

引用格式: JIANG Yuan, ZHENG Ruijian, XU Xinke, et al. Remote Sensor System of Multi-component Gas Based on Wavelength Modulation Spectroscopy(Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(3):0352114

蒋源,郑睿健,续新科,等. 基于波长调制光谱技术的多组分气体遥测系统(特邀)[J]. 光子学报, 2023, 52(3):0352114

# 基于波长调制光谱技术的多组分气体遥测系统 (特邀)

蒋源<sup>1,2</sup>, 郑睿健<sup>1,2</sup>, 续新科<sup>1,2</sup>, 任隆样<sup>1,2</sup>, 赵刚<sup>1,2</sup>, 赵延霆<sup>1,2</sup>, 马维光<sup>1,2</sup>

(1 山西大学 量子光学与光量子器件国家重点实验室 激光光谱研究所, 太原 030006)

(2 山西大学 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

**摘要:**为实现对危化品气体泄漏的实时、远距离、非接触性监测,提高监测效率和精度,研制了一种多组分气体激光遥测系统。基于波长调制光谱技术,利用STM32芯片结合自主设计的驱动电路对激光器进行控制,采用不同的调制频率分别提取甲烷、氨气、乙炔的二次谐波信号,实现混合气体的同步、实时、远距离遥测。采用光强调制幅度归一化的波长调制光谱技术使遥测结果免受回波激光对信号强度的影响。实验测量表明本系统对甲烷、氨气、乙炔的探测下限分别可以达到87 ppm·m、212 ppm·m、12 ppm·m,测量误差小于10%。测量不同距离下的遥测信号,遥测距离至少可达40 m。本系统为激光痕量气体检测研究与应用提供了一种多气体、实时、同步、高灵敏度、远距离、性能稳定的遥测解决方案,能够广泛应用于矿山灾害气体监测预警,危化品场站和运输管网等场合的气体泄漏监测预警。

**关键词:**光谱学;痕量气体检测;多组分气体;可调谐半导体激光吸收光谱;波长调制光谱技术;气体遥测

中图分类号:O433.5

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235203.0352114

## 0 引言

甲烷(CH<sub>4</sub>)、氨气(NH<sub>3</sub>)、乙炔(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)等都是化工生产中极为常见的易燃易爆、有毒危险化学气体。天然气场站、矿山开采、工业化工、生产制造、气体管路运输等场所一旦发生危化品气体泄漏,其造成的经济损失以及给人身安全带来的威胁都是巨大的。因此,加强对此类危化品气体泄漏的实时监控预警,研究和开发一种能够实时、准确、可靠地监测此类气体泄漏并及时预警的多气体泄漏遥测系统或装置是极其必要的。

在气体泄漏检测领域,传统的检测方式包括电化学检测、催化燃烧检测、气相色谱法检测、人工巡检<sup>[1-5]</sup>,其存在响应速度慢、维护成本高、效率低、需要近距离接触取样检测、无法实时监测等缺陷。近年来,有关激光光谱痕量气体检测领域的相关研究发展迅速,基于气体分子的光谱在特定激光波长区域具有“指纹”特性进行气体泄漏监测,利用激光的准直性、高强度、发散角小等优点,可以实现气体浓度的远距离遥测。可调谐半导体激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)也已经成为痕量气体检测的关键技术<sup>[6-7]</sup>,具有测量响应速度快、波长选择性强、免标定等优势<sup>[8-9]</sup>。其中,传统的直接吸收光谱(Direct Absorption Spectroscopy, DAS)技术,虽然可以实现免定标的浓度测量,但由于1/f噪声、压力展宽、探测器噪声、激光频率不稳定等因素的影响,探测灵敏度受到了极大的限制<sup>[10-11]</sup>,低气体浓度的信号往往会被噪声淹没。采用波长调制技术(Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS),通过调制解调获得的二次谐波(2f)信号信噪比高,能够大幅提升信噪比,实现更低的浓度测量极限,提升测量灵敏度。目前基于TDLAS气体检测的研究绝大部分都是定点监测,如采用空芯光子晶体光纤、单光程池、Herriot型多通池等作为检测气室<sup>[12-14]</sup>,并且在遥测方面大多也只是针对单一气体的遥测研究<sup>[15-17]</sup>。因此,研究和开发一种多气体遥测系统具有很大的实用价值。

本文提出一种可以同时监测CH<sub>4</sub>、NH<sub>3</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>混合气体的基于TDLAS-WMS的光谱遥测系统,其核心是

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61875107, 61905136, 62175139)

第一作者:蒋源, holyjoy@163.com

通讯作者:赵延霆, zhaoyt@sxu.edu.cn; 马维光, mwg@sxu.edu.cn

收稿日期:2022-06-19; 录用日期:2022-07-27

<http://www.photon.ac.cn>

采用WMS技术对适用于检测三种气体的特定波长的DFB激光器进行不同频率的波长调制,探测到气体后以回波反射的方式被探测器接收,利用基于SMT32的硬件系统对接收到的吸收光谱信号进行解调、滤波、放大等处理,获得对应的气体浓度数据。同时,实验研究了WMS技术对信号噪声的抑制效果,通过检测不同浓度的三种气体对系统测量效果及特性进行分析,研究了系统的遥测极限,分析和评估了测量误差和影响因素。

## 1 系统工作原理

当激光通过被探测气体,其波长与气体分子某一对能级间隔相同时,气体分子吸收激光,波长扫描范围内会出现气体吸收峰,使激光光强衰减。浓度越高,吸收后的光强越弱,吸收峰越高,通过激光功率的变化量可以确定出气体的浓度,根据Beer-Lambert定律

$$I_t = I_0 \exp[-a(\nu)CL] \quad (1)$$

式中, $I_t$ 为出射光强; $I_0$ 为入射光强; $C$ 为气体浓度; $L$ 为光程。其中 $a(\nu)$ 为气体吸收系数,表示为 $a(\nu) = S(T)\phi(\nu)N$ 。其中 $S(T)$ 为气体吸收谱线的线性强度; $\phi(\nu)$ 为线型函数; $N$ 为气体分子密度。

由于直接吸收非常弱,采用WMS技术,在激光驱动上叠加正弦波电流进行频率调制<sup>[15]</sup>,调制后的激光输出频率和光强可表示为<sup>[18-19]</sup>

$$\nu(t) = \bar{\nu} + a \cos(\omega t + \varphi_1) \quad (2)$$

$$I_t(t) = \bar{I}_0(t) [1 + i_1 \cos(\omega t + \varphi_2)] e^{-a(\nu(t) + a \cos(\omega t + \varphi_1))} \quad (3)$$

式中, $\bar{\nu}$ 为激光中心频率; $a$ 为调制幅度; $\omega$ 为正弦调制频率; $t$ 为时间; $\bar{I}_0$ 为激光中心频率 $\bar{\nu}$ 处的平均强度; $i_1$ 为归一化光强调制幅度; $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 为频率调制和功率调制的相位差。式(3)中的指数部分反映了分子的吸收信息,将其进行Fourier展开后,可以得到吸收系数下的第 $k$ 阶Fourier展开系数 $A_n(\bar{\nu}, \alpha)$ 。其中的二次谐波分量可表示为

$$A_2(\bar{\nu}, \alpha) = \frac{PCL}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S(T) \times \phi(\bar{\nu} + \alpha \cos(\omega t)) \times \cos(2\omega t) d\omega t \quad (4)$$

式中, $P$ 为气体压强。由式(4)知,吸收系数的二阶傅里叶系数的幅值皆正比于气体浓度和光程的乘积。采用WMS技术,基于STM32实现数字锁相解调,获得 $2f$ 信号,其幅值可表示为

$$S_{2f} = \frac{G\bar{I}_0}{2} A_2 \quad (5)$$

式中, $G$ 为光电探测器的响应系数。一次谐波( $1f$ )信号幅度可以表示为

$$S_{1f} = \frac{G\bar{I}_0}{2} i_1 \quad (6)$$

用一次谐波信号归一化二次谐波信号,得到

$$S_{2f}/S_{1f} = \frac{A_2}{i_1} \quad (7)$$

由式(7)可知, $2f/1f$ 归一化后的信号与光强、探测器响应 $G$ 以及目标反射率都没有关系。因此采用 $1f$ 信号对 $2f$ 信号进行归一化可以有效地消除光强减弱和目标反射率变化所造成的对测量结果的影响,提高遥测的精确性。同时,WMS技术能有效减少激光源和探测器噪声对信号的影响,可大幅提高信噪比。

自然环境下大气中的水( $H_2O$ )与二氧化碳( $CO_2$ )是干扰 $CH_4$ 、 $NH_3$ 、 $C_2H_2$ 吸收峰的主要气体。选取合适的气体吸收谱线能有效提高遥测系统的测量灵敏度,降低其他气体对检测的影响。如图1所示,根据HITRAN数据库数据绘制 $CH_4$ 、 $NH_3$ 、 $C_2H_2$ 、 $CO_2$ 、 $H_2O$ 的吸收谱线对照图。图1为五种气体分子分别在 $6\ 039\sim 6\ 055\text{ cm}^{-1}$ 、 $6\ 610\sim 6\ 620\text{ cm}^{-1}$ 、 $6\ 567\sim 6\ 578\text{ cm}^{-1}$ 范围内的吸收谱线。在描述分子吸收谱线强度时,沿用了大部分参考文献<sup>[15,17]</sup>中常见的单位( $\text{cm}^{-1}/(\text{molecule}\cdot\text{cm}^{-2})$ ,即每分子柱密度的波数),对单位的定义来源于HITRAN数据库<sup>[20-21]</sup>。图1(a)、(b)表明 $CH_4$ 和 $NH_3$ 分别在 $6\ 046.96\text{ cm}^{-1}$ ( $1\ 653.7\text{ nm}$ )处和 $6\ 612.73\text{ cm}^{-1}$ ( $1\ 512.2\text{ nm}$ )处的吸收最强,达到 $10^{-21}\text{ cm}^{-1}\text{mol}^{-1}\text{cm}^{-2}$ 数量级。图1(c)表明 $C_2H_2$ 分子在 $6\ 574.36\text{ cm}^{-1}$ ( $1\ 521.1\text{ nm}$ )处存在较强的激光吸收谱线,达到 $10^{-20}\text{ cm}^{-1}\text{mol}^{-1}\text{cm}^{-2}$ 数量级。并且, $H_2O$ 和 $CO_2$ 在选取的吸收频率附近的吸收谱线都很弱,都在 $10^{-25}\text{ cm}^{-1}\text{mol}^{-1}\text{cm}^{-2}$ 数量级以下,对三种气体的探测均干扰较小。我们也注意到在每种测量气体吸收很强的波长处,其余两种测量气体的吸收是非常弱的,不会对测

量产生严重的干扰。最终,对上述三种气体的检测,分别使用 1 653.7 nm、1 512.2 nm、1 521.1 nm 波长的可调谐分布反馈式激光器(Distributed Feedback Laser,DFB)开展系统搭建与实验检测。

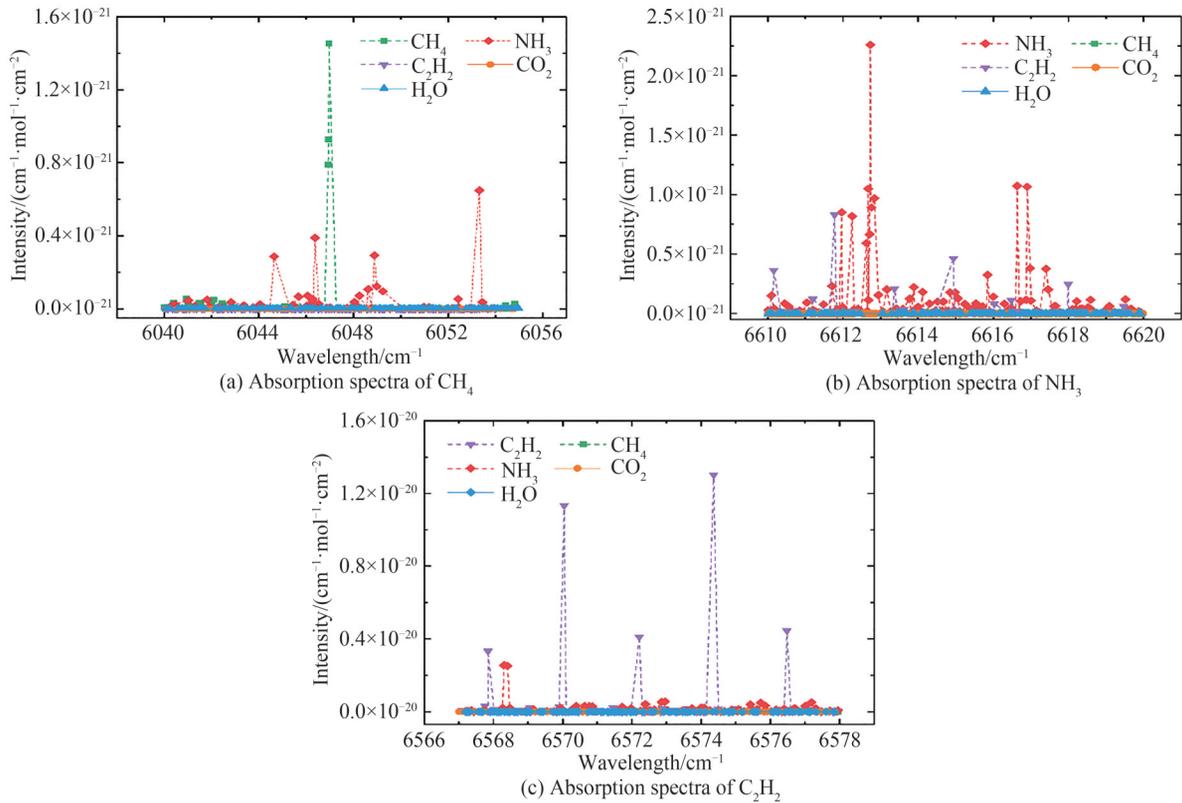


图 1 三种气体在不同波长范围内的吸收谱线强度

Fig. 1 Intensity of absorption spectra of three gases in different wavelength ranges

## 2 遥测系统实验装置结构

遥测系统的结构框图如图 2 所示。系统主要由基于 STM32 的主控制单元、光学遥测模块和上位机组成。主控制单元模块集成了激光器驱动、温度控制、滤波、数字锁相放大器等功能。主控单元以锯齿波扫描信号叠加正弦波调制信号驱动 DFB 激光器(激光功率为 15 mW),通过 MAX19 系列芯片进行激光器的温度控制,波长调制后的扫描激光波长能够覆盖被测气体在近红外波段的特征吸收峰。

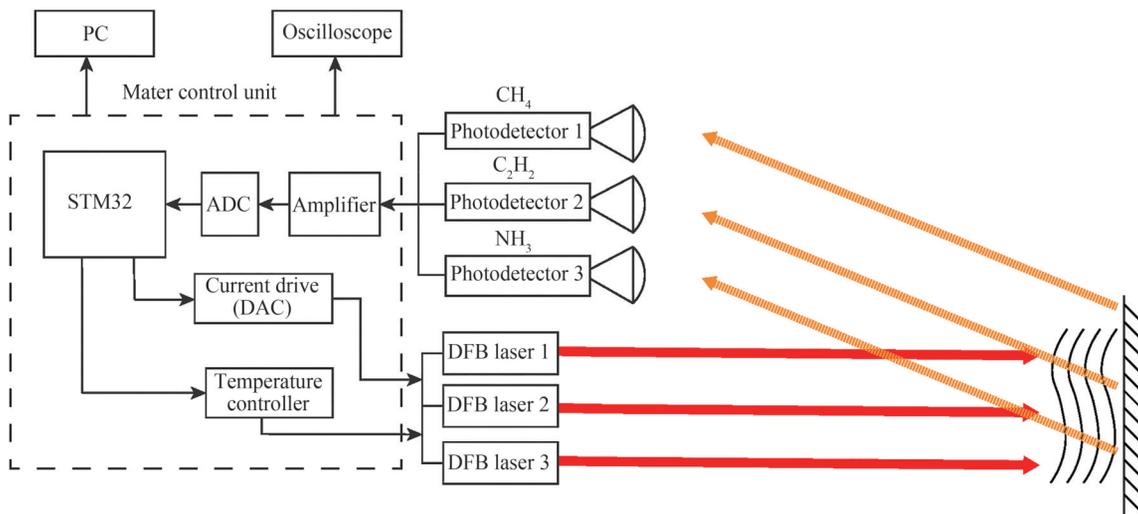


图 2 实验系统结构框图

Fig. 2 The system schematic diagram of experimental system

发射的激光光束经过被探测气体后在目标反射面处发生漫反射,反射回来的光信号被聚焦透镜汇聚到光电探测器。主控单元接收到直接吸收光谱信号后对其进行解调提取 $2f$ 信号,同时对 $2f$ 信号进行寻峰分析,计算 $2f$ 信号对应的浓度信息,并通过串口将数据发送到PC终端。系统探测响应时间为0.1 s。此外,直接吸收信号和二次谐波信号可以通过模拟端口输出到示波器上。

当探测目标同时出现三种组分气体的泄露,如果以相同频率的正弦波调制信号叠加到锯齿波扫描信号中来驱动三个激光器去探测,那么出射的三路激光将携带相同频率的正弦波,并且用于接收不同气体吸收光谱信号的三个光电探测器都是InGaAs PIN光电二极管,会导致反射回来的光谱吸收信号被其他探测器接收后错误解调,从而发生不同气体吸收信号间的相互串扰。为了解决这种干扰,实现对同一目标处的多组分气体进行同时监测,本文使用三个主控制单元分别对不同波长的三个DFB激光器进行控制,同时设置三个不同频率的调制信号(频率差为1 kHz)分别对三个激光器驱动电流进行调制,尽管光电探测器依旧会接收到不同调制频率的吸收信号,但在主控单元解调信号时,三路锁相放大器只会解调与各自调制频率相同的信号,最后获得三路 $2f$ 信号浓度,即对应了三种不同气体的浓度信息。

在遥测过程中,当测量距离变远或反射面反射率低时,漫反射回来的光强度会下降。在对探测到的吸收信号进行调制解调之前,本文借助多个不同增益的放大电路,将遥测距离(回波光强)划分为不同区间,允许系统通过判别光强大小来对直接吸收信号进行不同程度的放大或缩小,从而保证近距离(或目标反射率较强)时探测到的吸收信号不会饱和,远距离(或目标反射率较弱)时探测到的吸收信号不会太弱,即确保不同距离区间(或不同回波光强区间)的直接吸收信号幅度有较好的一致性。同时,还可以通过程序修改各级放大器的放大参数,对不同光强区间吸收信号进行校准。需要注意的是,选择放大器增益并不能精确的对吸收信号进行归一化,因为当测量距离达到10 m以外(或回波光强很弱)时,所使用的放大器就已经是增益最大的一路,直接吸收信号依旧会随距离增加而减弱。在获取放大后的吸收信号后,系统将其进行 $2f/1f$ 归一化处理:提取 $1f$ 信号背景幅值的多个数据点,求平均值后作为归一化值对 $2f$ 信号进行归一化处理。这将有效地消除光强、探测器响应、目标反射系数变化对测量结果的影响,保证在遥测范围内 $2f$ 信号幅值不会急剧下降,从而有效提升测量精确度。同时,实验对比了10~40 m处相同浓度的甲烷标准气体在光强归一化和未归一化处理时的测量结果。如图3(a)所示,系统在没有进行光强归一化后计算时,测量得到的信号幅度随着距离变远逐渐减小;如图3(b)所示,在加入归一化算法后,远距离处的 $2f$ 信号被放大,远距离测量得到的浓度信号与近距离处的测量结果几乎保证一致。

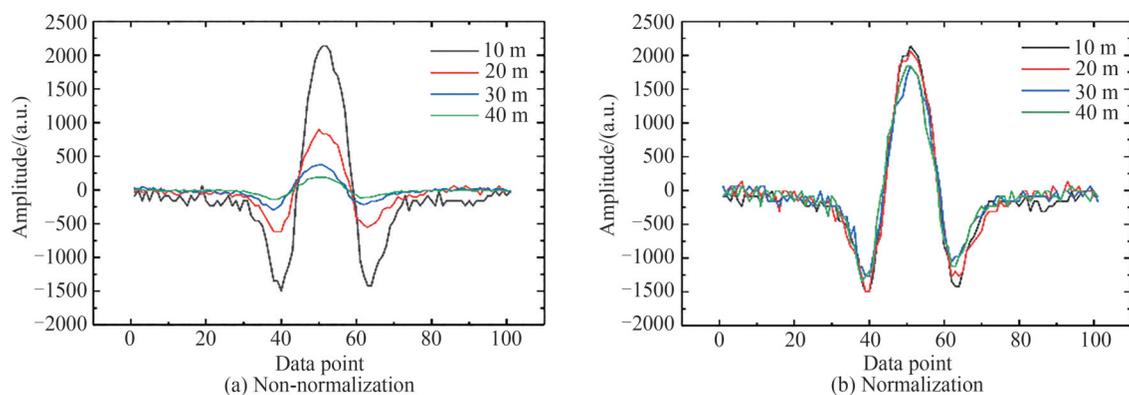


图3 不同距离处未归一化和归一化的 $2f$ 信号对比

Fig. 3 Comparison of non-normalized and normalized  $2f$  signals with light intensity at different distances

### 3 实验过程与结果分析

#### 3.1 DAS信号与 $2f$ 信号对比实验

为消除 $1/f$ 噪声、光强波动、遥测距离和反射面等因素对系统的影响,提高检测灵敏度,采用WMS技术调制解调获得 $2f$ 信号来表征浓度信息。为了验证抑制噪声的效果,实验中以木板墙面为目标反射面,在40 m范围内移动气袋和反射面,获得了在未标定状态下的直接吸收光谱信号和 $2f$ 信号的强度和信噪比。如图4(a)所示,系统对40 m处的积分浓度为 $3\ 500\ \text{ppm}\cdot\text{m}$  ( $1\ \text{ppm}=1\times 10^{-6}$ )甲烷气袋进行探测得到的 $2f$ 信号和DAS信号,可以明显地看出 $2f$ 信号的幅度和信噪比都优于DAS信号。由图4(a)和图4(b)可知,连续测

量不同距离条件下的信号强度,发现DAS信号幅值(图4(c))随着探测距离增加,呈现出急剧的下降,相比于10 m处的信号强度,40 m处的信号强度下降了大约85%。而 $2f$ 信号的强度在40 m范围内波动较小,强度下降在9%左右,表明 $2f$ 信号对系统的噪声抑制效果明显,能够大大提高探测灵敏度和探测距离。

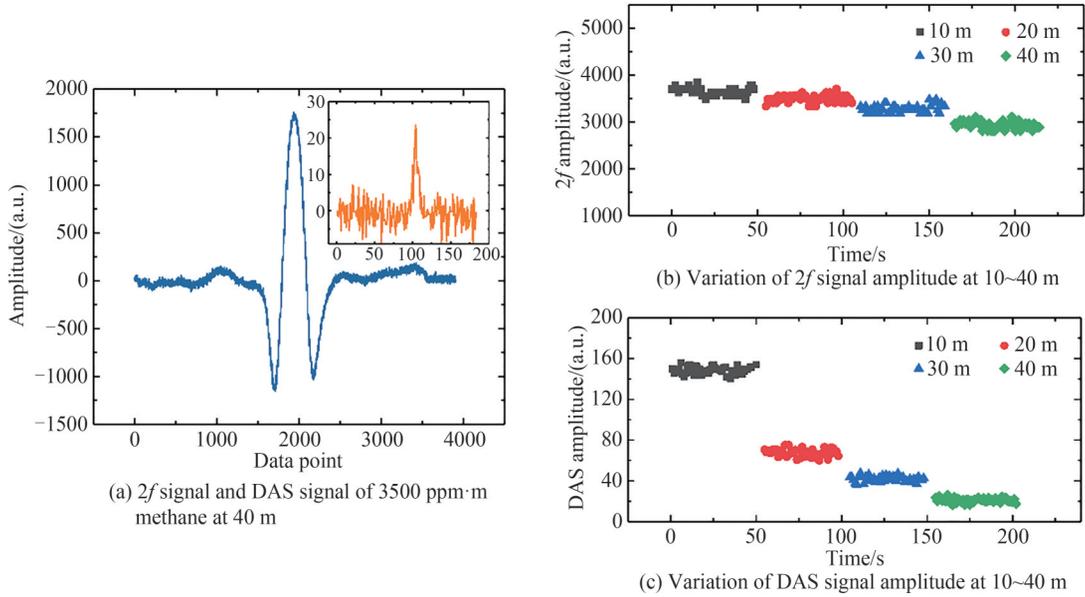


图4 甲烷的 $2f$ 信号和DAS信号强度测量结果

Fig. 4 Measurement results of methane DAS signal and  $2f$  signal intensity

### 3.2 系统浓度标定实验

如图5所示,在未标定情况下,观测不同浓度的三种气体( $\text{CH}_4$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ )的 $2f$ 信号幅值变化情况。随着气体的积分浓度不断增加,二次谐波信号幅度不断增大。

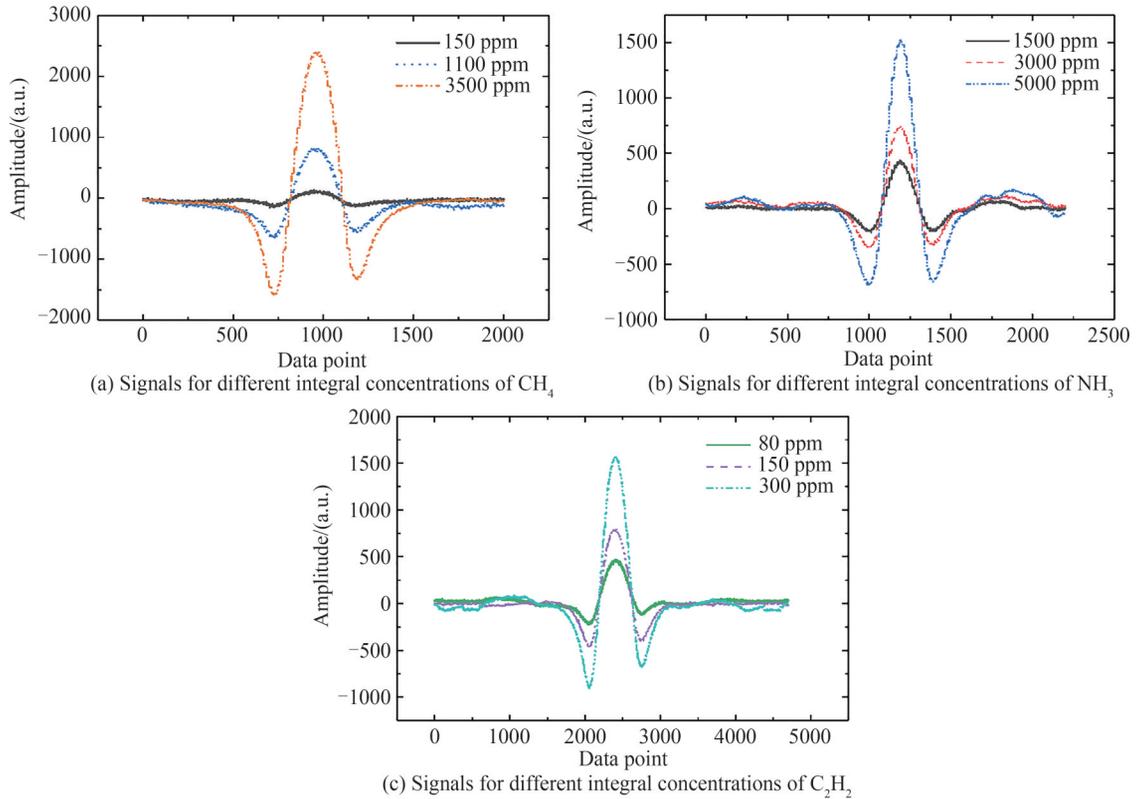


图5 三种气体不同积分浓度的 $2f$ 信号

Fig. 5  $2f$  signals for three gases with different integrated concentrations

因为对吸收信号的前置放大和 $2f/1f$ 归一化处理都是系统自动处理进行的,所以在对系统进行浓度标定之前,只需要近距离利用反射镜简单校准程序中不同光强区间对应的四路放大器的放大参数。完成校准之后,对系统进行测量值的标定。本系统所测量的浓度值是通过测量激光吸收,计算得到甲烷分子的柱密度,用路径积分浓度( $\text{ppm}\cdot\text{m}$ )作为测量单位,即沿某一路径上气体的浓度之和(积分)。对 $\text{CH}_4$ 的定标测量选取 $150\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 、 $500\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 、 $1\ 100\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 、 $1\ 800\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 、 $3\ 500\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 、 $5\ 000\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 、 $7\ 000\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 、 $10\ 000\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 的标准气袋;对 $\text{NH}_3$ 的定标测量选取 $800\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 、 $1500\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 、 $3\ 000\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 、 $5\ 000\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 、 $10\ 000\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 、 $20\ 000\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 的标准气袋;对 $\text{C}_2\text{H}_2$ 的定标测量选取 $80\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 、 $150\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 、 $300\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 、 $500\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 、 $1\ 000\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 、 $2\ 000\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 的标准气袋。如图6所示,图中的散点为系统在 $10\text{ m}$ 处探测到的定标测量数据的平均值;图中实线表示对三组标定数据进行非线性拟合获得的结果。

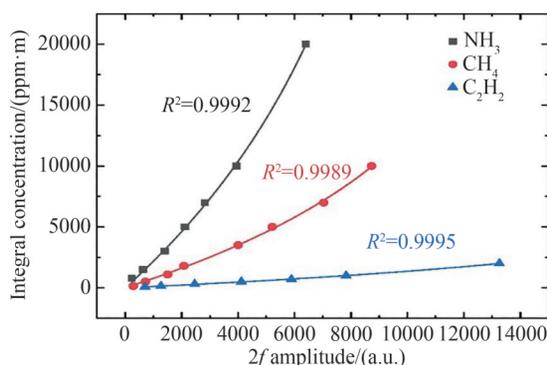


图6 不同积分浓度的三种气体定标数据

Fig. 6 Calibration data for three gases with different integration concentrations

由图6可知,在未定标情况下,实际积分浓度和 $2f$ 信号幅值不是完全的线性关系,为了获得不同浓度的气体的准确浓度数据,分析不同浓度气体的实际积分浓度值和测量得到的 $2f$ 信号幅值的关系,对数据进行函数拟合。拟合公式为

$$Y = -A \times \ln(1 - B \times X) \quad (8)$$

式中, $Y$ 为给定的积分浓度, $X$ 为测量得到的 $2f$ 信号峰值, $A$ 和 $B$ 为通过拟合获得的算数因子。 $\text{CH}_4$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 模块的定标测量拟合系数 $R^2$ 分别为 $0.998\ 9$ 、 $0.999\ 2$ 、 $0.999\ 5$ 。利用拟合得到的结果对主控制单元的程序进行参数修正,以获得准确的浓度测量值。

### 3.3 系统测量精度与误差评估

为了评估系统的测量性能和误差,针对不同积分浓度的气体和不同遥测距离条件,对系统的响应表现进行了测量实验。如表1所示,同步探测在 $10\text{ m}$ 距离处的不同积分浓度的甲烷、氨气、乙炔混合气体,对采集到的 $10\text{ s}$ 内的连续浓度数据进行平均,作为测量的浓度值。在 $10\text{ m}$ 的遥测距离处,系统对 $\text{CH}_4$ 气体的测量平均值的最大误差为 $2.72\%$ ,最小误差为 $0.67\%$ ;对 $\text{NH}_3$ 气体的测量平均值的最大误差为 $3.45\%$ ,最小误差为 $0.38\%$ ;对 $\text{C}_2\text{H}_2$ 气体的测量平均值的最大误差为 $9.07\%$ ,最小误差为 $0.35\%$ 。

如图7所示,在 $10\text{ m}$ 、 $20\text{ m}$ 、 $30\text{ m}$ 、 $40\text{ m}$ 处分别监测了 $3\ 500\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 的 $\text{CH}_4$ 、 $5\ 000\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 的 $\text{NH}_3$ 、 $300\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 的 $\text{C}_2\text{H}_2$ 的测量浓度波动情况,可以观测到系统在 $10\text{ m}\sim 30\text{ m}$ 范围内的测量值没有明显的下降,在 $40\text{ m}$ 处的测量值下降了大约 $4\%\sim 9\%$ 。同时,系统测量值的波动程度随距离的增加而加剧,但是整体测量值均在标定积分浓度值附近。此外,对不同距离处的测量误差进行了分析,如表2所示,借助图7给出的不同距离处的浓度数据,得到了系统在不同距离测量点处的测量误差:在 $10\text{ m}\sim 40\text{ m}$ 范围内,系统对甲烷的测量误差为 $0.24\%\sim 9.38\%$ ;对氨气的测量误差为 $0.29\%\sim 4.12\%$ ;对乙炔的测量误差为 $0.46\%\sim 5.43\%$ 。

表1 标定后的不同积分浓度的三种气体测量结果  
Table 1 Calibrated measurements of three gases at different integral concentrations

Integrated concentration/(ppm·m)	Measured average concentration/(ppm·m)	Standard deviation	Relative error/%
CH <sub>4</sub>			
150	154	7.4	2.72
500	495	13.7	0.94
1 100	1 127	30.2	2.48
1 800	1 827	42.3	1.52
3 500	3 476	43.1	0.67
5 000	5 082	44.9	1.65
7 000	7 116	110.1	1.66
10 000	10 229	190.5	2.29
NH <sub>3</sub>			
800	811	83.7	1.47
1 500	1 448	86.5	3.45
3 000	2 965	46.2	1.15
5 000	4 981	73.6	0.38
10 000	10 054	263.7	0.54
20 000	19 907	525.6	0.46
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>			
80	84	11.1	4.39
150	151	9.1	0.47
300	315	15.6	5.12
500	545	21.6	9.07
1 000	996	71.1	0.35
2 000	2 028	56.1	1.43

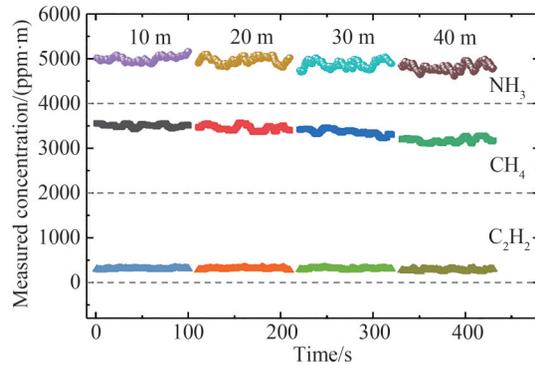


图7 三种气体不同遥测距离下的测量值波动情况  
Fig. 7 Fluctuation of measured values for three gases at different remoting distances

表2 三种气体不同遥测距离下的积分浓度测量情况  
Table 2 Integrated concentration measurements for three gases at different remoting distances

Distance/m	Measured average concentration/(ppm·m)	Standard deviation	Relative error/%
CH <sub>4</sub> (3 500 ppm·m)			
10	3 492	37.3	0.24
20	3 435	67.2	1.86
30	3 381	59.2	3.40
40	3 172	50.2	9.38

续表

Distance/m	Measured average concentration/(ppm·m)	Standard deviation	Relative error/%
NH <sub>3</sub> (5 000 ppm·m)			
10	4 986	66.9	0.29
20	4 982	89.3	0.35
30	4 864	89.0	2.72
40	4 794	89.2	4.12
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (300 ppm·m)			
10	310	15.4	3.30
20	308	17.5	2.70
30	299	16.9	0.46
40	284	18.3	5.43

### 3.4 系统检测下限分析

在前面的实验中我们测量了不同浓度的甲烷、氨气和乙炔气体。但是由于浓度配比条件有限,只能测量的最低的积分浓度分别为 150 ppm·m(CH<sub>4</sub>)、800 ppm·m(NH<sub>3</sub>)、80 ppm·m(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>),无法对更低浓度的气体进行测量来证明浓度下限的水平。因此,实验中通过对比噪声幅度与  $2f$  信号幅度来分析系统的测量极限。如图 8 所示,提取了甲烷模块在 10m 处的背景噪声信号(图 8(a))以及 1 100 ppm 的  $2f$  信号(图 8(b))。测得无浓度的背景噪声幅值为 0.006 4,测得 1 100 ppm·m 的  $2f$  信号幅值为 0.080 6。由此可得系统中甲烷模块的检测下限为:  $1\ 100 \times 0.006\ 4 / 0.080\ 6 \approx 87.34$  ppm·m。同理得到氨气模块的检测下限为:  $1\ 500 \times 0.005\ 9 / 0.041\ 7 \approx 212.41$  ppm·m;乙炔模块的检测下限为:  $75 \times 0.007\ 1 / 0.044\ 6 \approx 11.99$  ppm·m。

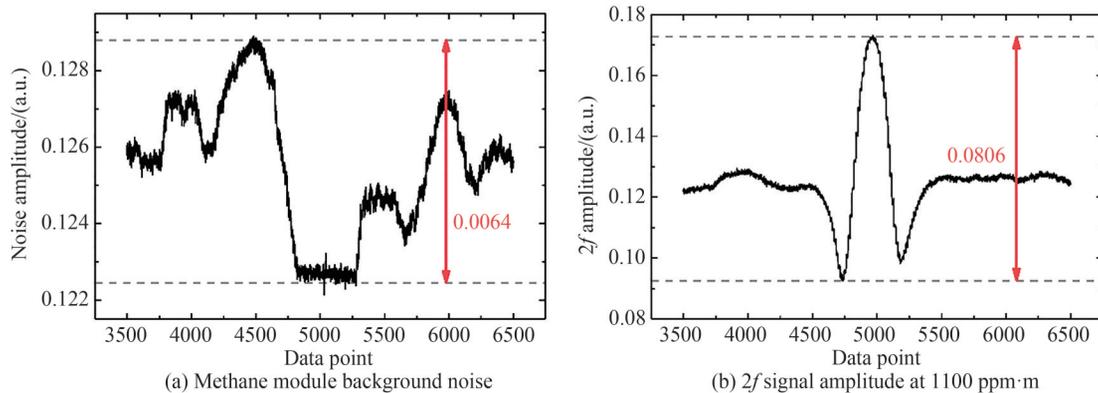


图 8 检测下限测量

Fig. 8 Measurement of lower detection limit

## 4 结论

本文实验研究了一种基于 TDLAS-WMS 技术的多气体遥测系统。分别选取 1 653.7 nm、1 521.1 nm、1 512.2 nm 附近的吸收峰作为系统测量 CH<sub>4</sub>、NH<sub>3</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气体的吸收谱线。系统采用自主研发的基于 STM32 的主控制单元驱动激光器,实现对吸收光谱信号的采集、处理等一系列遥测功能。系统针对三种气体探测模块采用不同调制频率的 WMS 技术,避免了接收信号的串扰,同时极大地抑制了探测噪声,提升了检测灵敏度和遥测距离。通过实验验证了  $2f$  信号处理技术对噪声的抑制效果,研究了系统的遥测性能及特性参数。实验表明系统遥测距离可达到 40 m,测量精确度优于 90%;系统对甲烷、氨气、乙炔的检测下限分别达到 87 ppm·m、212 ppm·m、12 ppm·m。该系统为激光痕量气体检测研究与应用提供了一种高灵敏度、非接触式、远距离、实时同步、多气体遥测解决方案,能够广泛应用于矿山灾害气体监测预警、危化品场站和运输管网等场合的气体泄漏监测预警。

## 参考文献

- [1] BACSIK Z, MINK J, KERESZTURY G. FTIR spectroscopy of the atmosphere part 2: applications [J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2005, 40(4): 327-390.
- [2] LIN C, GILLESPIE J, SCHUDER M D, et al. Evaluation and calibration of Aeroqual series 500 portable gas sensors for accurate measurement of ambient ozone and nitrogen dioxide[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 100: 111-116.
- [3] 丁黎明, 赵景波. 催化燃烧型甲烷传感器的研究[J]. *微计算机信息*, 2007, (1): 177-178
- [4] XINGXING G, WEI Z, XIANCAI F, et al. CO<sub>2</sub> gas detection device design based on TDLAS technology for agricultural environment [C]. 2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), 2017: 781-785.
- [5] LIANG Yuntao, CHEN Chengfeng, TIAN Fuchao, et al. Methane gas detection technology and its application in coal mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(4): 40-48.  
梁运涛, 陈成峰, 田富超, 等. 甲烷气体检测技术及其在煤矿中的应用[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(4): 40-48.
- [6] ADÁMEK P, OLEJNÍČEK J, ČADA M, et al. Time-resolved tunable diode laser absorption spectroscopy of pulsed plasma[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2428-2430.
- [7] ZHANG Lifang, WANG Fei, WEI Hao, et al. Denoising of digital filtering based on wavelength modulation spectroscopy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(7): 395-402.  
张立芳, 王飞, 蔚昊, 等. 基于波长调制的数字滤波技术的降噪研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(7): 395-402.
- [8] GOLDENSTEIN C S, SPEARRIN R M, JEFFRIES Jay B, et al. Infrared laser-absorption sensing for combustion gases [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, 60: 132-176.
- [9] WITZEL O, KLEIN A, MEFFERT C, et al. VCSEL-based, high-speed, in situ TDLAS for in-cylinder water vapor measurements in IC engines[J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 19951-19965.
- [10] MAITY A, PAL M, BANIK G D, et al. Cavity ring-down spectroscopy using an EC-QCL operating at 7.5 μm for direct monitoring of methane isotopes in air[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(11): 115701.
- [11] MCMANUS J B, ZAHNISER M S, NELSON D D, et al. Recent progress in laser-based trace gas instruments: performance and noise analysis[J]. *Applied Physics B*, 2015, 119(1): 203-218.
- [12] LI Jin, YAN Hao, MENG Jie. Research progress of gas absorption spectrum detection technology based on photonic crystal fiber[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(10): 2316-2329.  
李晋, 闫浩, 孟杰. 光子晶体光纤气体吸收光谱探测技术研究进展[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(10): 2316-2329.
- [13] WANG Zhen, DU Yanjun, DING Yanjun, et al. Monitoring of ambient methane and carbon dioxide concentrations based on wavelength modulation-direct absorption spectroscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(6): 97-104.  
王振, 杜艳君, 丁艳军, 等. 波长调制-直接吸收方法在线监测大气中CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>浓度[J]. *物理学报*, 2020, 69(6): 97-104.
- [14] PAL M, MAITY A, PRADHAN M. A continuous-wave quantum cascade laser near 7.5 μm combined with 2f-wavelength modulation spectroscopy for trace monitoring of ambient CH<sub>4</sub> concentrations[J]. *Laser Physics*, 2018, 28(10): 105702.
- [15] XU Jun, LI Yunfei, CHENG Yue, et al. Development of methane leakage telemetering system based on TDLAS-WMS [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(6): 0628006.  
徐俊, 李云飞, 程跃, 等. 基于TDLAS-WMS的甲烷泄漏遥测系统研制[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(6): 0628006.
- [16] ZHOU Yanwen, MIAO Shuzhuo, YAO Dan, et al. Laser methane remote sensor system based on wavelength modulation spectroscopy and wavelet denoising[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0611001.  
周言文, 苗澍茁, 姚丹, 等. 基于波长调制光谱和小波去噪的激光甲烷遥测系统[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 0611001.
- [17] ZHAO Chenglong, HUANG Danfei, LIU Zhiying, et al. Measurement of trace CO<sub>2</sub> concentration with open-path TDLAS-WMS technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(2): 0230001.  
赵成龙, 黄丹飞, 刘智颖, 等. 开放型TDLAS-WMS技术CO<sub>2</sub>痕量气体检测[J]. *光子学报*, 2022, 51(2): 0230001.
- [18] DING Wuwen, SUN Liqun, YI Luying. High sensitive scheme for methane remote sensor based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(10): 100702.  
丁武文, 孙利群, 衣路英. 基于可调谐半导体激光器吸收光谱的高灵敏度甲烷浓度遥测技术[J]. *物理学报*, 2017, 66(10): 100702.
- [19] SUR R, SUN K, JEFFRIES J B, et al. Multi-species laser absorption sensors for in situ monitoring of syngas composition [J]. *Applied Physics B*, 2014, 115(1): 9-24.
- [20] ROTHMAN L S, RINSLAND C P, GOLDMAN A, et al. The hitran molecular spectroscopic database and hawks (hitran atmospheric workstation) [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1998, 60(5): 665-711.
- [21] ROTHMAN L S, GORDON I E, BABIKOV Y, et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 130: 4-50.

## Remote Sensor System of Multi-component Gas Based on Wavelength Modulation Spectroscopy (Invited)

JIANG Yuan<sup>1,2</sup>, ZHENG Ruijian<sup>1,2</sup>, XU Xinke<sup>1,2</sup>, REN Longyang<sup>1,2</sup>, ZHAO Gang<sup>1,2</sup>,  
ZHAO Yanting<sup>1,2</sup>, MA Weiguang<sup>1,2</sup>

(1 *State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(2 *Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

**Abstract:** The economic loss and the threat to personal safety caused by the leakage of hazardous chemical gases in natural gas stations, mining, industrial chemicals, manufacturing, gas pipeline transportation and other places are huge. It is extremely necessary to strengthen the real-time monitoring and warning of such hazardous chemical gas leaks. However, traditional detection methods have defects such as slow response, high maintenance cost, low efficiency, the need for close contact sampling and testing, and the inability to monitor in real time. In recent years, tunable diode laser absorption spectroscopy has become a key technology for trace gas detection, with the advantages of fast measurement response and strong wavelength selectivity. In order to realize real-time, long-distance and non-contact monitoring of hazardous chemical gas leakage and to improve monitoring efficiency and accuracy, a multi-component trace gas remote sensing system based on wavelength modulation spectroscopy is proposed. The core of the system is based on STM32 chip combined with a self-designed driver circuit to control the laser, and the second harmonic signals of methane, ammonia and acetylene are extracted separately by using different modulation frequencies to realize simultaneous, real-time and long-distance detection for the mixed gases. We use wavelength modulated spectroscopy with light intensity modulation amplitude normalization to make the remote sensing results free from the influence of the echo laser on the signal intensity. By comparing the direct absorption signal and the second harmonic signal of the gas concentration detected by the system, it is verified that the wavelength modulation technique has a significant noise suppression effect and can greatly improve the detection sensitivity and detection distance. Through calibration experiments, the measurement accuracy and lower detection limits of the system are evaluated. The experiments have shown that the lower detection limits of the system can reach 87 ppm·m, 212 ppm·m and 12 ppm·m for methane, ammonia and acetylene, respectively, and the measurement error is less than 10%. We tested the remote detection performance of the system over long distances, and the results showed that the remote detection distance can be up to 40 m. The system provides a multi-component, real-time, synchronous, high-sensitivity, long-distance and stable performance remote sensing solution for the research and application of laser trace gas detection, which can be widely used in gas monitoring and early warning of mine disasters, gas leakage monitoring and early warning of hazardous chemical field stations and transportation pipeline networks.

**Key words:** Spectroscopy; Trace gas detection; Multi-component gas; Tunable diode laser absorption spectroscopy; Wavelength modulation spectroscopy; Gas remote sensing

**OCIS Codes:** 300.6390; 010.1030; 120.3930; 280.4788