

引用格式: SHI Yuechong, LI Yafei, SONG Fang, et al. Hardware Reconfigurable Near Infrared Wavelength Modulated Methane Sensor and Its Application (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(10):1052407

师月崇,李亚飞,宋芳,等. 硬件可重构近红外波长调制甲烷传感器及应用(特邀)[J]. 光子学报, 2023, 52(10):1052407

# 硬件可重构近红外波长调制甲烷传感器及应用 (特邀)

师月崇<sup>1,2</sup>, 李亚飞<sup>1,2</sup>, 宋芳<sup>1,2</sup>, 郑传涛<sup>1,2</sup>, 王一丁<sup>1,2</sup>

(1 吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点实验室, 长春 130012)

(2 吉林省红外气体传感技术工程研究中心, 长春 130012)

**摘要:**为了加快气体吸收光谱分析算法的求解速度、重构算法的硬件逻辑,采用现场可编程门阵列(FPGA)器件,结合波长调制光谱技术,研制了一种硬件可重构波长调制甲烷传感器。根据应用功能需求,可在硬件层面重构逻辑电路,从而更新系统工作模式和探测参数。采用流水线技术,对光谱分析算法进行了硬件加速,光谱分析部分的输入与输出之间的时间延迟仅为 4.05 ms。实验分析了该传感器在连续、间歇两种工作状态下的波形与电流,证明了该系统工作模式的可重构特性,也证实了采用间歇式工作降低激光气体传感器功耗的可行性。采用正弦信号对 FPGA 算法部分的功能进行了测试,结果表明,测得的信号幅值与输入信号幅值的线性度达到了 99.99%。采用中心波长为 2 334 nm 的分布式反馈激光器作为光源、光程为 25 m 的赫里奥特气室作为气体吸收池,开展了甲烷检测实验。传感器的线性度为 99.97%,响应时间约为 4.9 s。艾伦方差结果表明,当积分时间为 0.5 s 时,传感器的检测下限为  $7.8 \times 10^{-6}$ 。开展的甲烷泄露实验证实了该传感器的现场应用能力。设计的 FPGA 算法,通过硬件编程,可实现传感器工作模式与参数的灵活重构,在激光气体传感领域具有较好的片上集成应用前景。

**关键词:**光电检测技术;红外吸收光谱;波长调制光谱;现场可编程门阵列;气体检测

中图分类号:TN21

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235210.1052407

## 0 引言

随着经济社会的发展,日益增长的碳排放所引发的全球性生态问题愈发严重,“碳中和”一词在各项国际会议中出现的频率越来越高,已逐步成为国际社会的共识<sup>[1-3]</sup>。气体浓度监测作为全球碳排放数据采集中的重要一环<sup>[4]</sup>,正面临着新的机遇和挑战。当前气体传感需求正在朝着小型化、低功耗、可联网等方向不断推进。通过缩小体积、降低功耗,并结合无人机等新兴技术,诞生了全新的气体巡检方式<sup>[5-8]</sup>,在偏远地区的燃气管道巡检等方面被广泛应用;进一步通过结合互联网技术,将气体传感系统封装成小型自动化网络传感节点,以实现气体浓度信息的实时自动监测<sup>[9-12]</sup>。

激光光谱分析技术具有检测速度快、精度高、稳定性好、使用寿命长等优势<sup>[13, 14]</sup>。目前,人们报道的激光光谱气体分析系统主要采用 LabVIEW 或者数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)来实现<sup>[15-16]</sup>。2016年,GERVASONI G等<sup>[17]</sup>提出了一种克服分辨率限制的新型数字锁相放大器,相对于先进的锁相放大器,其分辨率提高了一个数量级,系统的工作频率最高能够达到 5 MHz。2019年,PAULINA M等<sup>[18]</sup>研制了

**基金项目:**国家重点研发计划(No. 20213201903),国家自然科学基金(Nos. 61960206004, 62175087),吉林省科技发展计划(No. 20200401059GX),吉林省教育厅科技发展规划项目(No. JJKH20211088KJ),长春市重点研发项目(No. 21ZGN24),吉林省高教科研课题(Nos. JGJX2021D3, JGJX2021D4),吉林大学本科教学改革研究重点项目(No. 2021XZD034)

**第一作者:**师月崇, shiyc20@mails.jlu.edu.cn

**通讯作者:**郑传涛, zhengchuantao@jlu.edu.cn

**收稿日期:**2023-03-09; **录用日期:**2023-08-15

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

一种便携式的高精度相位调节单相锁相仪,它集成了输入和参考信号的自动相位校准模块,工作频率为1 kHz,整个系统由Arduino YUN板驱动,具有很高的灵敏度。2018年,西安电子科技大学和西安邮电大学合作设计了一款辅助频率跟踪系统,弥补了许多商业锁相放大器无法跟踪频率偏差的不足<sup>[19]</sup>。2019年,黄凯等<sup>[20]</sup>研制了一种宽带数字锁相放大器,用于测量微流体器件的阻抗,该锁相放大器工作频率高达65 MHz,采用的全数字锁相环输出频率的相位偏差小于 $0.02^\circ$ ,频率检测精度为ppm( $10^{-6}$ )。LabVIEW分析系统需要采用电脑和数据采集卡,虽然测量精度高、实时性好,但普遍体积较大、成本较高,无法便携式应用。DSP分析系统虽然体积小、功耗低,但由于需要执行DSP指令来实现分析算法,延迟较大,无法实现对气体吸收数据的实时、连续处理。

鉴于上述现状,本文采用现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)和波长调制光谱(Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS)技术,研制了一种硬件可重构的波长调制甲烷( $\text{CH}_4$ )传感器。相比基于软件算法的DSP甲烷传感器,该硬件可重构波长调制甲烷传感器对波长调制气体吸收光谱分析算法进行硬件加速,实现扫描信号与谐波信号幅值的准同步输出,提高系统检测速度;结合直接数字频率合成(Direct Digital Frequency Synthesis, DDS)技术,由FPGA控制生成WMS所需的正弦波及同频方波参考信号、三角波及同频矩形波使能信号,简化外围电路,降低系统功耗;驱动输出和数据处理能够同步进行,为采用间歇或脉冲式工作来降低系统功耗提供参考。

## 1 硬件可重构波长调制甲烷传感器的设计

### 1.1 谱线选择与分析

选择 $\text{CH}_4$ 吸收谱线时,主要遵循以下原则:较强的吸收线强,避免其它气体的干扰,规则的洛伦兹(Lorentz)线型。通过对 $\text{CH}_4$ 的吸收谱线分析,选定位于 $4284.5\text{ cm}^{-1}$ ( $2.334\text{ }\mu\text{m}$ )处的 $\text{CH}_4$ 吸收线。图1为根据HITRAN 2012数据库得出的在压强为101 325 Pa、光程为1 m、温度为300 K的条件下,浓度为100 ppmv( $1\text{ ppmv} = 10^{-6}$ )的甲烷吸收谱线。图中还给出了当激光器温度为 $36\text{ }^\circ\text{C}$ 时,激光器的输出波数与驱动电流之间的关系曲线。可以看出,采用中心波长为 $2.334\text{ }\mu\text{m}$ 的激光器进行波长扫描,可以很好地覆盖此处 $\text{CH}_4$ 的吸收峰。

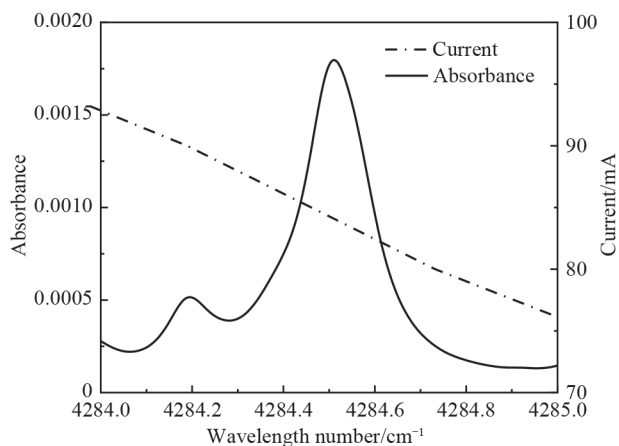


图1 基于HITRAN的 $\text{CH}_4$ 吸收线,以及当激光器温度为 $36\text{ }^\circ\text{C}$ 时,激光器电流与发光波数的关系曲线

Fig. 1 HITRAN-based  $\text{CH}_4$  absorption line and the curve of laser current versus emission wavelength number at  $36\text{ }^\circ\text{C}$

### 1.2 可重构波长调制甲烷传感器结构

基于FPGA的硬件可重构波长调制甲烷传感器的结构如图2所示,由光学部分和电学部分组成。针对光学部分,采用德国Nanoplus公司的中心发射波长为 $2.334\text{ }\mu\text{m}$ 的分布式反馈激光器(Distributed Feedback Laser, DFB)作为光源,针对 $2.334\text{ }\mu\text{m}$ 处的 $\text{CH}_4$ 吸收线实施检测;激光束被准直并耦合进入光程为25 m的赫里奥特气室中。激光从气室出射后,被聚焦到InGaAs光电探测器上(PDA10D-EC, Thorlabs),经光电转换后送入传感器电学部分。电学部分由波长调制光谱分析电路和波长调制驱动生成电路、激光器温控驱动模块(LDTC0520,波威科技)组成。驱动信号产生电路主要采用DDS技术,在FPGA中存储波形数据,通过寻

址输出的方式控制外接数模转换器(Digital-to-Analog Converter, DAC, DAC900, TI)生成正弦波和三角波,二者相加生成驱动信号(AD8620,ADI),将其提供给驱动模块控制激光器进行波长扫描;波长调制光谱分析电路通过模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC, AD9220, ADI)将量化后的无符号二进制气体吸收数据送入FPGA,在FPGA中通过流水线式的正交锁相算法处理,计算得到谐波信号幅值,并将其通过外部DAC(DAC904, TI)同步输出显示,同时在使能信号为低电平期间,通过串口输出谐波信号幅值。

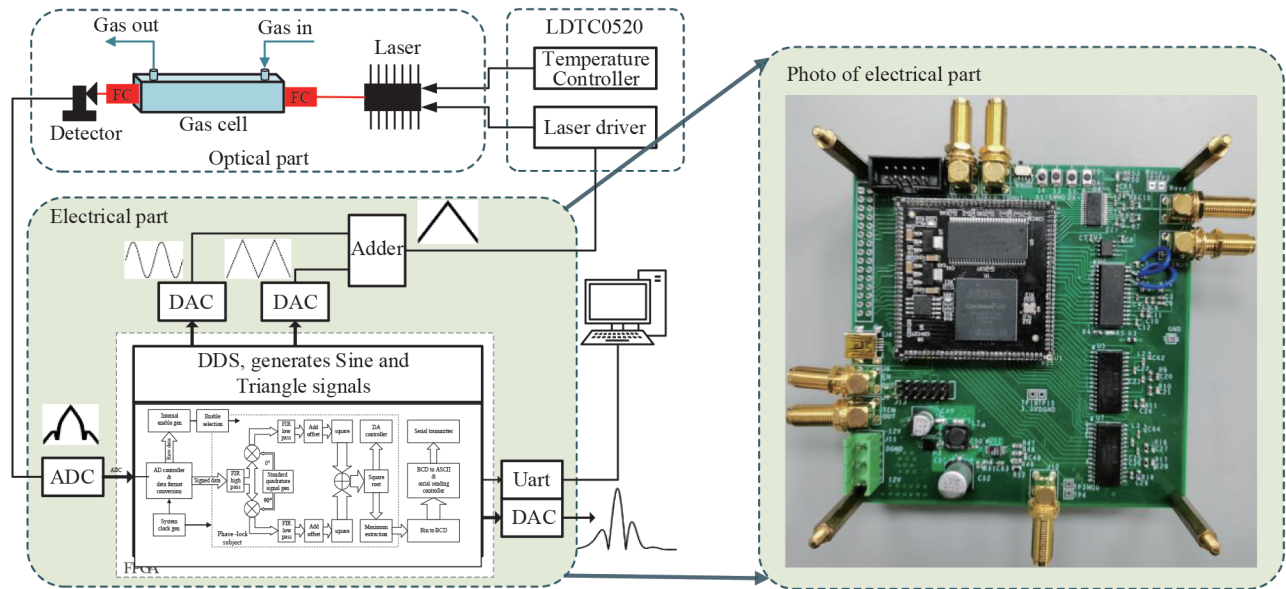


图2 硬件可重构波长调制甲烷传感器的结构框图以及基于FPGA的电学部分的实物照片

Fig. 2 Structure block diagram of hardware reconfigurable wavelength modulated CH<sub>4</sub> sensor, and a photo of the electrical part based on FPGA

### 1.3 FPGA 内部逻辑构成及可重构参数分析

可重构波长调制甲烷传感器的FPGA内部逻辑结构如图3所示,包括由正交锁相放大单元<sup>[21-24]</sup>、ADC控制单元、DAC控制单元、使能信号生成单元、时钟生成单元、极值提取单元、数据转换单元、串口单元等构成的波长调制光谱分析模块以及波长调制驱动生成模块。波长调制光谱分析模块整体采用流水线设计,数据依据系统采样时钟不断向后流动,当流水线寄存器充满后,数据的输入输出同时钟下准同步进行。系统整体流水线延迟时间( $T_D$ )由锁相放大单元内部的滤波器阶数( $N_{HP}$ 、 $N_{LP}$ )和为了匹配时序插入的寄存器数量( $P$ )共同决定,令时钟周期为 $T$ ,则 $T_D$ 可表示为

$$T_D = (N_{HP} + N_{LP} + P) \times T \quad (1)$$

在本系统中,高通滤波器阶数 $N_{HP}$ 为35,低通滤波器阶数 $N_{LP}$ 为41,插入寄存器数量 $P$ 为5,系统时钟匹配采样时钟,周期 $T$ 为50  $\mu$ s,据此代入式(1),计算得到的流水线延迟时间为4.05 ms。

在对波长调制光谱分析模块进行设计时,需要格外注意对正交锁相放大单元中的有限长单位冲激响应(Finite Impulse Response, FIR)低通滤波器的优化设计,使其截止频率尽量低,以使得到的谐波波形更为平滑。一般而言,当系统采样率确定后,FIR低通滤波器阶数越多,即积分时间越长,滤波器截止频率越低,但构建此滤波器需要消耗的资源将增多,流水线延迟也将增大。为了平衡资源与性能,采用高低通协作的方式,通过对输入数据的低频预抑制,来降低后端低通滤波器的设计压力,整体化考虑来优化系统性能。

为了增强波长调制光谱分析模块工作的独立性,针对气体检测应用,在FPGA内构建了自适应使能信号生成单元,并可通过对FPGA使能选择端口的电压进行配置,来实现系统于内部使能和外部使能两种工作状态间的切换。对内使能生成原理表述为:当输入气体吸收信号噪声较小时,可启动内部使能模式,系统会在上电/复位后,自动提取输入气体吸收数据的最大值和最小值,继而对其大小进行放缩并启动对使能信号寄存器的置位、清零;为避免扫描信号中所叠加正弦波的影响,将使能信号寄存器输出结果进行消抖处理,以得到自适应使能信号。使能信号具体工作逻辑为:当此信号为高电平时,波长调制光谱分析模块和驱



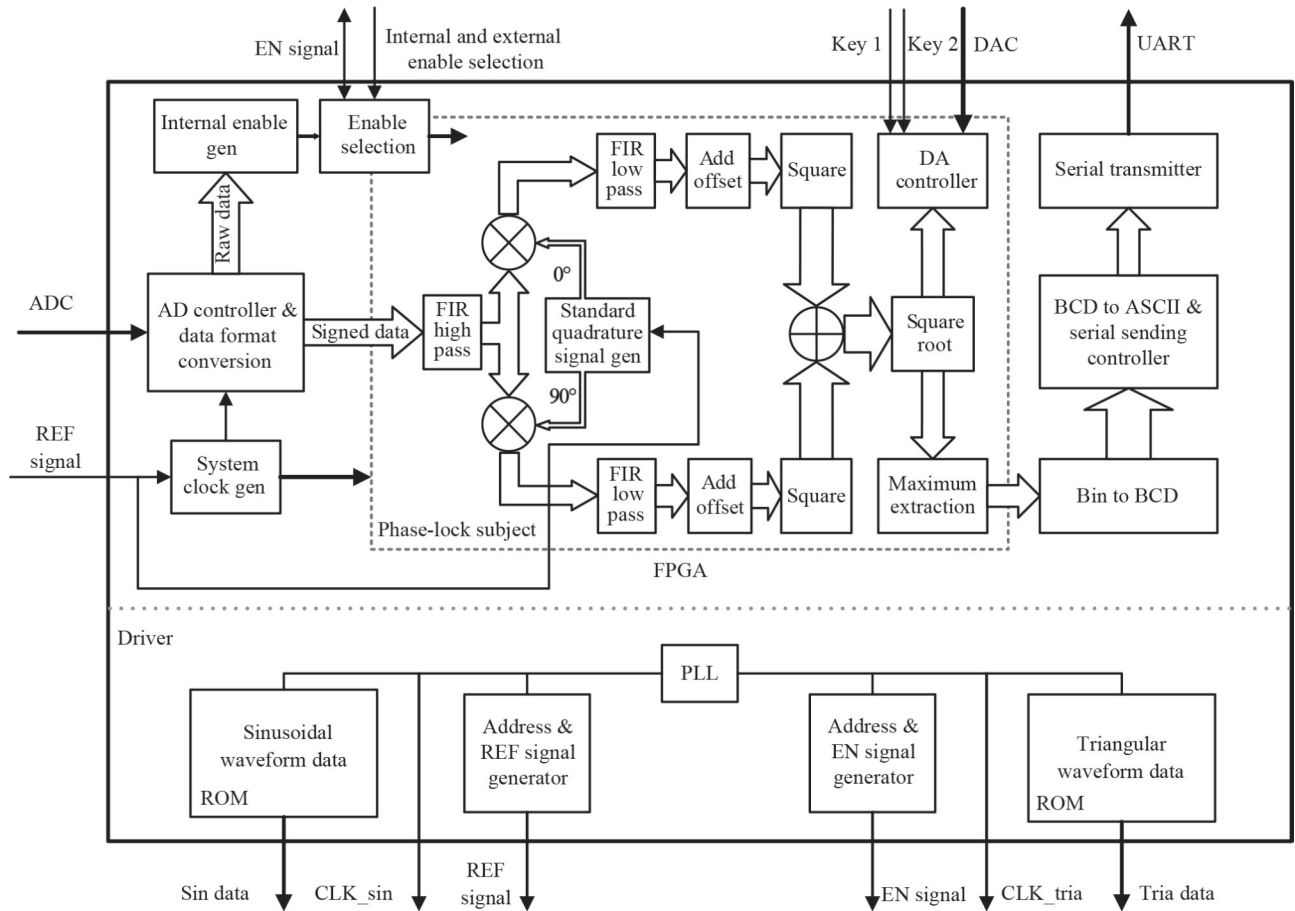


图3 传感器的FPGA内部逻辑结构

Fig. 3 FPGA internal logic structure diagram of the sensor

动生成模块启动工作,系统开始输出气体扫描信号,并在短暂延迟后,输出与输入信号同步的目标谐波波形;当此信号转为低电平后,波长调制驱动生成模块停止工作,波长调制光谱分析模块启动对谐波幅度最大值的格式转换并将其串口输出,随后等待使能信号的再次变高。

为增强波长调制光谱分析模块的可重构能力,同时避免出现频率偏移的问题,系统锁相工作时钟通过将输入得到的与高频调制信号同频的方波参考信号在系统高频时钟下计数倍频而生成;因此,修改系统采样率只需重构时钟模块即可完成。在此基础上,为了实现可变频率锁相分析,可对系统内部基于DDS技术的标准正交信号模块进行硬件重构:通过修改起始地址、触发地址等,即可实现任意频率标准正交信号的生成;再对锁相放大单元中的FIR滤波器进行参数重构,更新积分时间,以匹配系统采样率,即可实现对目标锁相频率的硬件重构修改。此外,传感器波长调制驱动生成模块输出的正弦波、三角波参数亦可重构:基于DAC900的165 MSPS( $10^6$  samples/s)转换速率,通过修改片上存储器中的数据点数、修改DAC工作时钟,即可实现对相关信号频率的重构调节;通过修改地址自加器的起始值,即可实现对输出波形初始相位的重构调节。

另外,基于本设计输入输出的准同步特性,结合波长调制驱动生成模块,可以从系统层面对其工作模式进行硬件重构,以实现间歇式工作、扫描信号对齐、气体吸收定点分析等功能。其中,间歇式工作的具体实现方法如下:构建了片上二选一模拟开关,采用工作状态寄存器,对使能信号进行选通。当系统间歇式工作时,于间歇期将模拟开关输出置零,以关停波长调制光谱分析模块和波长调制驱动生成模块;当连续工作时,选通使能信号使系统依托使能信号正常工作。所设计近红外波长调制甲烷传感器的可重构功能参数具体如表1所示。

表 1 系统可重构功能及参数  
Table 1 System reconfigurable functions and parameters

Reconfigurable objectives	Reconstruct content	Reconstruction parameters
Input sampling rate	Frequency	0~10 MHz
Phase-locked target frequency	Frequency	0~5 MHz
Wave filter	Cut-off frequency	Flexible reconfiguration
Sine wave generation	frequency and phase	DAC out max 165 MSPS
Triangular wave generation	frequency and phase	DAC out max 165 MSPS
Enable signal	Internal and external enable switching	External enable or adaptive internal enable generation
Working mode	Enable signal strobe self-configuration	Continuous, intermittent or triggered

### 1.4 工作模式可重构的实验验证

所研制的传感器系统的工作模式具有可重构特性,面对不同的应用场景,系统可以在连续和间歇两种工作模式之间切换。在需要进行实时监测的场景中,系统工作在连续模式;在需要进行长时间监测时,系统工作在间歇模式,可以有效降低系统功耗。间歇模式下的工作/间歇占比同样是可重构的。根据实际场景需求,可以对工作模式和/或工作/间歇占比进行重构,这与实时传感并不矛盾。构建连续式、间歇式工作的波长调制CH<sub>4</sub>传感器,其效果如图4所示。在连续工作方式下,频率为5 Hz的三角波上叠加5 kHz的正弦波直接作用于激光器的电流驱动,使传感器持续检测。在间歇式工作下。通过对激光器驱动信号的使能控制,实现1:10的工作/间歇占比,即系统每两秒进行一次完整的三角波扫描过程,间歇式测量CH<sub>4</sub>浓度。从图4可以看出,无论连续工作还是间歇工作,传感器驱动输出与数据分析同步进行,系统每输出一个气体扫描信

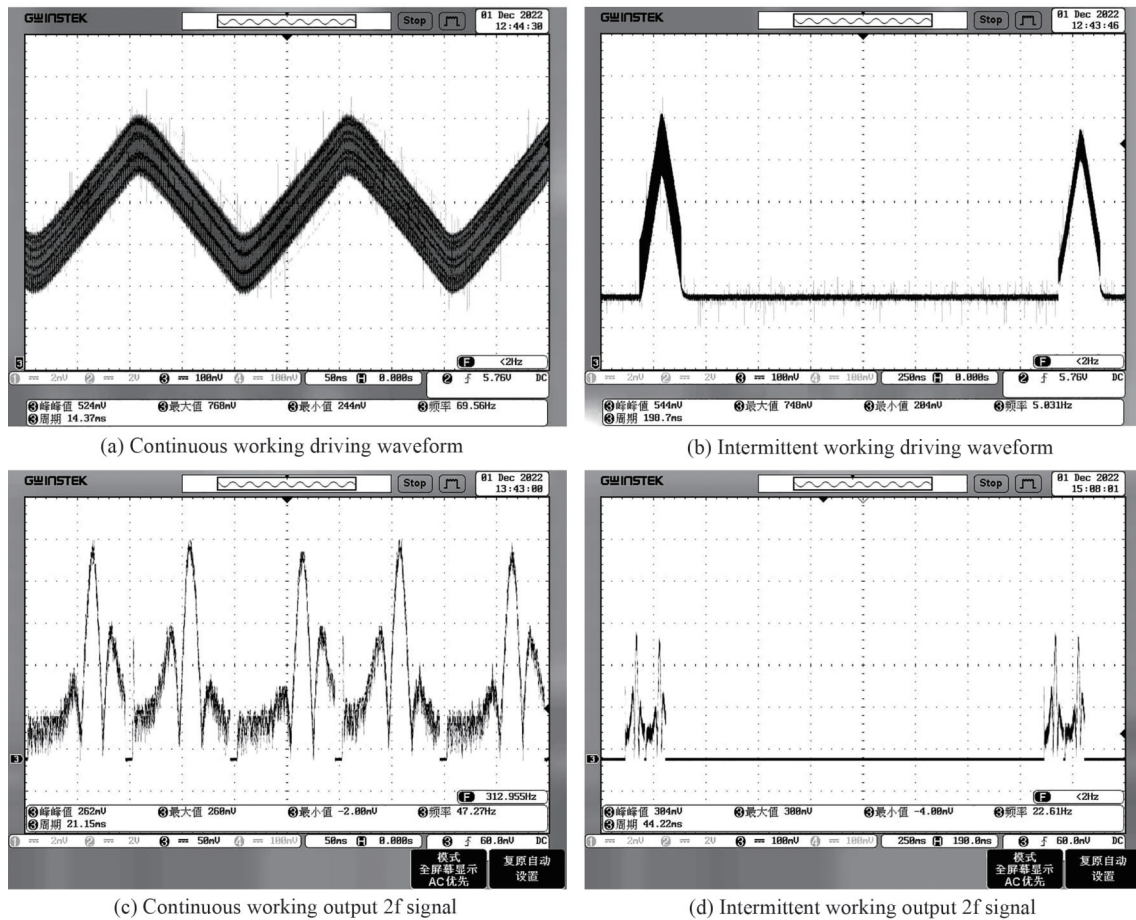


图 4 连续、间歇两种工作模式的测试波形

Fig. 4 Test waveform under continuous and intermittent working modes

号,均可在其下方同步得到一个二次谐波信号,二者之间的时间偏移极低。经测量,间歇式工作时,系统等待期间与系统复位电流近似相等,扫描工作时电流与连续工作电流类似,二者大小相差 36.1 mA;考虑到等待期间对激光器工作电流的关断,结合对传感器硬件静态功耗的进一步优化,该设计为构建低功耗激光气体传感系统提供了可行的解决方案。

## 2 仿真实验

### 2.1 逻辑功能仿真

采用的 FPGA 器件型号为 EP4CE22F17C8,通过 Quartus II 软件编写了传感器的逻辑代码。基于 Modelsim 开展了仿真实验,以验证系统的可行性和可靠性。基于 HITRAN2012 数据库,利用 2.334  $\mu\text{m}$  处  $\text{CH}_4$  吸收线,采用 Matlab 软件和插值法生成了  $\text{CH}_4$  吸收数据,并通过 Modelsim 读入传感器光谱分析模块,模拟软件运行结果,如图 5 所示。从图 5 可以看出,软件功能正常,波长调制光谱分析模块以及波长调制驱动生成模块的功能均符合预期要求。针对输入的气体吸收数据,根据使能信号,在每一个气体吸收峰处均可以同步提取到谐波信号;系统数据延迟时间很小,在 0.2 s 的扫描周期中,数据延迟时间仅为 4.05 ms,同时,如果系统采取连续工作方式,该延迟带来的影响将得到进一步降低。

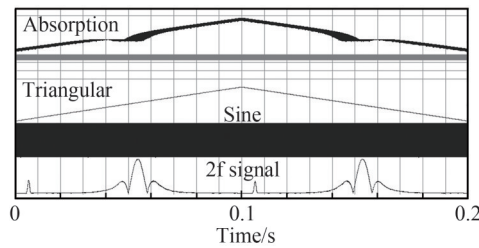


图 5 根据 Modelsim 软件,仿真得到气体吸收波形、激光驱动信号波形和二次谐波波形

Fig. 5 According to Modelsim software, simulated gas absorption waveform, laser driving signal waveforms and second harmonic waveform

### 2.2 系统线性度评估

正交锁相放大器利用三角函数的正交性能提取出待测信号中特定频率信号的幅值。假设待测信号  $S(t)$  为

$$S(t) = a \sin(\omega_1 t + \theta_1) + n(t) \quad (2)$$

式中,  $a$  为信号幅值,  $\omega_1$  为频率,  $\theta_1$  为相位,  $n(t)$  为系统噪声。参考信号与待测信号同频,可表示为

$$R(t) = b \sin(\omega_1 t + \theta_2) \quad (3)$$

式中,  $b$  为信号幅值,  $\theta_2$  为相位。与参考信号  $R(t)$  正交的信号  $R_0(t)$  可表示为

$$R_0(t) = b \cos(\omega_1 t + \theta_2) \quad (4)$$

经过乘法器后,得到

$$S_1(t) = S(t) \times R(t) = \frac{ab}{2} [\cos(\theta_1 - \theta_2) - \cos(2\omega_1 t + \theta_1 + \theta_2)] + b \sin(\omega_1 t + \theta_2) n(t) \quad (5)$$

$$S_2(t) = S(t) \times R_0(t) = \frac{ab}{2} [\sin(\theta_1 - \theta_2) + \sin(2\omega_1 t + \theta_1 + \theta_2)] + b \cos(\omega_1 t + \theta_2) n(t) \quad (6)$$

经过低通滤波器高频成分被滤除,可得

$$S_1(t) = \frac{ab}{2} \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (7)$$

$$S_2(t) = \frac{ab}{2} \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (8)$$

正交锁相放大器最终输出的信号可表示为

$$H(t) = \sqrt{S_1^2 + S_2^2} = \frac{ab}{2} \quad (9)$$

此时,正交锁相放大器的输出信号与待测信号的幅值成正比,可以实现检测待测信号的目的。

为验证传感器的谐波信号提取性能,采用信号发生器(AFG-2225,GWinstek)以双通道频率耦合的方式生成了同频的待测正弦信号和方波参考信号,通过提取正弦信号的幅值,对本系统的实际工作性能进行了验证,结果如图6所示,其中,图6(a)为输入不同幅值的正弦信号时,波长调制光谱分析模块的输出。可以看出,输出结果成明显的阶梯状,表明系统对不同幅值信号具有良好的区分度。

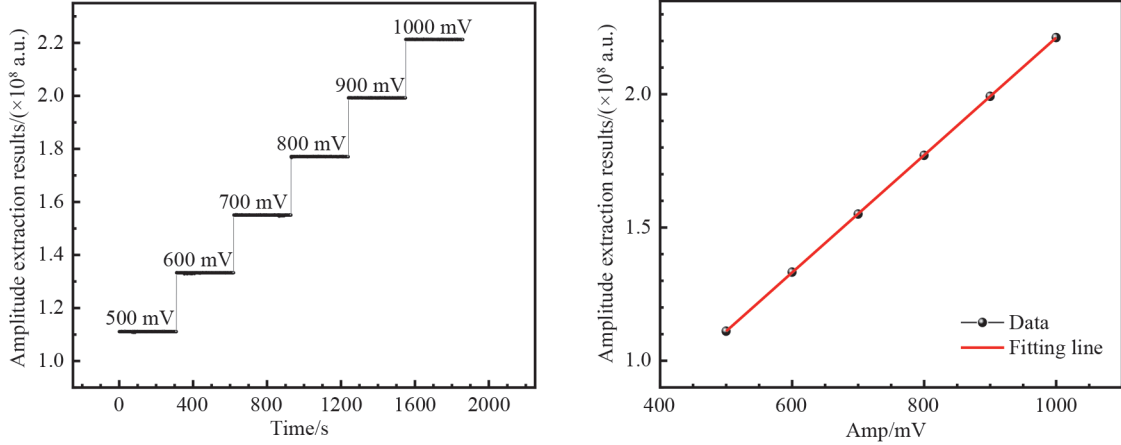


图6 正弦信号验证实验及结果分析

Fig. 6 Sine signal verification experiment and result analysis

将图6(a)中不同幅值下提取的正弦波信号幅值做平均化处理,并对输入正弦幅值( $A_{mp}$ )和提取幅值( $E_{Amp}$ )进行线性拟合,拟合后的关系式为

$$E_{Amp} = 2.20 \times 10^5 \times A_{mp} + 9.69 \times 10^5 \quad (10)$$

拟合结果如图6(b)所示,拟合优度为99.99%,表明传感器具有良好的目标频率提取线性度。

将实验结果带入式(2),对系统幅度采集稳定性进行分析,分析结果如图7所示。从分析结果可以看出,系统采集到的正弦幅度波动在 $\pm 0.5$  mV左右,传感器稳定性良好。

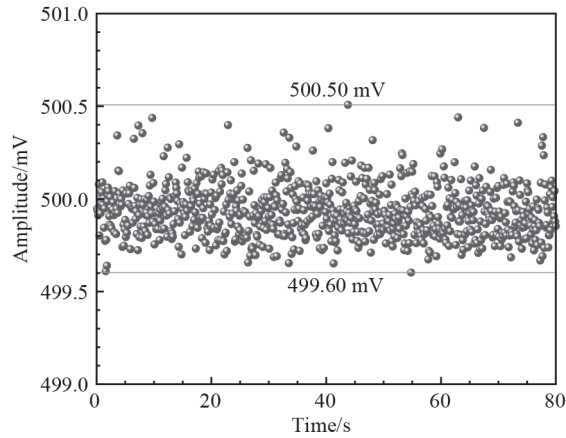


图7 正弦信号幅度采集稳定性分析

Fig. 7 Stability analysis of sine signal amplitude acquisition

### 3 CH<sub>4</sub>检测实验

#### 3.1 CH<sub>4</sub>标定实验

利用1 000 ppmv的CH<sub>4</sub>和纯氮气(N<sub>2</sub>),使用EnviroNics公司的Series4000配气系统,采用动态配气的方法依次配制了0 ppmv、250 ppmv、500 ppmv、1 000 ppmv的CH<sub>4</sub>气体样品通入气室中开展气体检测实验,各个不同浓度的气体连续测试200 s,实验结果如图8所示。从图8(a)可以看出,所设计甲烷传感器对不同的气体浓度具有良好的区分能力。对每种浓度下传感器的输出结果求取平均值,并线性拟合气体浓度(C)和



传感器输出二次谐波信号幅值( $A_{sh}$ )之间的关系,拟合方程为

$$A_{sh} = 0.039 \times C + 0.383 \quad (11)$$

拟合曲线如图8(b)所示,拟合优度为99.97%,该结果表明甲烷传感器输出的二次谐波幅值结果与 $\text{CH}_4$ 气体浓度之间具有良好的线性关系。

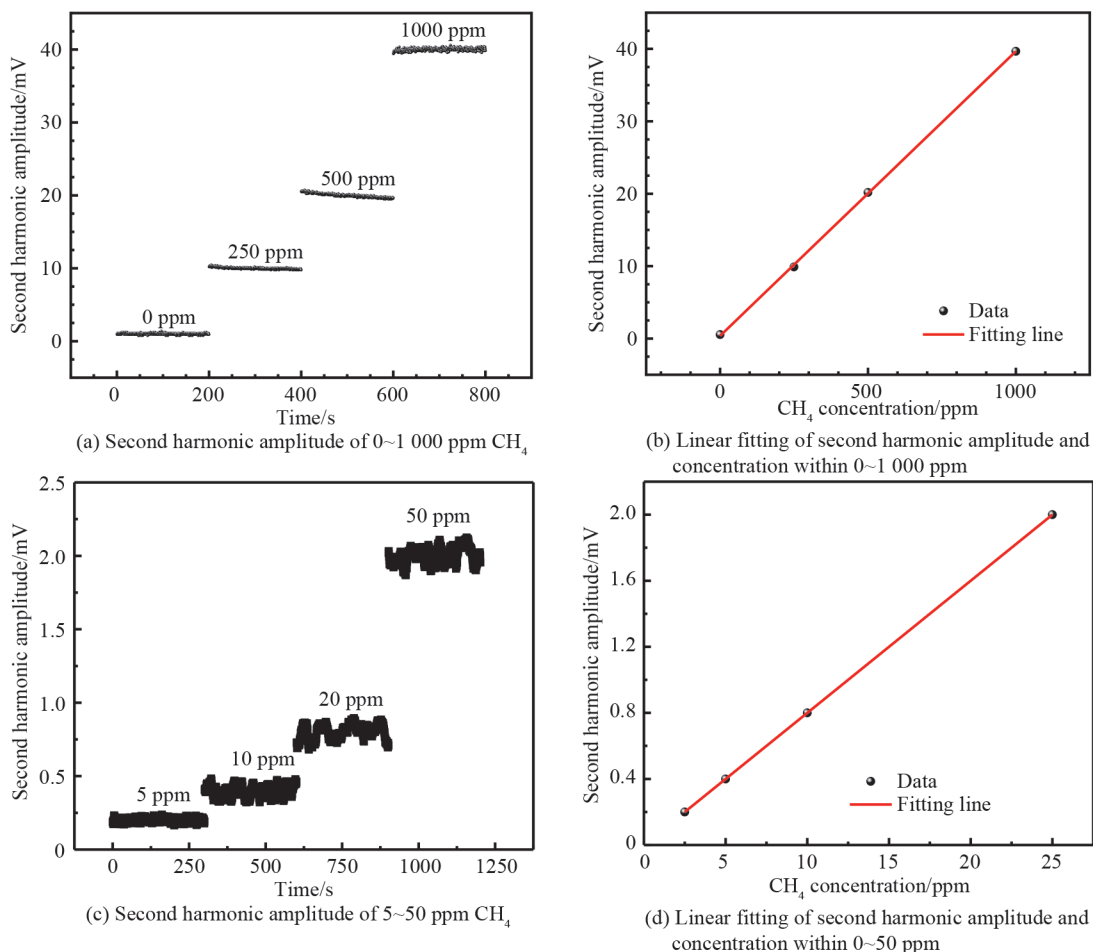


图8  $\text{CH}_4$ 检测实验与结果分析

Fig. 8  $\text{CH}_4$  detection experiment and result analysis

为了测量系统的灵敏度,配制了5 ppmv、10 ppmv、20 ppmv、50 ppmv的 $\text{CH}_4$ 气体样品通入气室中,提取其二次谐波信号幅值。图8(c)展示了不同浓度下测得的二次谐波信号幅值,可以看出,不同浓度对应的二次谐波信号幅值清晰可辨,容易区分,因此系统的灵敏度至少可达5 ppmv。图8(d)为不同 $\text{CH}_4$ 浓度及其对应的二次谐波信号幅值之间的拟合曲线。

### 3.2 响应时间测试

激光气体传感系统的响应时间与气室结构、气体流速、气体切换速度和数据处理速度等相关,数据处理速度很快,仅占响应时间的很小一部分,在气体流速确定的情况下,气体切换速度占主导因素。为了评估本传感器的响应速度,采用纯 $\text{N}_2$ 和1000 ppmv的 $\text{CH}_4$ ,开展了响应时间测试实验,气体流速设置为1 L/min。实验结果如图9所示。根据

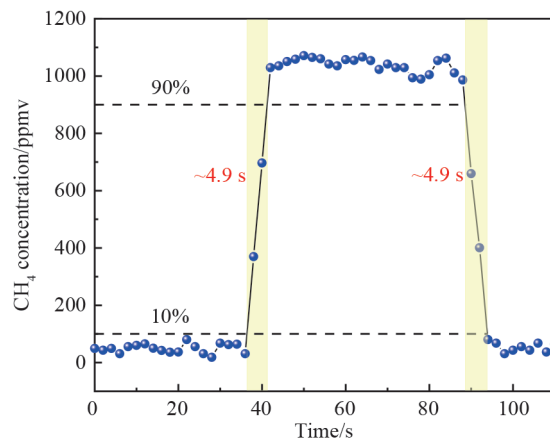


图9 传感器的动态响应时间测试

Fig. 9 Dynamic response time test of the sensor



测试结果可知,当气体从 $N_2$ 切换到 $CH_4$ 后,传感系统输出结果从100 ppmv上升到900 ppmv所需要的时间约为4.9 s。当数据稳定一段时间后,将气体从 $CH_4$ 切换回 $N_2$ ,传感系统输出结果从900 ppmv下降到100 ppmv所需的时间约为4.9 s。

### 3.3 稳定性及检测下限

激光器的波长扫描速度不仅关系到数据采集的速率,而且影响测量精度,较慢的扫描速度可以提高波长扫描的精度,更准确地确定气体的光谱特性,从而获得更准确的气体浓度信息。在5 Hz的扫描速度下,1 s可以采集10个数据点,完全能够满足实时监测的需要,为了兼顾测量速度与准确度,选择5 Hz作为扫描频率。为测量甲烷传感器工作的稳定性,向气室中持续通入1 000 ppmv的 $CH_4$ ,测量结果如图10(a)所示,传感器检测结果波动范围为987.39~1 010.72 ppmv,工作稳定性良好。为分析甲烷传感器的检测下限,向气室中持续冲入氮气( $N_2$ ),进行长时间测量分析。将传感器输出结果转换为气体浓度,计算得到的Allan方差结果如图10(b)所示,当积分时间为0.5 s时,检测下限为7.8 ppmv。通过延长积分时间,系统稳定性会进一步增强,检测下限不断降低。

为了对比激光器在5 Hz和100 Hz两种不同扫描频率下系统的稳定性和检测下限,将激光器的扫描频率设置为100 Hz,对1 000 ppmv  $CH_4$ 气体样品进行长时间稳定性分析。如图10(c)和(d)所示,传感器检测结果波动范围为913.6~1 000 ppmv,对系统的检测限进行进一步分析,当积分时间为0.5 s时,检测下限为15.8 ppmv。与5 Hz扫描频率下测得的浓度波动范围和检测下限相比,在100 Hz扫描频率下测得的误差更大。

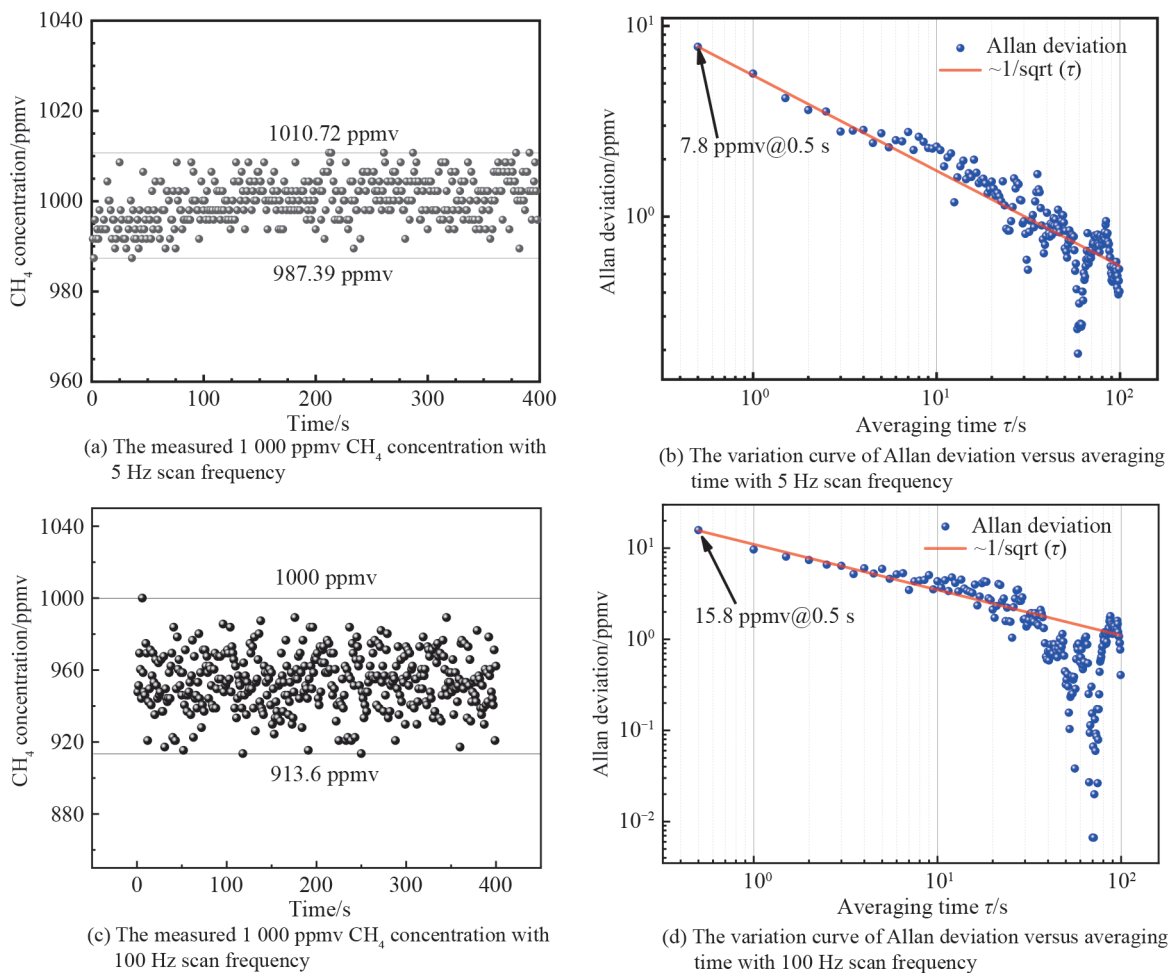


图10 传感器系统稳定性分析  
Fig. 10 Stability analysis of the sensor system

### 3.4 $CH_4$ 泄漏实验

为了评估所设计的传感系统的实际性能,验证系统在间歇工作模式下的实际应用效果。在外部环境温

度为 15 °C, 风速为 1 m/s 的情况下, 采用 1 000 ppmv 的标准 CH<sub>4</sub> 钢瓶气体在室外开展了气体泄露实验。CH<sub>4</sub> 气瓶的气体泄露速度设置为 1 L/min, 传感器系统放置在距离钢瓶 1 m 远处的下风口位置。在第 60 s 和 180 s 处分两次打开 CH<sub>4</sub> 气体钢瓶的气体阀门, 第一次持续打开 60 s 左右, 第二次持续打开 15 s 左右, 测试结果如图 11 所示, 可以看出, 在间歇工作模式下系统仍能有效响应气体浓度变化。受现场风力影响, 第一次实验时, 气体泄漏 16 s 左右便被传感器探测到, 所测浓度值存在较大波动; 第二次实验时, 环境条件相对较好, 30 s 左右传感器感知到了周围环境中 CH<sub>4</sub> 浓度的上升, 与第一次实验类似, 浓度变化波形上升沿较陡, 响应速度很快; 两次测量传感器均有效检测到了气体泄漏时, 现场 CH<sub>4</sub> 浓度的变化, 探测峰值为 307.98 ppmv。两次气体泄露均被检测到, 证明了泄露实验的可重复性, 表明本传感器具有良好的 CH<sub>4</sub> 泄露探测潜力。

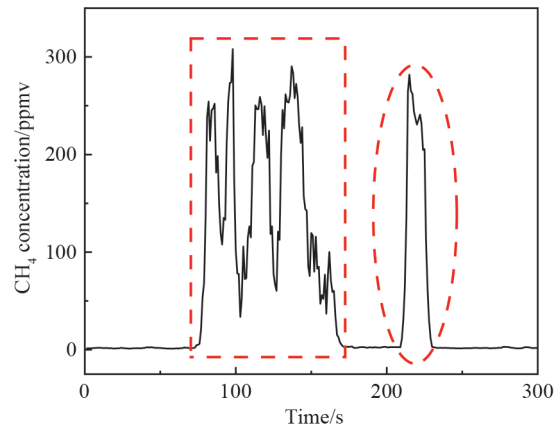


图 11 CH<sub>4</sub> 泄露实验现场检测结果

Fig. 11 Field detection results of CH<sub>4</sub> leakage test

## 4 结论

采用 FPGA 的硬件算法加速, 结合 WMS 技术, 研制了一种硬件可重构波长调制甲烷传感器。基于模块化程序设计, 传感器工作模式、探测参数可灵活修改; 实测了传感器在连续工作和间歇工作两种状态下的波形、电流情况, 验证了系统可重构设计的有效性, 并证实了间歇式工作以降低激光气体传感器功耗的可行性。开展了 CH<sub>4</sub> 气体吸收实验, 所设计甲烷传感器气体探测线性度为 99.97%, 响应时间约为 4.9 s。Allan 方差结果表明, 当积分时间为 0.5 s 时, 传感器的检测下限为 7.8 ppmv。开展了 CH<sub>4</sub> 泄露实验, 通过对自然环境下 CH<sub>4</sub> 泄露时, 环境中 CH<sub>4</sub> 浓度曲线的分析, 证明了本传感器对 CH<sub>4</sub> 泄露的探测能力。对比现有的基于软件架构的气体传感系统, 本传感器极低的数据延迟为间歇式工作奠定了基础, 为实现节点式低功耗气体检测应用提供了可能。同时, 本传感器精度高、响应速度快, 并可基于实际需求进行硬件重构, 使用起来灵活方便, 且相关技术具有较好的片上集成应用前景。研制的 FPGA 电学系统亦可用于本科生实践教学, 从而促进教学与科研的深度融合与发展。

### 参考文献

- [1] ZOU Caineng, HE Dongbo, JIA Chengye, et al. Connotation and pathway of world energy transition and its significance for carbon neutral[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 233-247.  
邹才能, 何东博, 贾成业, 等. 世界能源转型内涵、路径及其对碳中和的意义[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 233-247.
- [2] WEI Y M, CHEN K Y, KANG J N, et al. Policy and management of carbon peaking and carbon neutrality: a literature review[J]. Engineering, 2022, 14:52-63.
- [3] CAO Z W, ZHOU X, HU H, et al. Toward a systematic survey for carbon neutral data centers[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2022, 24(2): 895-936.
- [4] OLEG L, VASILE P, MATTHIAS M, et al. Low powered, tunable and ultra-light aerographite sensor for climate relevant gas monitoring [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2016, 4(42): 16723-16730.
- [5] GOLSTON L M, TAO L, BROS Y C, et al. Lightweight mid-infrared methane sensor for unmanned aerial systems[J]. Applied Physics B, 2017, 123(6): 170.
- [6] RAZAVIPOUR S G, GUPTA J A, SABISTON G, et al. Pressure-dependent sensitivity of a single-pass methane detection system using a continuous-wave distributed feedback laser at 3 270 nm[J]. Applied Optics, 2019, 58(25): 6906-6911.
- [7] THOMAS W, MARIUS S, JUAN M G, et al. Gas source localization based on binary sensing with a UAV [C]. 2022

- IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN), New York: IEEE, 21781059.
- [8] TYLER K, FELIPE G, KYE M. A UAV system for autonomous target detection and gas sensing [C]. 2017 IEEE Aerospace Conference, New York: IEEE, 16946575.
- [9] WANG Jianing, NIU Xintao, XU Ziming, et al. Monitoring system for CO<sub>2</sub> concentration in greenhouse based on wireless sensor network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 280-285, 367.  
王嘉宁, 牛新涛, 徐子明, 等. 基于无线传感器网络的温室 CO<sub>2</sub> 浓度监控系统[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 280-285, 367.
- [10] SUN Zhihong. Research on toxic gas detection algorithm with wireless sensor networks based on proximity graph[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2017.  
孙志宏. 基于邻近图的无线传感器网络有毒气体检测算法的研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.
- [11] PEREZ A O, BIERER B, SCHOLZ L, et al. A wireless gas sensor network to monitor indoor environmental quality in schools [J]. Sensors, 2018, 18(12): 13.
- [12] FENG L, WANG J, CHEN Y, et al. Detection and early warning of toxic gases based on semiconductor wireless sensors [J]. Journal of Sensors, 2021, 2021: 6988676.
- [13] WANG Z Z, KAMIMOTO T, DEGUCHI Y, et al. Two dimensional temperature measurement characteristics in pulverized coal combustion field by computed tomography-tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 171: 115066.
- [14] QI Haiying, ZHENG Chuantao. A methane detection device using near-infrared long-path laser absorption spectroscopy [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2020, 31(1): 21-26.  
齐海英, 郑传涛. 近红外长光程激光调制吸收光谱甲烷检测仪[J]. 光电子·激光, 2020, 31(1): 21-26.
- [15] CHANG J Q, HE Q X, LI J K, et al. Oxygen detection system based on TDLAS-WMS and a compact multipass gas cell [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2022: 1-5.
- [16] SONG Fang. Research of mid-infrared laser methane sensing technique[D]. Changchun: Jilin University, 2020.  
宋芳. 中红外激光甲烷传感技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [17] GERVASONI G, CARMINATI M, FERRARIG. A general purpose lock-in amplifier enabling sub-ppm resolution[J]. Procedia Engineering, 2016, 168:1651-1654.
- [18] PAULINA M, BELEN C, MARIA T S P, et al. Low cost autonomous lock-in amplifier for resistance/capacitance sensor measurements[J]. Electronics, 2019, 8(12):18-27.
- [19] XIE K, CHEN L H, HUANG A F, et al. An auxiliary frequency tracking system for general purpose lock-in amplifiers [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(4):45-57.
- [20] HUANG K, GENG Y Y, ZHANG X B, et al. A wide-band digital lock-in amplifier and its application in microfluidic impedance measurement[J]. Sensors, 2019, 19(16):3519-3524.
- [21] CHEN Wenwen. Development of FPGA-based digital quadrature lock-in amplifier and application of gas detection[D]. Changchun: Jilin University, 2021.  
陈稳稳. 基于FPGA的数字正交锁相放大器研制及气体检测应用[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [22] YANG Junyi. Study of lock-in amplifiers based on FPGA [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.  
杨俊义. 基于FPGA的数字锁相放大器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [23] ZHAO Xing. Design of the lock-in amplifier based on fpga and its application in multi-component gases detection[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2015.  
赵星. 基于FPGA的锁相放大器在多组分气体检测中的应用研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015.
- [24] PAULINA M, BELEN C, MARÍA T S P, et al. Low cost autonomous lock-in amplifier for resistance/capacitance sensor measurements[J]. Electronics, 2019, 8(12): 1413.

## Hardware Reconfigurable Near Infrared Wavelength Modulated Methane Sensor and Its Application (Invited)

SHI Yuechong<sup>1,2</sup>, LI Yafei<sup>1,2</sup>, SONG Fang<sup>1,2</sup>, ZHENG Chuantao<sup>1,2</sup>, WANG Yiding<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

(2 Jilin Provincial Engineering Research Center of Infrared Gas Sensing Technique, Changchun 130012, China)

**Abstract:** At present, the demand for gas sensors is moving towards miniaturization, low power consumption and networking. Among them, laser absorption spectroscopy has wide application prospects

in related fields with advantages of fast detection speed, high accuracy, good stability, and long service life. However, the commonly used laser gas sensor system is generally large in size, high in power consumption and high in cost, which is difficult to be widely used as a gas sensor node. Therefore, it is urgent to develop a new spectroscopy gas sensing system with small volume, low power consumption and low cost to promote the application of laser gas sensing technology in “carbon neutralization”.

Based on the above social needs, we developed a hardware reconfigurable Wavelength Modulation Spectroscopy (WMS) methane sensor. Based on the characteristics of Field Programmable Gate Array (FPGA) hardware algorithm acceleration, the hardware-based wavelength modulation gas absorption spectroscopy analysis algorithm, realizes quasi-synchronous output of scan signal and harmonic signal amplitude as well as on-chip integration of WMS with a delay time of only 4.05 ms. The on-chip logic circuit is mainly divided into WMS analysis module and WMS drive signal generation module. Based on Direct Digital Synthesis (DDS) technology, the WMS drive signal generation module is used to generate sine wave and triangular wave signals required by WMS, and both signal frequency and phase can be tuned in a wide range, which can flexibly control the sensor operation according to an enabling signal. The core of WMS analysis module is an orthogonal phase-locked amplifier. This work focuses on enhancing the hardware reconfigurability to enhance the flexibility of the sensor system. Only when the enabling signal is in high level, the WMS analysis module and the drive signal generation module start to work, which lays the foundation for intermittent work, scanning signal alignment, and gas absorption fixed point analysis. The feasibility of the intermittent work is verified by the actual measurement. The system has a unified sampling clock, and an on-chip clock generation unit based on external reference signals is constructed. On the basis of avoiding the frequency offset problem, the flexible reconstruction of the system sampling clock is realized. A standard orthogonal signal generation module based on DDS technology is established to realize the generation of standard orthogonal signals at any frequency. Combined with the characteristics of finite impulse response filter that the frequency response can be reconstructed by modifying parameters, the phase-locked analysis at any target frequency is realized. The on-chip system logic part is developed in hardware logic language as a whole, and there is no problem of “program runaway”. After the design of the system logic part, the software simulation is carried out to verify the accuracy of the system logic function. In order to verify the linearity of harmonic signal extraction of the designed hardware reconfigurable wavelength modulation methane sensor, a sinewave verification experiment is carried out. By analyzing the amplitude extraction results of different standard sinewave signals, a step output of the system under different inputs is observed, and a linear response with a goodness of fit of 99.99% is obtained. The measured sinewave amplitude fluctuation range is about  $\pm 0.5$  mV. In order to verify the actual sensing performance of the methane sensor, methane experiments are carried out using a Herriot gas cell with an optical path length of 25 m and a laser with a central wavelength of 2 334 nm for targeting the absorption line of methane at  $4\ 284.5\ \text{cm}^{-1}$ . It can be seen from the experimental results that the gas detection linearity of the methane sensor is 99.97%. The stability analysis shows that the sensor resolution is better than 25 parts-per-million in volume (ppmv), and the response time is  $\sim 4.9$  s. In addition, the Allan variance results show that when the integration time is 0.5 s, the detection limit of the sensor is 7.8 ppmv. Methane leakage test is carried out. Through the analysis of the measured  $\text{CH}_4$  concentration levels when  $\text{CH}_4$  leakage occurs, the detection ability of the sensor for methane leakage is proved. Compared with the existing methane sensor based on software architecture, the extremely low data delay lays a foundation for intermittent work, and provides the possibility to realize the application of node-type low-power gas detection. At the same time, the sensor has high accuracy, fast response speed, and can be used flexibly and conveniently based on actual needs. The developed sensor shows a good application prospect with high electronic integration based on FPGA.

**Key words:** Optoelectronic detection technique; Infrared absorption spectroscopy; Wavelength modulated spectroscopy; Field programmable gate array; Gas detection

**OCIS Codes:** 070.4790; 070.7145; 280.1120; 300.6360

**Foundation item:** National Key Research and Development Program of China (No. 20213201903), National Natural Science Foundation of China (Nos. 61960206004, 62175087), Science and Technology Development Program of Jilin Province, China (No. 20200401059GX), Science and Technology Research Program of Department of Education, Jilin Province, China (No. JJKH20211088KJ), Key Research and Development Program of Changchun (No. 21ZGN24), Higher Education Research Project, Jilin Province, China (Nos. JGJX2021D3, JGJX2021D4), Jilin University Undergraduate Teaching Reform Research Key Project (No. 2021XZD034)