

Fig.4 Lifetime curve of the spectral lines of femtosecond laser filament-triggered discharge plasma over time

2.2 特征谱线选取与浓度标定

可以利用等离子体发射光谱谱线峰面积比值来标定气体组分浓度^[21]。飞秒激光光丝引导放电等离子体谱线中的H原子谱线来源于 NH_3 ，可以反映 NH_3 ，而N原子和粒子的谱线来源于 N_2 和 NH_3 混合气体中N元素总和，因此可以利用H和N谱线峰面积比进行 NH_3 浓度的标定。综合考虑测量信号信噪比以及其他谱线干扰问题，本文决定选取H@

656 nm和N II@594 nm两条谱线进行浓度标定。此外，这两条谱线波长距离较近，利用成像光谱仪结合ICCD相机进行光谱采集时，采集一幅图像的波长覆盖范围有限，选择波长距离较近的谱线可以保证两条谱线的测量时刻一致，实现实时同步在线测量。对H@656 nm和N II@594 nm两条谱线进行Vogit拟合得到拟合曲线，将Vogit拟合函数曲线下的积分面积定义为谱线峰面积。N II@594 nm和H@656 nm的拟合曲线如图5所示，可以看出：N II@594 nm和拟合曲线差距不大；H@656 nm由于放电等离子体的加热作用导致谱线展宽，其与临近的两条N谱线(N I@648 nm、N I@662 nm)相互耦合，但对最终的谱线拟合影响较小，可以忽略。另外，利用H和N的比值进行浓度标定，也会降低这部分的影响。

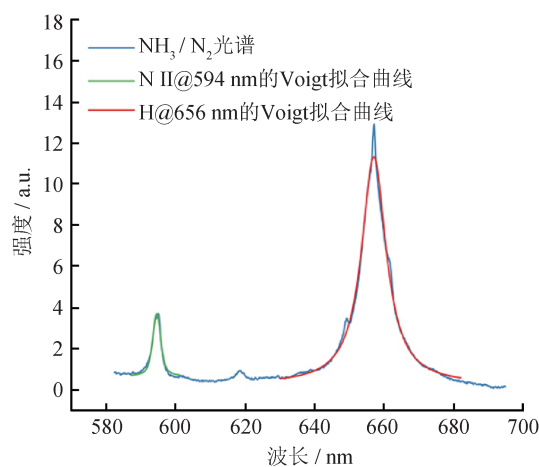


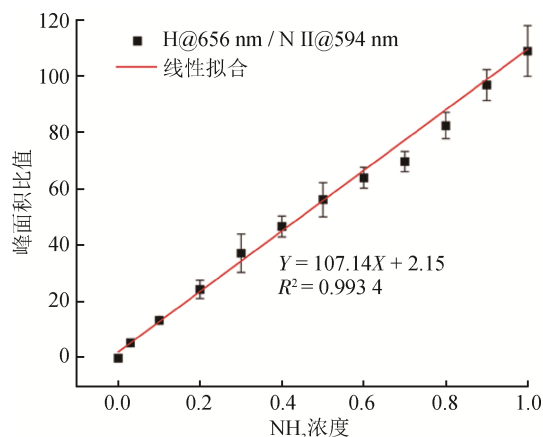
图5 N II@594 nm和H@656 nm拟合曲线

Fig.5 Fitting curves of N II@594 nm and H@656 nm

图6为 NH_3 浓度标定曲线。在McKenna burner的Co-flow产生的层流流场中进行标定曲线光谱测量。利用质量流量计调节 NH_3 和 N_2 的供气量实现浓度的改变，测量位置在McKenna burner上方约8 mm处。标定曲线的拟合方程为 $Y = 107.14X + 2.15$ ，其中，Y为峰面积比值，X为 NH_3 浓度，相关系数 $R^2 = 0.9934$ ，浓度为0 ~ 1.0。该拟合曲线表明：在 NH_3 浓度范围内，H@656 nm/N II@594 nm谱线峰面积比值与 NH_3 浓度呈现极佳的线性关系，验证了该技术用于 NH_3 定量检测的可行性。

2.3 一维空间分布

为验证该技术的一维测量能力，分析飞秒激

图6 NH₃浓度标定曲线Fig.6 Calibration curve for NH₃ concentration

光光丝引导放电等离子光谱谱线强度的一维空间分布。在层流流场中, NH₃浓度分别为0.03和0.1时, H@656 nm与N II@594 nm谱线的一维空间强度分布如图7所示。

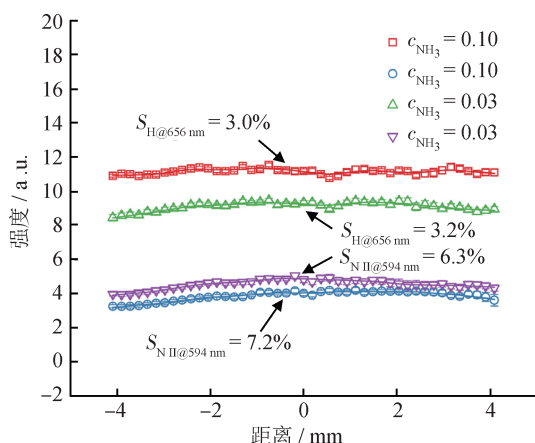


图7 飞秒激光光丝引导放电等离子体光谱谱线强度的一维空间分布

Fig.7 One-dimensional spatial distribution of spectral line intensities of femtosecond laser filament-triggered discharge plasma

根据图7可知: NH₃浓度为0.1时, H@656 nm谱线的相对标准偏差(Relative Standard Deviation, RSD) $S_{H@656\text{ nm}}$ 为3.0%; NH₃浓度为0.03时, $S_{H@656\text{ nm}}$ 为3.2%。NH₃浓度为0.1时, N II@594 nm谱线的相对标准偏差 $S_{N\text{ II}@594\text{ nm}}$ 为7.2%; NH₃浓度为0.03时, $S_{N\text{ II}@594\text{ nm}}$ 为6.3%。分析结果显示: 不同浓度条件下谱线强度在一维空间上是均匀的; 另外, 测量时的空间分辨约为18 μm , 说明基于飞秒激光光

丝引导放电的方法具备NH₃一维高空间分辨测量的能力。

3 结论

本文提出了一种基于飞秒激光光丝引导放电的NH₃测量技术, 通过实验验证了该技术进行NH₃测量的可行性与技术优势, 主要结论如下:

1) 飞秒激光光丝引导放电可有效激发NH₃分子产生特征光谱, H原子谱线(如H@656 nm)可作为NH₃识别的关键标识谱线;

2) 基于H@656 nm与N II@594 nm谱线的峰面积比值建立的浓度标定模型, 线性相关系数为0.9934, 可以实现NH₃全浓度范围内的定量标定测量;

3) 该技术具备良好的空间分辨能力, 谱线强度的一维空间分布表现出良好的一维稳定性, 可实现NH₃一维测量。

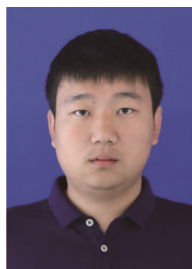
飞秒激光光丝引导放电技术为NH₃一维快速检测提供了新方法。相较飞秒激光成丝诱导击穿光谱技术, 该方法的测量信号强度和信噪比很高, 测量信号信噪比的提升更有利于其在复杂流场中的实际应用。该技术具有应用于工业尾气、发动机排放、大气测量等复杂场景的潜力。后续可进一步优化激光参数与放电条件、光谱采集时间等参数, 研究使用不同的谱线对NH₃浓度进行标定; 优化装置结构, 将该技术拓展至二维或者三维空间分布测量, 推动其在工业、环境等实际场景中的工程化应用。

参考文献

- [1] BITTMANS, BROOK JR, BLEEKER A, et al. Air quality, health effects and management of ammonia emissions from fertilizers[J]. Air Quality Management, 2013: 261-277.
- [2] WILLIAMS A, JONES JM, MA L, et al. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2012, 38(2): 113-137.
- [3] GLARBORG P, JENSEN A D, JOHNSON J E. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2003, 29 (2) : 89-113.
- [4] ELBAZ A M, WANG S X, GUIBERTI T F, et al. Review on the recent advances on ammonia combustion from the fundamentals to the applications [J]. Fuel Communica-

- tions, 2022, 10: 100053.
- [5] DUYNSLAEGHER C, JEANMART H, VANDOOREN J. Ammonia combustion at elevated pressure and temperature conditions[J]. *Fuel*, 2010, 89(11): 3540–3545.
- [6] NAIR A A, YU F Q. Quantification of atmospheric ammonia concentrations: a review of its measurement and modeling[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(10): 1092.
- [7] TIMMER B, OLTHUIS W, VAN DEN BERG A. Ammonia sensors and their applications — a review[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, 107(2): 666–677.
- [8] RYU H, THOMPSON D, HUANG Y K, et al. Electrochemical sensors for nitrogen species: a review[J]. *Sensors and Actuators Reports*, 2020, 2(1): 100022.
- [9] BRAGULLA S C H, LORENZ J, HARMS C, et al. Application of ion chromatography for the reliable quantification of ammonium in electrochemical ammonia synthesis experiments: a practical guide[J]. *ChemSusChem*, 2023, 16(13): e202202211.
- [10] GUO S J, LI Z H, LIU Z M, et al. Simultaneous measurement of NH_3 and NO by mid-infrared tunable diode laser absorption spectroscopy based on machine-learning algorithms[J]. *Measurement*, 2024, 234: 114858.
- [11] LI N, EL-HAMALAWI A, BAXTER J, et al. Tuneable diode laser spectroscopy correction factor investigation on ammonia measurement [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 172: 12–15.
- [12] DAI H C, CARDONA S, WANG S X, et al. Simultaneous PLIF imaging of NH_2 , NH , and NH_3 in ammonia-hydrogen-nitrogen flames using a single dye laser [J]. *Combustion and Flame*, 2025, 274: 114031.
- [13] LIU J X, GAO Q, LI B, et al. Ammonia measurements with femtosecond two-photon laser-induced fluorescence in premixed NH_3 /air flames [J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(2): 1177–1183.
- [14] BRACKMANN C, HOLE O, ZHOU B, et al. Characterization of ammonia two-photon laser-induced fluorescence for gas-phase diagnostics [J]. *Applied Physics B*, 2014, 115(1): 25–33.
- [15] GOKCECIK B K, GUTHIKONDA N, CLARK A, et al. Laser-induced plasma analysis of ammonia-oxygen and ammonia-oxygen-enriched-air flames at elevated pressures [J]. *Combustion and Flame*, 2025, 271: 113803.
- [16] KOTZAGIANNI M, COURIS S. Femtosecond laser induced breakdown for combustion diagnostics [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(26): 264104.
- [17] LI B, ZHANG D Y, GAO Q, et al. One-dimensional full-range mixture fraction measurements with femtosecond laser-induced plasma spectroscopy [J]. *Experiments in Fluids*, 2020, 61(2): 33.
- [18] COUAIROU A, MYSYROWICZ A. Femtosecond filamentation in transparent media [J]. *Physics Reports*, 2007, 441(2/3/4): 47–189.
- [19] ZHU Z F, LI B, GAO Q, et al. Spatiotemporal control of femtosecond laser filament-triggered discharge and its application in diagnosing gas flow fields [J]. *Plasma Science and Technology*, 2022, 24(2): 025402.
- [20] 李晓峰, 武腾飞. 基于激光诊断的分子标记示踪测速技术研究进展 [J]. *计测技术*, 2022, 42(5): 13–22.
LI X F, WU T F. The progress of molecular tagging velocimetry technology based on laser diagnosis [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42(5): 13–22. (in Chinese)
- [21] ZHU Z F, WANG X Y, WU T F, et al. Effect of gas temperature on composition concentration measurements by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2023, 38(2): 382–390.

(本文编辑: 刘圣晨 刘宇轩)



第一作者: 朱志峰(1994—), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为激光诊断技术研究、飞秒激光测试技术。



通信作者: 武腾飞(1983—), 男, 研究员, 博士生导师, 中国航空工业集团特级技术专家。南航空天信息与材料物理工信部重点实验室学术委员会委员, 光学工程学会计量标准战略规划委员会委员。长期从事飞秒激光精密测量技术, 激光光量子探测等技术研究。先后荣获GF科技进步二等奖2项, 三等奖1项; 发表学术论文30余篇, 其中Q1区5篇; 授权发明专利32项。负责国家自然科学基金青年、面上和重点项目课题、仪器专项等项目。