

基于菲涅耳透镜和法布里-珀罗干涉仪的飞秒激光光丝 NaCl 气溶胶荧光光谱探测

金康¹, 赵星^{1,2}, 张楠^{1,2*}, 刘伟伟^{1,2}

¹南开大学电子信息与光学工程学院现代光学研究所, 天津 300350;

²天津市微尺度光学信息技术科学重点实验室, 天津 300350

摘要 设计并制备了口径为 20 mm 的法布里-珀罗干涉仪, 该干涉仪在 632.8 nm 处的光谱分辨率为 0.5 nm, 自由光谱范围为 9.0 nm。将口径为 1.1 m 的低成本菲涅耳透镜用作集光元件, 使用自行搭建的法布里-珀罗干涉仪和工业电荷耦合器件 (CCD) 相机成功探测到 30 m 外平均功率为 0.7 mW 的汞灯光谱, 实现了 μlx 量级的弱光光谱探测。采用增强型互补金属氧化物半导体 (ICMOS) 相机, 可在 10 m 外检测到飞秒激光光丝诱导的质量分数为 13×10^{-6} 的 NaCl 气溶胶的时间分辨荧光光谱。建立的基于菲涅耳透镜和法布里-珀罗干涉仪的光谱测量装置在空气污染物和有害物质远程检测中具有广阔的应用前景。

关键词 光谱学; 法布里-珀罗干涉仪; 菲涅耳透镜; 远程光谱探测; 光丝诱导荧光光谱

中图分类号 O433.1; TN203

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221486

1 引言

大气污染作为环境污染治理中重要的一环, 受到广泛关注。气溶胶是大气中固体、液体等颗粒物质的总称, 包括生物物质燃烧、化石燃料燃烧等产生的对人体有害的污染物颗粒。NaCl 气溶胶在大气中过量时, 会抑制植物生长, 腐蚀金属, 危害人的呼吸系统和心血管系统^[1-3]。

飞秒激光在空气中传输时, 由于非线性自聚焦效应, 聚焦后的光强达到 10^{13} W/cm^2 , 在这样的强度下, 空气中的任何物质都会被电离, 并释放与物质化学成分相对应的光谱^[4]。基于这一特性, 通过采集分析飞秒激光光丝光谱, 可以探测大气污染物成分和浓度, 从而实现大气污染监测, 为大气污染治理方案的制定提供基础数据。

2004 年, Zimmer 等^[5]用脉冲宽度为 80 fs 的百毫焦激光脉冲照射浓度为 5 mol/L 的 NaCl 气溶胶时, 用肉眼观测到了黄色的闪光, 拉开了飞秒激光远程探测大气气溶胶的序幕; 2006 年, Fujii 等^[6]在 16 m 的检测距离处对 NaCl 质量浓度为 300 g/L (质量分数为 0.3) 的气溶胶实现了钠荧光的检测; 2007 年, Daigle 等^[7]利用单脉冲能量为 72 mJ 的飞秒激光在 50 m 距离处探测到质量分数为 33×10^{-6} 的 NaCl 气溶胶; 2016 年, Álvarez-Trujillo 等^[8]利用单脉冲能量为 1.5 J

的纳秒激光在 10 m 距离处检测到质量分数为 8×10^{-6} 的 Na^+ 荧光光谱; 2021 年, Golik 等^[9]利用单脉冲能量为 4.4 mJ 的飞秒脉冲形成的光丝将 NaCl 气溶胶的检测限降低到 0.7×10^{-6} , 但其测量距离只有 50 cm。上述研究均利用光栅光谱仪进行探测, 本文利用菲涅耳透镜和法布里-珀罗干涉仪替代光栅光谱仪, 通过提高集光系统的口径, 提升弱信号的远程探测能力。

相比于光栅光谱仪, 在相同光谱分辨能力下, 法布里-珀罗干涉仪 (FPI) 收集的光强比光栅光谱仪大 2~3 个数量级^[10]。同时, FPI 的通光孔径较大, 可以直接测量扩展光源的光谱, 从而降低了对集光元件的要求。基于上述特点, FPI 成为理想的远距离弱光光谱测量装置^[11-12]。1914 年, FPI 的发明者之一法布里将其用于测量猎户座星云的氢原子发射谱线, 这是 FPI 在远程弱光光谱领域的首次应用^[13]。2000 年, 研究人员基于非洲南部大型望远镜 (SALT) 和 FPI 对远距离恒星的发射谱线进行研究, FPI 光谱分辨本领达到 9000^[14]。2009 年, 研究人员设计了一个直径为 70 mm、腔长为 15 mm 的 FPI^[15], 用于研究海拔 90~100 km 处气辉的多普勒频移。2019 年, 在海洋遥感领域, Wang 等^[16]利用含有环形电极的磷酸二氧钾作为腔镜, 设计了可调谐的 10 cm 口径的 FPI, 分辨率为 200 MHz, 自由光谱范围为 11.12 GHz, 用

收稿日期: 2022-12-05; 修回日期: 2023-01-14; 录用日期: 2023-02-08; 网络首发日期: 2023-02-18

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB0504400)、开放项目 (BEP21C003)

通信作者: *zhangn@nankai.edu.cn

于测量海水的布里渊散射光谱,分析海水温度、盐度等特性。2020年,为了提高系统稳定性,Veenendaal等^[17]设计了一种旋转FPI以代替传统的变间隙FPI。该FPI的口径为4 cm,腔长为52 mm,旋转式设计不但提高了系统稳定性,而且提高了温度稳定性,扩展了工作温度范围。2021年,Kuhn等^[18]设计了一个分辨本领达到148000但质量不到5 kg的FPI,用于测量大气中氧同位素的吸收谱以及远距离测量太阳光激发的植物叶绿素荧光信号。

菲涅耳透镜相较于传统球面透镜,重量更轻,价格更便宜,尤其适用于弱光检测中需要大口径集光元件的场景。本文利用口径达到米量级的菲涅耳透镜对远距离弱光光源进行会聚,虽然聚焦光斑尺寸较大,但FPI具有大集光口径,二者配合可组成远距离弱光光谱探测系统。

在微弱信号、远距离信号检测领域,本文将具有高聚光本领的菲涅耳透镜和大口径的FPI进行结合,在30 m内对 μlx 量级的汞灯信号进行了测量,证明了该系统是新的远程探测方式。在10 m处检测到了单脉

冲能量为4 mJ的飞秒激光诱导的质量分数为 13×10^{-6} 的NaCl气溶胶荧光信号,实验结果对大气污染检测具有重要的参考价值。

2 实验方案

2.1 测量装置的设计与制作

本文设计的远程光谱检测系统由菲涅耳透镜和FPI组成。菲涅耳透镜是集光元件,FPI用于光谱分析。菲涅耳透镜的像差远大于球面透镜,导致聚焦光斑大且强度分布不均匀。FPI的大口径优势恰好可以弥补菲涅耳透镜这一缺陷。因此,在远程弱光光谱检测中使用菲涅耳透镜作为聚光元件,配合大口径FPI,可大大提高集光能力。

本文使用的菲涅耳透镜由聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)制成,直径为1.1 m,厚度为5 mm,焦距为1.31 m。经测量,菲涅耳透镜在可见光波段的平均透射率为94%^[19]。图1(a)、(b)是本文使用的菲涅耳透镜的侧视图和正视图。其中,菲涅耳透镜的环距为0.5 mm,每个环的深度不同。

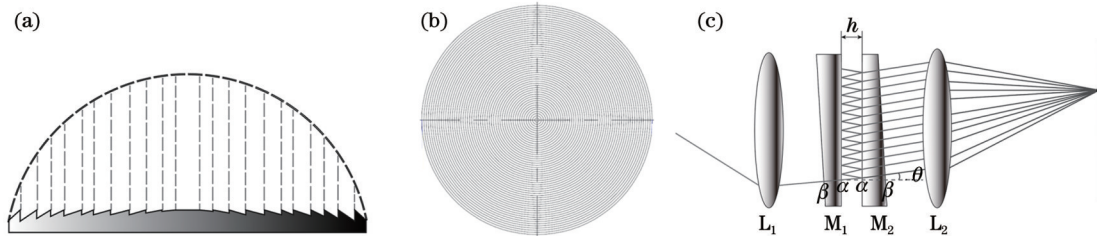


图1 菲涅耳透镜和FPI原理图。(a)菲涅耳透镜侧视图;(b)菲涅耳透镜正视图;(c)FPI示意图
Fig. 1 Schematics of Fresnel lens and FPI. (a) Side view of Fresnel lens; (b) front view of Fresnel lens; (c) schematic of FPI

图1(c)是FPI的结构图,其中 M_1 和 M_2 是表面覆有电介质涂层的高反镜, L_1 和 L_2 是透镜。菲涅耳透镜收集的光首先经过透镜 L_1 。透镜 L_1 可减小菲涅耳透镜收集光束的发散角。法布里-珀罗腔由两个介质膜高反镜构成。镜子的前后两个表面(α 与 β)彼此不平行,保证了多光束干涉仅来自两个平行的 α 面。透射光束被透镜 L_2 聚焦。

FPI的透射强度满足

$$\frac{I_o}{I_i} = \frac{1}{1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2}}, \quad (1)$$

式中: I_o 为从FPI出射的光强; I_i 为入射FPI的光强; F 为条纹精细度, $F = 4R/(1-R)^2$,仅与反射镜的反射率 R 相关; δ 为相邻透射光束之间的相位差, $\delta = 4\pi h \cos \theta/\lambda$,由波长 λ 、反射镜间距 h 和光束发散角 θ 决定。FPI的光谱分辨率(λ_{res})和自由光谱范围(λ_{FSR})分别为

$$\lambda_{\text{res}} = \frac{\lambda^2}{\pi h \sqrt{F}}, \quad (2)$$

$$\lambda_{\text{FSR}} = \frac{\lambda^2}{2h}. \quad (3)$$

本文使用FPI测量汞灯位于546、577、579 nm处的光谱线以及NaCl气溶胶位于589 nm处的发射线。因此,FPI的光谱分辨率应小于2 nm,自由光谱范围不小于33 nm。基于式(3),为了满足自由光谱范围不低于33 nm的要求,FPI的腔长必须满足 $h \leq 4.5 \mu\text{m}$ 。当 $h = 4.5 \mu\text{m}$ 时,反射率 R 应大于83%,以保证分辨率低于2 nm。

在实验中,两反射镜表面相互贴合,利用设计的镜架(图2(a)),搭建腔长为微米量级的法布里-珀罗腔。三个压电陶瓷片两两间隔 120° 放置,用来准确调整FPI的腔长。每个陶瓷片的厚度为2 mm,施加最大电压60 V时对应的最大位移为 $3 \mu\text{m}$,分辨率为0.1 nm。制作完成后的FPI如图2(b)所示。

值得注意的是,除压电效应外,基于压电陶瓷片的压电换能器(PZT)的位移还会受到电致伸缩效应的影响,因此PZT位移与电压的关系并不是线性的^[20]。为准确表征法布里-珀罗腔腔长与PZT外加电压的关系,我们使用测微仪对PZT进行了“位移-电压”测试,

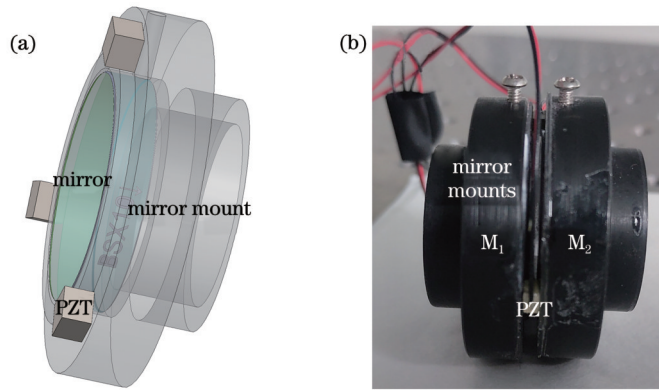


图 2 FPI 结构图。(a)FPI 框架三维结构图;(b)FPI 实物图

Fig. 2 Structural diagrams of FPI. (a) 3D structural diagram of FPI frame; (b) photograph of FPI

结果如图 3 所示,压电效应和电致伸缩效应分别与施加的电压和电压的平方成正比,PZT 位移 x 与外加电

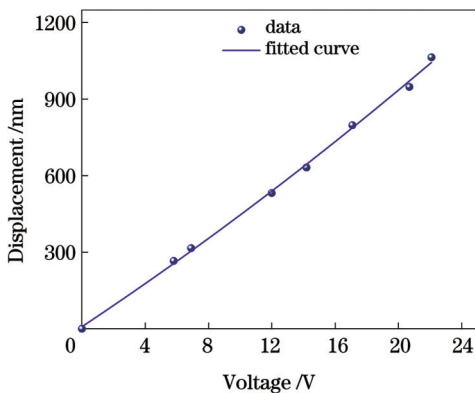


图 3 FPI 中使用的 PZT 的位移-电压曲线

Fig. 3 Displacement-voltage curve of PZT used in FPI

压 V 的拟合关系为 $x=41.196V+0.257V^2$ 。

2.2 测量装置测试

FPI 制作完成后,首先要确定法布里-珀罗(F-P)腔腔长,实验装置如图 4(a)所示。He-Ne 激光经过 5 cm 焦距的透镜 A(lens A)后转换为发散光束并进入法布里-珀罗腔。透射光被另一个焦距为 3.5 cm 的透镜 B(lens B)聚焦,利用 lens B 焦面的屏幕观察干涉图案。当施加在 PZT 上的电压为零时,屏幕上的干涉图案如图 4(b)所示。腔长 h 满足

$$h = \frac{\lambda}{2 \left[\cos\left(\arctan \frac{r_2}{f}\right) - \cos\left(\arctan \frac{r_1}{f}\right) \right]}, \quad (4)$$

式中: r_1 和 r_2 是两个相邻干涉环的半径; f 是 lens B 的焦距。使用螺旋测微仪测量图 4(b)中 5 个干涉环的半径,由式(4)计算得到腔长为 $22.4 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 。

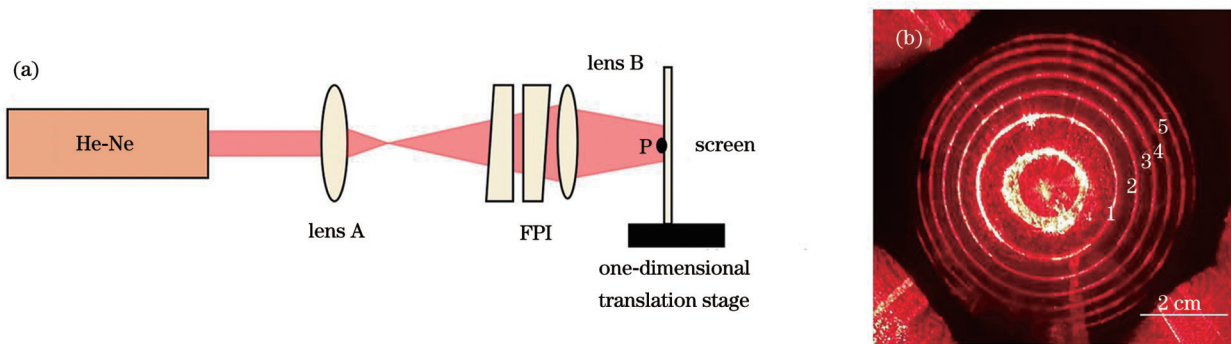


图 4 标定法布里-珀罗腔腔长的方法。(a)测量法布里-珀罗腔腔长的装置;(b)观察屏上的干涉图案

Fig. 4 Calibration method of cavity length of FPI cavity. (a) Setup for measuring cavity length of FPI cavity; (b) interference pattern on observation screen

然后,我们使用图 5(a)所示的装置来测量 FPI 的自由光谱范围和光谱分辨率。FPI 的两面反射镜的反射率为 90%,条纹精细度 $F = 4R/(1 - R)^2 = 360$ 。在测量中,给压电陶瓷施加峰峰值为 10 V、频率为 5 Hz 的三角电压。准直 He-Ne 激光束入射到 FPI,利用光敏面直径为 0.4 mm 的光电二极管(PD)记录经过 FPI 的光功率随时间的变化,结果如图 5(b)所示。根据图 5(b)中光功率随时间的变化曲线以及

腔长与时间的关系,可以得到 FPI 的自由光谱范围为 9.0 nm。

PD 测量的光功率与腔长的关系如图 5(c)所示。当光电二极管距离 FPI 3.8 m 并在 PD 前增加一个直径为 0.1 mm 的针孔时,PD 仅检测到发散角为 7.35×10^{-4} rad 的激光束,此时光谱分辨率为 0.5 nm。当 PD 更靠近 FPI 或不增加针孔时,光谱分辨率会显著增加。对于图 5(c)中的各种情况,光谱分辨率与干涉峰的半

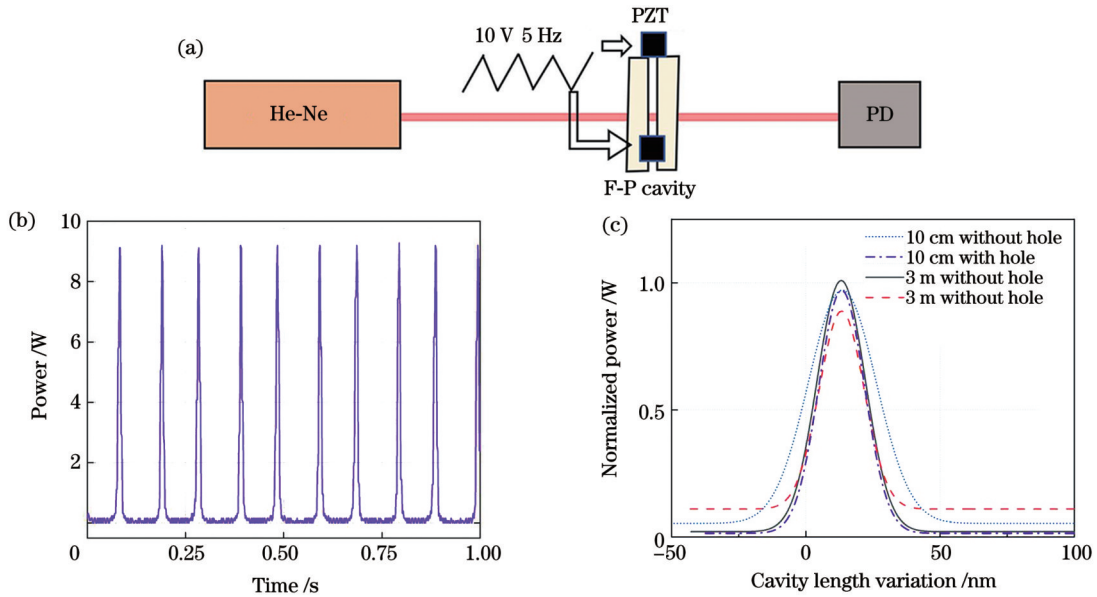


图 5 测量 FPI 自由光谱范围与分辨率的光路与结果。(a)测量 FPI 性能的装置;(b)当 PD 距离 FPI 10 cm 时测量的光功率与时间的关系;(c)当 PD 与 FPI 的距离不同时 PD 测量的光功率与腔长变化值的关系

Fig. 5 Optical path and results for measuring free spectral range and resolution of FPI. (a) Device for measuring FPI performance; (b) relationship between measured optical power and time when PD is 10 cm away from FPI; (c) relationship between optical power and cavity length variation measured by PD when distance between PD and FPI is different

峰全宽的关系为 $\lambda_{res} = 2h_{FWHM}/m$, 其中, h_{FWHM} 是干涉峰的半峰全宽, m 是干涉级次。经过计算, 光谱分辨率始终远小于 2 nm。

3 实验结果与误差分析

3.1 利用 FPI 和非涅耳透镜测量 8 m 和 30 m 距离处的汞灯光谱

实验装置如图 6 所示, 汞灯放置在距离菲涅耳透镜 8 m 的位置。FPI 前后各放置一个透镜, 透镜 L_1 的作用是减小入射 FPI 光束的发散角。当光源距离菲涅耳透镜 8 m 时, 光源经过菲涅耳透镜后的像距为 1.57 m, 对应的 F 数为 1.45, 为了匹配 F 数, L_1 的焦距

应为 35 mm。因此, 在接下来的实验中, L_1 的焦距选择为 35 mm^[21]。为了限制汞灯进入 FPI 的光谱线, 在 L_1 前增加了一个 450 nm 的高通滤光片, 这样只有 546、577、579 nm 三条谱线进入 FPI。工业电荷耦合器件 (CCD) 相机放置在透镜 L_2 的焦面上, 记录干涉图案。为了使有限尺寸的 CCD 相机容纳尽可能多的干涉环, L_2 的焦距尽可能小。直径为 1 inch (1 inch=2.54 cm) 的球面透镜的最小焦距为 25 mm, 因此 L_2 的焦距选择为 25 mm。实验结果如图 7 所示。汞灯出光口的功率为 0.7 mW, 当距离为 8 m 时, 菲涅耳透镜前表面的照度仅为 93 μ lx。

对 PZT 施加不同电压时沿图 7(b) 虚线区域截取的图像如图 8 所示。这四幅图是对 PZT 施加不同电压时 CCD 记录的同一区域的条纹分布。这四幅图中 PZT 电压分别为 $U_a=1$ V、 $U_b=4$ V、 $U_c=7$ V、 $U_d=10$ V, 对应腔长为 h 、 $h+\Delta h_b$ 、 $h+\Delta h_c$ 、 $h+\Delta h_d$ 。选择最锐利的条纹 [图 8(a) 中虚线, 记为 M] 来进行光谱反演。图 8 所示四幅图中的条纹 M 的半径分别为 r 、 $r+\Delta r_b$ 、 $r+\Delta r_c$ 、 $r+\Delta r_d$ 。腔长与干涉环半径的关系为

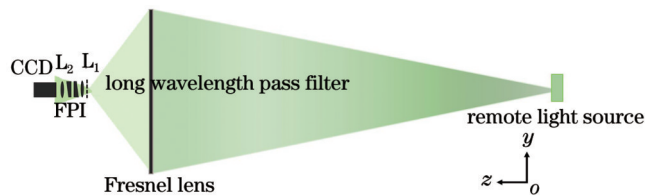


图 6 利用菲涅耳透镜和 FPI 测量远程弱光光谱的实验装置
Fig. 6 Experimental setup for measuring remote weak light spectrum by Fresnel lens and FPI

$$\begin{cases} 2h \cos \left[\arctan \left(\frac{r}{f} \right) \right] = 2(h + \Delta h_b) \cos \left[\arctan \left(\frac{r + \Delta r_b}{f} \right) \right] \\ 2(h + \Delta h_c) \cos \left[\arctan \left(\frac{r + \Delta r_c}{f} \right) \right] = 2(h + \Delta h_d) \cos \left[\arctan \left(\frac{r + \Delta r_d}{f} \right) \right] \end{cases} \quad (5)$$

条纹 M 的强度值处于饱和状态, 因此径向距离的确定存在误差。 δr_b 、 δr_c 、 δr_d 表示 Δr_b 、 Δr_c 、 Δr_d 的误差, 将

$\Delta r_b \pm 0.5\delta r_b$ 、 $\Delta r_c \pm 0.5\delta r_c$ 、 $\Delta r_d \pm 0.5\delta r_d$ 分别代入式 (5), 可得 PZT 电压为 1 V 时, 腔长 $h=31.45 \mu\text{m} \pm 0.04 \mu\text{m}$,

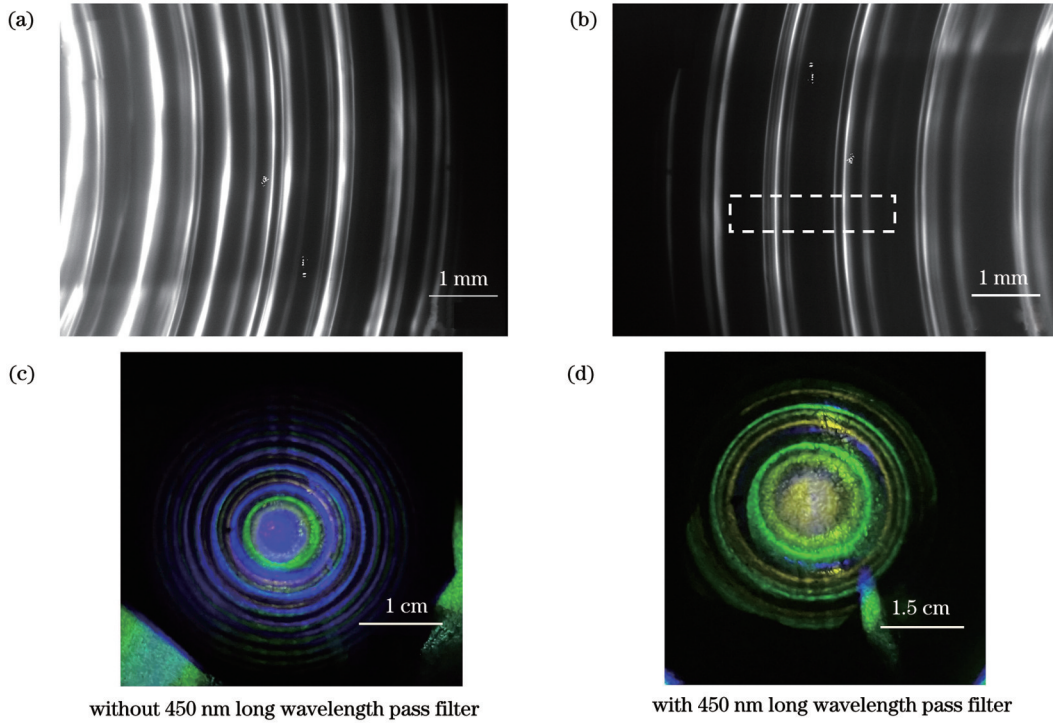


图 7 汞灯经过菲涅耳透镜和 FPI 后的图像。(a)(b) CCD 记录的干涉图案;(c)(d)在屏上观察到的干涉图案
Fig. 7 Images of mercury lamp after passing through Fresnel lens and FPI. (a)(b) Recorded interference patterns by CCD; (c)(d) interference patterns observed on screen

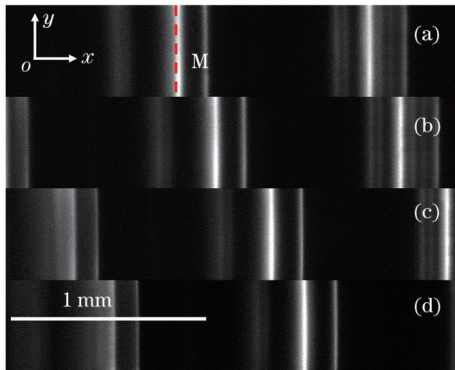


图 8 不同 PZT 电压下条纹 M 径向位置的变化。(a)1 V;(b)4 V;
(c)7 V;(d)10 V
Fig. 8 Variation of radial position of fringe M under different PZT voltages. (a) 1 V; (b) 4 V; (c) 7 V; (d) 10 V
干涉环 M 的半径 $r = 5.311 \text{ mm} \pm 3 \mu\text{m}$ 。

沿图 8(a)中 x 方向截取的强度分布如图 9 所示。由图 9 可知,条纹沿干涉环径向方向的排布呈现明显的周期性,每一周期均由一个强光谱峰和两个弱光谱峰组成。由此可以判断:峰 1 和峰 2 是同一条谱线经过 FPI 后干涉得到的。利用函数关系 $\cos(\arctan u) = \frac{1}{\sqrt{1+u^2}}$ 和式(4),得到峰 1 和峰 2 对应的波长满足

$$\lambda = \left| 2h \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r_1}{f}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r_2}{f}\right)^2}} \right] \right|, \quad (6)$$

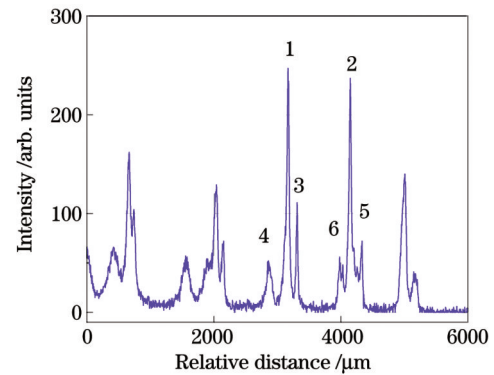


图 9 沿图 8(a)中 x 方向的强度分布
Fig. 9 Intensity distribution along x direction in Fig. 8(a)

式中: r_1, r_2 分别是峰 1、峰 2 对应条纹的半径。计算得到峰 1 对应的波长为 547.1 nm。根据间接测量物理量系统误差的计算方法^[22],由式(6)确定的波长误差为

$$\Delta\lambda = \frac{\partial\lambda}{\partial r_1} \Delta r_1 + \frac{\partial\lambda}{\partial r_2} \Delta r_2 + \frac{\partial\lambda}{\partial h} \Delta h = -\frac{2hr_1}{f^2 \left(1 + \frac{r_1^2}{f^2}\right)^{3/2}} \Delta r_1 + \frac{2hr_2}{f^2 \left(1 + \frac{r_2^2}{f^2}\right)^{3/2}} \Delta r_2 + 2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r_1^2}{f^2}}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r_2^2}{f^2}}} \right] \Delta h, \quad (7)$$

式中: $\Delta r_1, \Delta r_2$ 是干涉圆环位置误差,取值为 $12 \mu\text{m}$; Δh 为利用式(5)确定的 FPI 腔长的误差, $\Delta h = 0.04 \mu\text{m}$ 。

由式(7)可知,光谱线波长误差 $\Delta\lambda=2.06\text{ nm}$ 。因此,由 FPI 测量的波长 547.1 nm 与汞灯实际发射波长 546.1 nm 相差 1.0 nm ,在理论分析误差范围内。同理,可以计算出图 9 中峰 3 和峰 4 的波长分别为 576.2 nm 和 578.6 nm ,相应的误差分别为 1.29 nm 和 1.06 nm 。

为了测试装置的检测极限,将汞灯和非涅耳透镜之间的距离增加到 30 m ,这是我们实验室可以达到的

最长距离,测量结果如图 10 所示。图 10(a)、(b)分别是 CCD 拍摄的原始图像和滤除背景噪声后的图像。沿干涉环半径方向即图 10(b)中点划线方向的强度分布如图 10(c)所示。根据前文给出的方法,可以得到三条谱线的波长分别为 547.1 nm 、 576.2 nm 、 578.2 nm ,均在误差允许范围内。该实验结果表明:我们自行设计制备的 FPI 配合大口径非涅耳透镜,可以测量 30 m 外功率仅为 0.7 mW 、照度仅为 $6.5\text{ }\mu\text{lx}$ 的汞灯光谱。

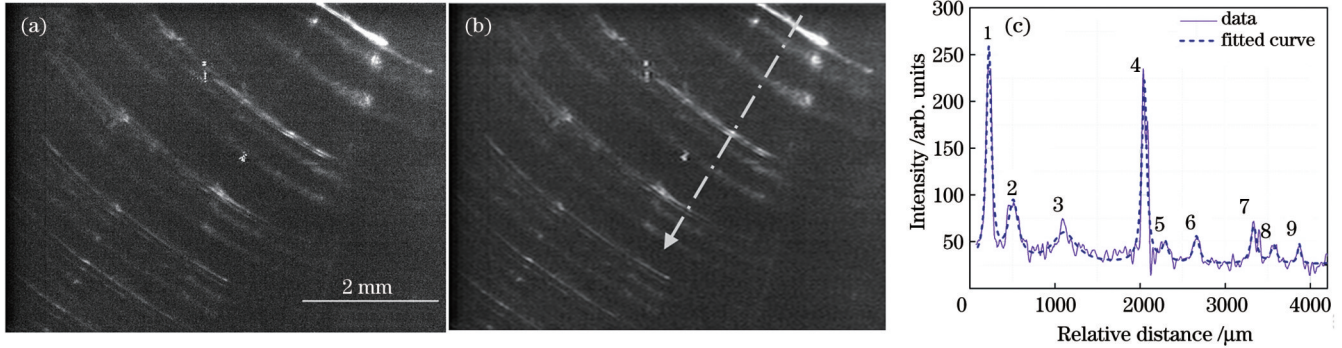


图 10 汞灯距离非涅耳透镜 30 m 时 FPI 探测到的图像。(a) CCD 记录的图像;(b)滤除背景噪声的图像;(c)沿图 10(b)点划线箭头方向的强度分布

Fig. 10 Images detected by FPI when mercury lamp is 30 m away from Fresnel lens. (a) Image recorded by CCD; (b) image after filtering out background noise; (c) intensity distribution along dotted arrow direction in Fig. 10(b)

3.2 利用 FPI 和非涅耳透镜测量 10 m 外飞秒激光光丝激发的 NaCl 气溶胶荧光光谱

实验装置如图 11 所示,其中 $M_1\sim M_4$ 为介质膜高反镜。掺钛蓝宝石飞秒激光放大系统产生脉冲宽度为 50 fs 、中心波长为 800 nm 、单脉冲能量为 4 mJ 、重复频率为 500 Hz 的飞秒激光脉冲。飞秒激光经反射镜 M_1 反射后,被凹透镜(焦距为 -10 cm)和凸透镜(焦距为 50 cm)组成的透镜组聚焦。使用光电二极管测量透过反射镜 M_1 的微弱飞秒激光,以 PD 探测到的信号用作探测系统的触发信号。在实验中调整凹透镜和凸透

镜之间的距离,使光丝出现在距离凸透镜 10 m 位置处。气溶胶发生器由气泵、玻璃瓶和玻璃管组成,用于生成 NaCl 气溶胶。当使用质量分数为 10% 的 NaCl 溶液且气泵压强为 0.2 MPa 时,可在玻璃管中生成质量分数为 13×10^{-6} 的 NaCl 气溶胶。通过测量光丝诱导荧光光谱,可以检测与光丝作用的材料化学成分。He-Ne 激光可透过近红外波段的高反镜 M_2 ,与飞秒激光共线传播。被气溶胶背向散射的 He-Ne 激光经过非涅耳透镜和 FPI 后形成的干涉图案用于校准 FPI。

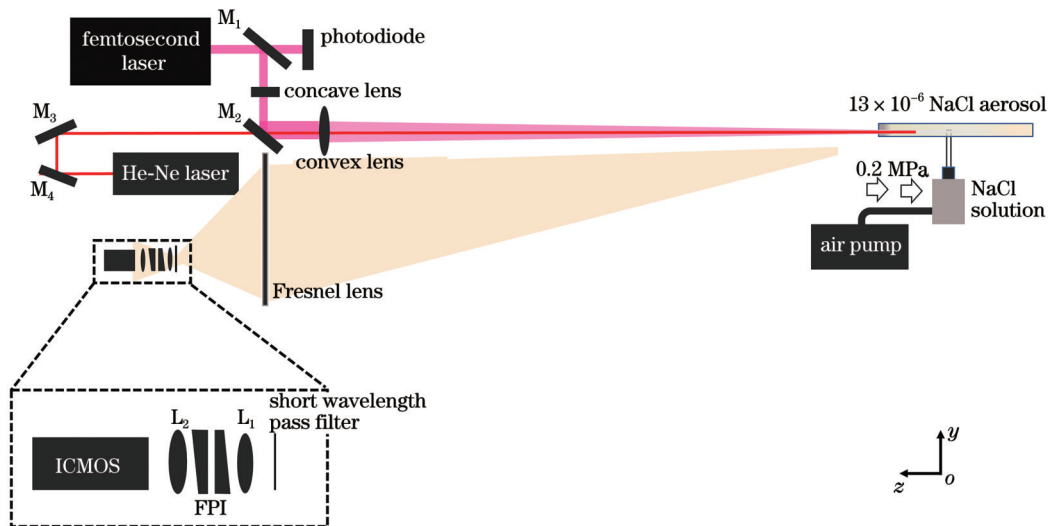


图 11 飞秒激光光丝诱导的 NaCl 气溶胶荧光光谱测量装置

Fig. 11 Experimental setup for measuring fluorescence spectrum of NaCl aerosol induced by femtosecond laser filament

测量 NaCl 气溶胶荧光光谱时,在透镜 L_1 前加入一片截止波长为 700 nm 的短波通滤光片,以阻挡中心波长为 800 nm 的散射飞秒光进入 FPI。由于光丝激发的 NaCl 气溶胶的荧光光谱由连续谱和线状谱组成,连续谱寿命比 Na^+ 的特征发射谱短得多^[23-24],因此,采用可实现超快时间分辨功能的增强型互补金属氧化物半导体(ICMOS)相机,记录 Na^+ 的发射谱线经过 FPI 后的干涉图案。

图 12 是利用光栅单色仪和 ICMOS 相机测量到的飞秒激光光丝激发的 NaCl 气溶胶时间分辨荧光光谱,记录光谱曲线使用的 ICMOS 相机的门宽为 5 ns。由于 FPI 的自由光谱范围有限,连续谱经 FPI 探测后的表现形式是一个均匀背景,只有线状谱经过 FPI 后才会呈现出清晰的干涉环。由图 12 可见时间延迟小于 25 ns, NaCl 气溶胶的荧光光谱由连续谱构成,而 Na^+ 在 589 nm 处的特征峰从 85 ns 才开始出现。

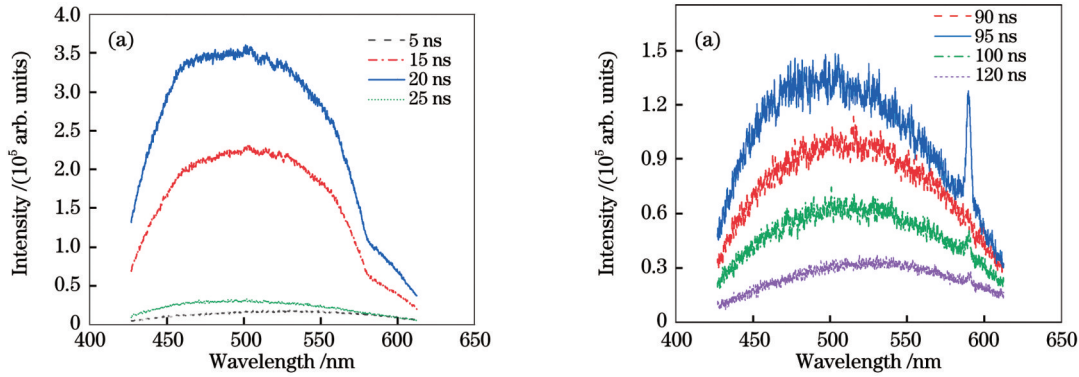


图 12 使用光栅单色仪和 ICMOS 相机记录的飞秒激光光丝激发的 NaCl 气溶胶时间分辨荧光光谱。(a) 时间延迟为 5~25 ns 的荧光光谱;(b) 时间延迟为 85~120 ns 的荧光光谱

Fig. 12 Time-resolved fluorescence spectra of NaCl aerosol excited by femtosecond laser filaments recorded using grating monochromator and ICMOS camera. (a) Fluorescence spectra with time delay of 5–25 ns; (b) fluorescence spectra with time delay of 85–120 ns

与飞秒激光共线传播的 He-Ne 激光被 NaCl 气溶胶背向散射,利用该散射光对由菲涅耳透镜和 FPI 组成的探测系统进行标定。经过 FPI 后形成的干涉图案由 ICMOS 相机记录,如图 13 所示。根据式(4),此时 FPI 的腔长为 $18.65 \mu\text{m}$ 。

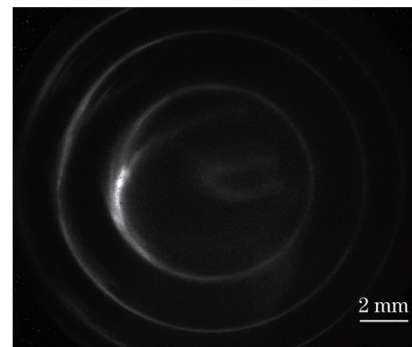


图 13 ICMOS 相机记录的背向散射 He-Ne 激光经过 FPI 后形成的干涉图

Fig. 13 Interference pattern of backscattered He-Ne laser after passing through FPI recorded by ICMOS camera

飞秒激光在 10 m 位置处形成光丝激发 NaCl 气溶胶的荧光光谱。图 14 显示了由 ICMOS 相机捕获的一系列时间分辨干涉图案,门宽为 2 ns,图片左上角显示了图片记录时间与光丝形成时间之间的延迟。可以看出,清晰的干涉环从延迟 80 ns 开始出现,持续时间约为 $1 \mu\text{s}$ 。

我们将延迟设置为 80 ns,门宽为 500 ns,总曝光时间为 30 s,ICMOS 相机记录的飞秒激光激发 NaCl

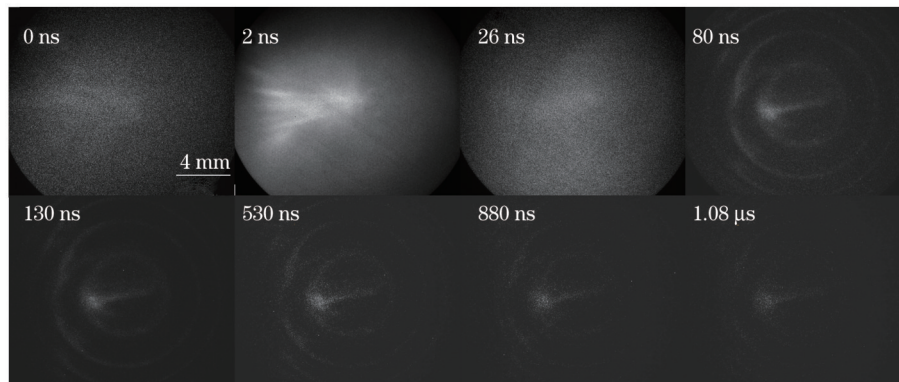
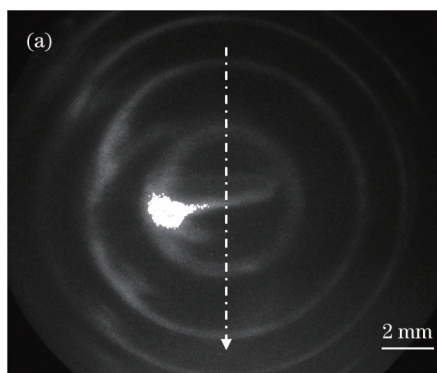


图 14 飞秒激光光丝诱导的 NaCl 气溶胶荧光的时间分辨法布里-珀罗干涉图

Fig. 14 Time-resolved F-P interference patterns of NaCl aerogel fluorescence induced by femtosecond laser filament

气溶胶荧光干涉图案如图 15(a)所示。沿直径方向即图 15(a)中点划线方向提取强度分布,结果如图 15(b)所示。根据前文给出的波长计算方式,得到图 15(a)中干涉圆环对应的波长及其误差分别为 589.0 nm 和 1.27 nm,与实际钠黄线的波长 589.3 nm 偏离 0.3 nm,



位于误差范围之内。值得注意的是,钠离子的发射谱是 589 nm 和 589.6 nm 两条谱线,但是飞秒激光光丝诱导的等离子体存在强电场,钠双线因为斯塔克效应而产生展宽,因此相互交叠,所以我们在实验中无法分辨双线^[25]。

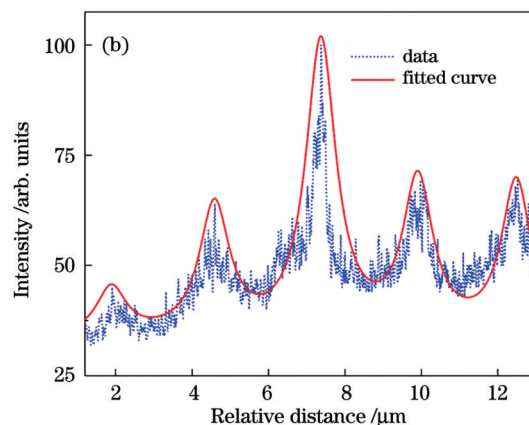


图 15 飞秒激光激发 NaCl 气溶胶荧光的探测结果。(a) ICMOS 相机记录的飞秒激光激发 NaCl 气溶胶荧光干涉图案;(b)沿图 15(a)点划线箭头方向的强度分布

Fig. 15 Detection results of fluorescence of NaCl aerosol excited by femtosecond laser. (a) Fluorescence interference pattern of NaCl aerosol excited by femtosecond laser recorded by ICMOS camera; (b) intensity distribution along dotted arrow direction in Fig. 15(a)

4 结 论

利用直径为 1.1 m 的非涅耳透镜和自制的 FPI 构建了远程光谱探测系统。凭借非涅耳透镜的高聚光特点和 FPI 的大口径特性,仅利用工业 CCD 相机即可探测到 30 m 距离外光照度为 $6.5 \mu\text{x}$ 的微弱汞灯光谱。采用增强型 CMOS 相机,该系统可在 10 m 距离外对毫焦脉冲能量的飞秒激光光丝激发的质量分数为 13×10^{-6} 的 NaCl 气溶胶的荧光进行时间分辨光谱测量。未来将进一步改进 FPI 的装调方法^[26],为 FPI 和非涅耳透镜之间的光线耦合设计更匹配的光学元件,进一步提高该光谱探测系统的光谱分辨率和弱光探测能力,使其在远程大气污染物测量中发挥更大的作用。

参 考 文 献

- [1] 刘晓激. NaCl 颗粒物污染对油松和银中杨叶片性状的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022: 50-53.
Liu X W. Effect of NaCl particulate matter pollution on leaf traits of pinus tabulaeformis and populus alba \times P. Berolinensis[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022: 50-53.
- [2] 肖葵, 董超芳, 李晓刚, 等. 在污染大气环境中 NaCl 对镁合金的协同作用[J]. 装备环境工程, 2006, 3(6): 26-29.
Xiao K, Dong C F, Li X G, et al. Synergetic effect of NaCl in polluted atmosphere to AZ91D magnesium alloys[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(6): 26-29.
- [3] 王艳琪. 基于激光雷达的山东地区大气气溶胶污染检测研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2022: 3-4.
Wang Y Q. Study on aerosol pollution detection based on lidar in Shandong[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2022: 3-4.
- [4] 孙艳娜, 满宝元, 高勋, 等. 飞秒激光诱导 Zn 等离子体发射光谱时间演化特性[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0115002.
Sun Y N, Man B Y, Gao X, et al. Time evolution characteristics of Zn plasma spectra induced by femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0115002.
- [5] Zimmer W, Rodriguez M, Wöste L. Application perspectives of intense laser pulses in atmospheric diagnostics[M]//Hering P, Lay J P, Stry S. Laser in environmental and life sciences. Heidelberg: Springer, 2004: 19-33.
- [6] Fujii T, Goto N, Miki M, et al. Lidar measurement of constituents of microparticles in air by laser-induced breakdown spectroscopy using femtosecond terawatt laser pulses[J]. Optics Letters, 2006, 31(23): 3456-3458.
- [7] Daigle J F, Méjean G, Liu W, et al. Long range trace detection in aqueous aerosol using remote filament-induced breakdown spectroscopy[J]. Applied Physics B, 2007, 87(4): 749-754.
- [8] Álvarez-Trujillo L A, Lazic V, Moros J, et al. Standoff monitoring of aqueous aerosols using nanosecond laser-induced breakdown spectroscopy: droplet size and matrix effects[J]. Applied Optics, 2017, 56(13): 3773-3782.
- [9] Golik S S, Mayor A Y, Lisitsa V V, et al. Limits of detection of chemical elements in an aqueous aerosol in filament-induced breakdown spectroscopy[J]. Journal of Applied Spectroscopy, 2021, 88(2): 337-342.
- [10] Jacquinet P. The luminosity of spectrometers with prisms, gratings, or Fabry-Perot etalons[J]. Journal of the Optical Society of America, 1954, 44(10): 761-765.
- [11] 郝志博, 叶慧琪, 唐靓, 等. 利用法布里-珀罗标准具提高天文高分辨光谱仪的波长定标精度[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 0112002.
Hao Z B, Ye H Q, Tang L, et al. Improvement of wavelength calibration accuracy of astronomical high-resolution spectrometers with Fabry-Perot etalons[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0112002.
- [12] 庄鹏, 沈法华, 王邦新, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪的瑞利-米散射测风激光雷达研究[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1210001.
Zhuang P, Shen F H, Wang B X, et al. Rayleigh-Mie wind lidar based on Fabry-Perot interferometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1210001.
- [13] Buisson H, Fabry C, Bourget H. An application of interference to

- the the study of the Orion nebula[J]. The Astrophysical Journal Letters, 1914, 40: 241.
- [14] Rangwala N, Williams T B, Pietraszewski C, et al. An imaging Fabry-Pérot system for the Robert stobie spectrograph on the southern African large telescope[J]. The Astronomical Journal, 2008, 135(5): 1825-1836.
- [15] Shiokawa K, Otsuka Y, Oyama S, et al. Development of low-cost sky-scanning Fabry-Perot interferometers for airglow and auroral studies[J]. Earth, Planets and Space, 2012, 64(11): 1033-1046.
- [16] Wang J, Yuan M, Chen N, et al. Continuous tunable cavity Fabry-Perot interferometer by using potassium dideuterium phosphate with two ring electrodes[J]. Applied Optics, 2019, 58(16): 4425.
- [17] Veenendaal I, Naylor D, Gom B, et al. An angle-scanned cryogenic Fabry-Pérot interferometer for far-infrared astronomy[J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(8): 083108.
- [18] Kuhn J, Bobrowski N, Wagner T, et al. Mobile and high-spectral-resolution Fabry-Pérot interferometer spectrographs for atmospheric remote sensing[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2021, 14(12): 7873-7892.
- [19] Chau J H, Hsieh C C, Lin Y M, et al. Preparation of transparent silica-PMMA nanocomposite hard coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2008, 62: 436-439.
- [20] 钱飞. 外差干涉纳米定位系统中 PZT 的迟滞特性研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2015: 15-18.
Qian F. Hysteresis characteristics study of PZT in heterodyne interferometric nano-positioning system[D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2015: 15-18.
- [21] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [22] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2004.
Fei Y T. Error theory and data processing[M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [23] Meyer J, Untiet V, Fahlke C, et al. Quantitative determination of cellular $[Na^+]$ by fluorescence lifetime imaging with CoroNaGreen [J]. The Journal of General Physiology, 2019, 151(11): 1319-1331.
- [24] Fitzgerald C, Hosny N A, Tong H, et al. Fluorescence lifetime imaging of optically levitated aerosol: a technique to quantitatively map the viscosity of suspended aerosol particles[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2016, 18(31): 21710-21719.
- [25] Eickmans J H, Hsieh W F, Chang R K. Plasma spectroscopy of H, Li, and Na in plumes resulting from laser-induced droplet explosion[J]. Applied Optics, 1987, 26(17): 3721-3725.
- [26] 商俊娟, 竹显伟, 张浩, 等. 低振动敏感性的法布里-珀罗腔设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(7): 0714003.
Shang J J, Zhu X W, Zhang H, et al. Design of Fabry-Pérot cavity with low vibration sensitivity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(7): 0714003.

Spectra Detection of NaCl Aerosol Fluorescence Induced by Femtosecond Laser Filament Based on Fresnel Lens and Fabry-Perot Interferometer

Jin Kang¹, Zhao Xing^{1,2}, Zhang Nan^{1,2*}, Liu Weiwei^{1,2}

¹*Institute of Modern Optics, College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;*

²*Tianjin Key Laboratory of Micro-scale Optical Information Science and Technology, Tianjin 300350, China*

Abstract

Objective Aerosol is the general term for solid, liquid, and other particulate material in the atmosphere. The possible sources of aerosol include the combustion of biological substances and fossil fuels, mineral dust, and other harmful pollutant particles. When the concentration of NaCl aerosol in the atmosphere is higher than a threshold concentration, it inhibits plant growth, corrodes metals, harms the respiratory, cardiovascular, and cerebrovascular systems of human beings.

When a femtosecond laser is transmitted in the air, owing to the nonlinear self-focusing effect, the focused light intensity reaches 10^{13} W/cm². At this intensity, any substance in air is ionized and the fluorescence spectrum corresponding to the chemical composition of the substance is released. The composition and concentration of atmospheric pollutants can be detected based on this property by collecting and analyzing the fluorescence spectrum excited by the femtosecond laser filament, realizing air pollution monitoring and providing basic data for the formulation of air pollution control programs.

Compared with the grating spectrometer, the light intensity collected by the Fabry-Perot interferometer (FPI) is 2–3 orders of magnitude larger than that of the grating spectrometer with the same spectral resolution. Simultaneously, because the aperture of the FPI is large, the spectrum of the extended light source can be measured directly, thus reducing the requirement of light-collecting elements. Based on the above characteristics, FPI is an ideal device for remote weak-light spectrum measurement.

A Fresnel lens is considerably lighter and less expensive than the traditional spherical lens, which is suitable for the large-aperture low-light collection system. In this study, a Fresnel lens with an aperture of 1.1 m is used to converge remote low-light sources. Although the size of the focusing spot is large, it still can form a remote low-light spectrum detection system with the large-aperture FPI.

Methods The Fresnel lens used in this study is made of polymethyl methacrylate (PMMA) whose diameter and focal length are 1.1 m and 1.31 m, respectively. The Fresnel lens has a ring spacing of 0.5 mm, and each ring has a different depth. The Fresnel lens used in this study has an average transmittance of 94% in the visible light range. The FPI used in this study consists of two partially reflective mirrors with diameters of 1 inch (1 inch=2.54 cm) and three 2-mm-thick piezoelectric ceramics (PZT). The reflectivity of the mirrors is 90%, the applied voltage range of the PZT is 0–60 V, and the maximum displacement of the PZT is 3 μm. The PZT used in this study has good linearity between the displacement and applied voltage, the resolution of the PZT is 0.5 nm, and the free

spectrum range of FPI is 9 nm.

Results and Discussions The spectrum of the mercury lamp placed at a distance of 8 m away from the Fresnel lens and FPI is determined when an industrial charge coupled device (CCD) is employed (Fig. 7). By applying different voltages to the PZT, the wavelength of the emission spectral line of the mercury lamp is calculated using the relationship between the wavelength and radius of the interference ring. The wavelength error measured by the FPI is less than 1 nm, which is mainly originated from the radius error of the interference ring obtained from the picture taken by the CCD camera.

Using the industrial CCD as the detector, the spectrum of the mercury lamp can still be detected even when the distance between the lamp and FPI increases to 30 m (Fig. 10). In this case, the illumination on the Fresnel lens surface is only 6.5 μlx .

The self-built FPI combined with the Fresnel lens is used to detect the fluorescent spectrum of the NaCl aerosol induced by the femtosecond laser optical filament at a distance of 10 m (Fig. 11). In the experiment, the pulse energy of the femtosecond laser is 4 mJ, and the pulse width is 50 fs. The NaCl aerosol with mass fraction of 13×10^{-6} is generated by the aerosol generator. In this case, an intensified complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) camera is employed as the detector. The emission lines of Na^+ at 589 nm are detected.

Conclusions In this study, a Fresnel lens with a diameter of 1.1 m and a self-built FPI are used to construct a remote spectral detection system. With the efficient light-collecting characteristics of the Fresnel lens and large light-collecting aperture FPI, an industrial CCD camera can detect the spectrum of the micro-lux light sources. Using an intensified CMOS camera, the system can measure the fluorescence of NaCl aerosol with mass fraction of 13×10^{-6} excited by the femtosecond laser filament at a distance of 10 m. In the future, by further improving the fitting method of FPI and designing more matching optical elements for the light coupling between the FPI and Fresnel lens, the spectral resolution and low-light detection capability of the spectral detection system can be further improved to play a greater role in the long-range measurement of atmospheric pollutants.

Key words spectroscopy; Fabry-Perot interferometer; Fresnel lens; remote spectrum detection; filament induced fluorescence spectrum