

引用格式: ZHAO Qing-chuan. Development of an Infrared Methane Sensor Based on Double Narrow-band LED Light Source [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(6):0628002

赵庆川. 基于双窄带 LED 光源的红外甲烷传感器的研制[J]. *光子学报*, 2020, 49(6):0628002

# 基于双窄带 LED 光源的红外甲烷传感器的研制

赵庆川<sup>1,2</sup>

(1 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039)

(2 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400039)

**摘 要:** 利用甲烷气体分子在  $3.3 \mu\text{m}$  处的主吸收峰, 研制了一种基于非色散红外光谱技术的红外甲烷传感器. 传感器的光学部分由峰值波长为  $3.4 \mu\text{m}$  的测量发光二极管、峰值波长为  $2.7 \mu\text{m}$  的参考发光二极管、截止波长为  $3.6 \mu\text{m}$  的光电二极管及球面反射面组成; 电路部分包括发光二极管驱动电路、光敏信号处理电路、温度测量电路、微处理器. 采用短脉冲供电控制逻辑的工作模式, 降低红外光源的上电时间, 将光学测量器件的功耗降至  $16 \text{ mW}$ . 实验研究了温度变化对传感器甲烷浓度测量结果的影响, 通过数据分析及线性拟合, 得出了温度补偿算法公式. 补偿后的传感器及检测系统平台实验结果表明: 传感器平均功耗为  $23.56 \text{ mW}$ , 在  $-20 \sim 50^\circ\text{C}$  的温度范围内温度变化对测量值的影响不超过真值的  $3\%$ , 湿度影响不超过真值的  $4\%$ , 响应时间小于  $25 \text{ s}$ , 工作稳定性时间大于  $60 \text{ 天}$ , 性能指标均满足或优于 AQ6211-2008 煤矿用非色散红外甲烷传感器行业标准相关要求. 与热辐射红外光源或激光检测原理的甲烷传感器相比, 基于双窄带发光二极管的红外甲烷传感器功耗降低  $70\%$  以上, 能够满足便携式、无线化应用场合低功耗的技术要求.

**关键词:** 气体传感器; 红外吸收; 窄带光谱; LED 光源; 短脉冲供电; 温度补偿; 甲烷检测

中图分类号: TN21

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204906.0628002

## Development of an Infrared Methane Sensor Based on Double Narrow-band LED Light Source

ZHAO Qing-chuan<sup>1,2</sup>

(1 China Coal Technology and Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China)

(2 State Key Laboratory of the Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, Chongqing 400039, China)

**Abstract:** Using the main absorption peak of methane molecule at the wavelength of  $3.3 \mu\text{m}$ , an infrared methane sensor based on non-dispersed infrared spectroscopy was developed. The optical part of the sensor consists of a measuring LED with a peak wavelength of  $3.3 \mu\text{m}$ , a reference LED with a peak wavelength of  $2.7 \mu\text{m}$ , a photodiode with a cutoff wavelength of  $3.6 \mu\text{m}$  and a spherical emitting surface. The circuit part mainly includes LED driving circuit, photosensitive signal processing circuit, temperature measuring circuit and microprocessor. The short pulse power supply control logic mode is adopted to reduce the power on time of the infrared light source, and the power consumption of the optical measuring device is reduced to  $16 \text{ mW}$ . The influence of temperature change on the measurement results of methane was studied experimentally, through data analysis and linear fitting, the temperature compensation algorithm formula was obtained. The experimental results of the sensor with compensation

**基金项目:** 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项青年项目(No.2019-TD-QN033), 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项重点项目(No.2019-TD-ZD007), "十三五"国家科技重大专项(No.2016ZX05045-006)

**第一作者:** 赵庆川(1984-), 男, 副研究员, 硕士, 主要研究方向为气体传感器设计与电气控制技术. Email: zhaqiq@163.com

**收稿日期:** 2020-03-20; **录用日期:** 2020-04-24

and detection system platform show that the average power consumption of the sensor is 23.56 mW, the influence of temperature change in the temperature range of  $-20\sim 50^{\circ}\text{C}$  on the measured value is not more than 3% of the true value, humidity influence detection value is less than 4%, the response time is less than 25 s, the working stability time is more than 60 days, and the performance indexes meet or are better than the relevant requirements of AQ6211-2008 coal mine non-dispersive infrared methane transducer. Compared with the methane sensor based on the principle of thermal radiation infrared light source or laser detection, the power consumption of the infrared methane sensor based on double narrow-band LED is reduced by more than 70%, which can meet the technical requirements of low power consumption in portable and wireless applications.

**Key words:** Gas sensor; Infrared absorption; Narrowband spectrum; LED light source; Short pulse power supply; Temperature compensation; Methane measurement

**OCIS Codes:** 280.4788; 300.6340; 230.3670; 320.5550

## 0 引言

根据国家安全生产监督管理总局对我国煤矿事故的统计,2019年共发生27起瓦斯事故,同比上升68.8%,死亡118人,同比上升122.6%,死亡人数占当年煤矿安全事故总死亡人数的37.3%，“一通三防”工作依然薄弱<sup>[1]</sup>.为避免瓦斯事故的发生,对煤矿中的瓦斯气体进行实时监测具有重要的意义<sup>[2-3]</sup>.与传统的载体催化原理、热导原理等气体浓度检测方法相比<sup>[4-6]</sup>,红外气体检测方法具有检测精度高、量程大、选择性强、响应时间短等优点<sup>[7-8]</sup>,被普遍采纳,因此得到了广泛的发展和应<sup>[9-10]</sup>.随着矿山物联网及智能化技术的发展,低功耗、小体积、无线化成为甲烷检测传感器研制的目标<sup>[11-14]</sup>.

国内外很多科研人员对非色散红外气体检测和甲烷传感器进行了研究.郑玲娇等<sup>[15]</sup>研制了一种差分式中红外二氧化碳检测系统;于鑫等<sup>[16]</sup>设计了一种低检测下限、高探测性能的手持式红外甲烷气体检测仪;熊仕富等<sup>[17]</sup>提出了采用“拆分技术”对气体滤波器进行膜系结构设计;叶玮琳等<sup>[18]</sup>报道了一种采用中红外室温连续带间级联激光器的高精度大气甲烷检测系统.上述红外气体检测元件一般采用热辐射红外光源,光线通过滤光片过滤后经热释电探测器进行光电转换,从而实现气体浓度的检测,但是这种设计结构的红外甲烷元件的检测结果存在受水汽影响大、功耗高的缺点.

本文采用非色散红外(Non-Dispersed Infrared, NDIR)光谱技术,设计两个窄带红外发光二极管(Light Emitting Diode, LED)分别作为测量LED光源和参考LED光源,光电二极管(Photo-Diode, PD)作为红外光吸收转换为电流信号的敏感元件,构成新型的LED-PD光学气体测量结构.这种窄带LED光源的发射光谱特性,无需任何辅助措施及补偿即可避免水汽对红外甲烷传感器测量结果的影响,提高甲烷传感器在煤矿井下湿度环境中的测量准确性.同时对LED光源进行短脉冲调制供电技术研究,在保证测量性能的前提下,大幅度降低红外甲烷传感器的功耗.对红外甲烷传感器进行有效的温度补偿和修正,在硬件电路及软件算法上对信号进行优化处理,降低环境变化对传感器测量精度的影响.

## 1 红外甲烷检测基本原理

红外光线吸收分析基于分子中原子的振动.红外射线透过一个被分析物,与被分析物相遇的射线中特定的能量将被吸收,在吸收中变化的能量与被分析物的分子振动频率相对应.因此每种气体分子均有特定的吸收光谱,而光线入射前和入射后强度的吸收变化关系的物理过程被描述为 Lambert-Beer 定律,其吸收率可表示为

$$Q = \ln(I_0/I) = K_v CL \quad (1)$$

式中,  $I_0$  和  $I$  分别代表光线入射前、入射后的光强度,  $L$  为气室光程,  $K_v$  表示与被测气体成分有关的常数,则气体浓度  $C$  表示为

$$C = \frac{\ln(I_0/I)}{K_v L} \quad (2)$$

由式(2)可知,对于确定的采样气室结构,  $L$  数值是固定的,非色散红外甲烷检测原理为通过测量红外光波在采样气室中甲烷气体分子吸收前后光强的大小实现甲烷浓度的检测.

查询 HITRAN 数据库的数据,绘制吸收光谱图.如图 1 所示,横坐标为波长,纵坐标为吸收强度.甲烷气体分子的红外吸收光谱主要分布于  $3.2\sim 3.4\ \mu\text{m}$  中红外波段,另外在  $2.3\ \mu\text{m}$  处有个较弱的小吸收峰,而水分子的红外吸收光谱主要分布于  $2.5\sim 2.8\ \mu\text{m}$  处,两者主吸收峰相隔  $0.5\ \mu\text{m}$ ,因此传统的采用白炽灯、滤光片、探测器结构的红外甲烷传感器存在检测值受水汽影响的缺点.为了解决这一问题,本系统中红外甲烷传感器的光源采用具有窄带光谱特性的 LED 作为红外甲烷气体测量光源.

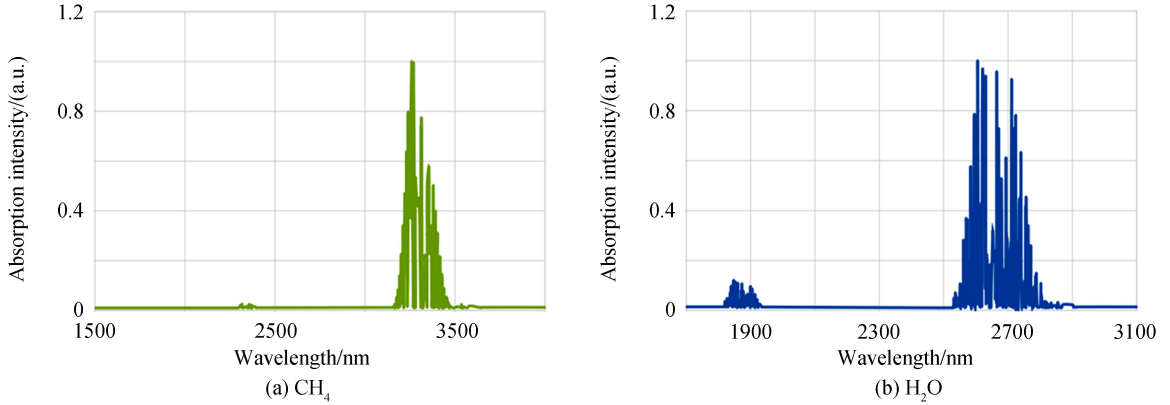


图 1  $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  在  $3.3\ \mu\text{m}$  附近的吸收光谱

Fig.1 Absorption spectrum of  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  around  $3.3\ \mu\text{m}$

## 2 红外甲烷传感器制作

红外甲烷传感器由光学测量单元、电源电路、LED 驱动电路、光敏信号处理电路、温度测量电路及微处理器组成,系统框图如图 2 所示.测量 LED 光源、参考 LED 光源、光电二极管及采样气室构成传感器光学测量单元.电源电路将外部供电转换为各电路部分的额定工作电压,测量 LED 光源、参考 LED 光源在 LED 驱动电路的调制下发出红外光,经采样气室甲烷气体分子吸收后,光电二极管将入射红外光吸收,输出电流信号,经过光敏信号处理电路后转换为电压信号输入微处理器 A/D 转换引脚,微处理器根据计算函数公式得到甲烷浓度信息,通过 UART 接口实现与变送器通信.同时计算温度测量电路的实时数值,根据补偿算法修正甲烷浓度结果.

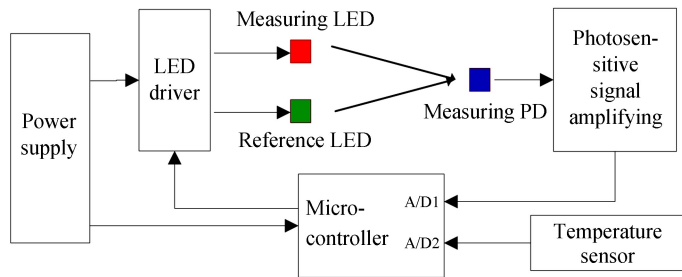


图 2 红外甲烷传感器系统原理框图

Fig.2 Principle block diagram of infrared methane sensor system

### 2.1 光学测量单元

近几年随着基于镓铟砷锑( $\text{GaInAsSb}$ ) 固溶物异质结生长在定量技术上的突破,基于窄带隙 III-V 族半导体上的中红外光谱范围的高效 LED 和 PD 器件陆续出现.LED 中红外光源具有高速响应、长寿命的特性,研制基于双窄带 LED 光源的低功耗红外甲烷传感器为提升红外甲烷检测性能提供了一种途径.对于  $\text{CH}_4$ ,主吸收峰大约在  $3.3\ \mu\text{m}$ .型号为 LED34 的 LED 器件的最小光耦包含了这个主吸收峰,因此 LED34 用做测量 LED 光源.LED27 用做参考 LED 光源,因为  $\text{CH}_4$  几乎不对它发出的射线有影响.为了增大光电信号的强度,根据 LED 光源与 PD 探测器的光谱匹配系数优化设计,型号为 PD36 的基  $\text{InAs}/\text{InAsSbP}$  结构的光电二极管用于检测信号,其截止波长为  $3.6\ \mu\text{m}$ .LED34、LED27、PD36 与  $\text{CH}_4$  主吸收峰的光谱关系如图 3 所示.

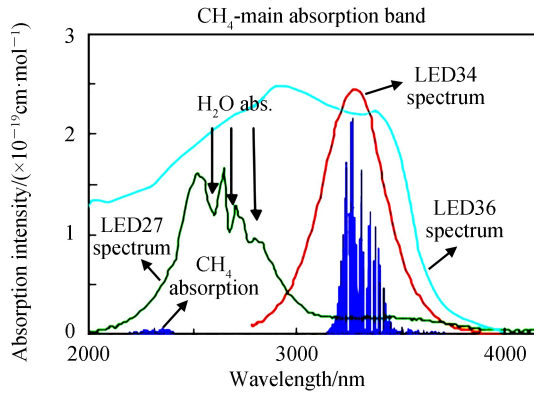


图3 LED34、LED27、PD36与CH<sub>4</sub>主吸收峰光谱关系  
Fig.3 Spectra of main absorption peaks of LED34, LED27, PD36 and CH<sub>4</sub>

由图3可知,测量LED光谱几乎不受水汽的影响,用于甲烷浓度检测,参考LED光谱对水汽有一定吸收,用于传感器光学器件及处理电路故障诊断与水汽环境变化检测,因此红外甲烷传感器具有抗水汽干扰影响及故障自诊断硬件基础。

采样气室采用不锈钢加工成型,示意图如图4所示,采用精加工镀金及涂层工艺技术的球面镜,具有超疏水、自清洁特性,同时有利于入射光线的反射.LED光源发射的红外光射向采样气室顶部球面镜,反射到光电二极管,有效光程约为1.2 cm。

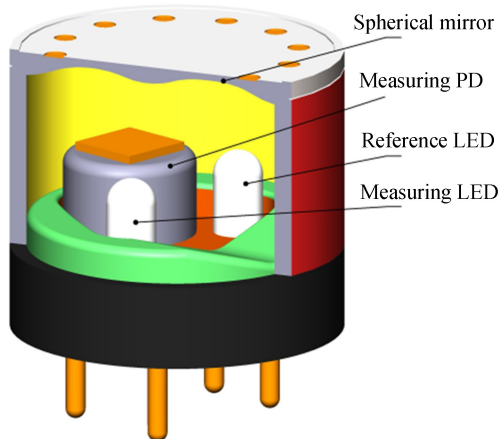


图4 采样气室设计示意图  
Fig.4 Design diagram of sampling chamber

## 2.2 LED驱动电路

LED具有高速响应的特性,高达每纳秒10次,因此可以由LED驱动逻辑运行于连续、准连续、脉冲三种不同的模式.连续模式功耗高,占空比为50%的准连续模式或占空比为25%的脉冲模式可以获得最大平均功率.为减小传感器整机功耗,延长LED器件使用寿命,传感器采用获得最大峰值功率的短脉冲模式(小于10 ms).LED34在脉冲频率为4 kHz、脉宽为2 μs条件下不同电流的发射光谱如图5所示。

由图5可知,LED工作电流越大,发射光强越大.兼顾光强与LED驱动电路电流能力,确定传感器LED驱动电路输出特性,测量LED光源和参考LED光源工作电流 $I_F$ 为2 A,工作电压 $U_F$ 为0.5 V,脉冲频率 $f$ 为4 kHz,脉冲宽度 $\tau$ 为2 μs,脉冲周期 $T$ 为 $1/f$ ,即250 μs,则LED光源的平均功耗 $P_0$ 的计算公式为

$$P_0 = \tau U_F I_F / T \quad (3)$$

将相关数值带入式(3),得到 $P_0 = 8$  mW,则测量LED光源和参考LED光源平均功耗为16 mW,远远低于传统红外甲烷传感器120 mW的功耗,适合在无线传感器、便携仪等对功耗要求高的应用场合。

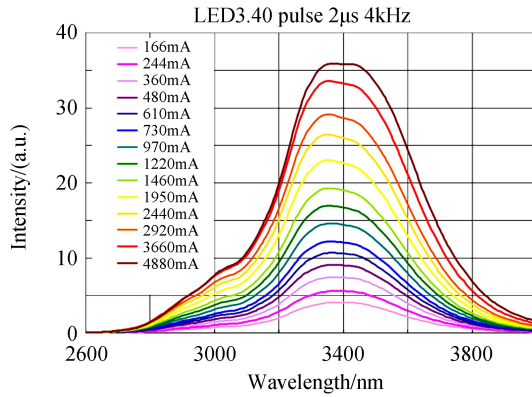


图 5 LED34 不同电流下的发射光谱

Fig.5 Emission spectra of LED34 under different current

### 2.3 光敏信号处理电路

在受到一定光照及一定反压条件下,流过 PD36 的光电流为  $I_L$ 。一般光电流为几十  $\mu\text{A}$ ,并且与照度成线性关系,光敏信号处理电路如图 6 所示。

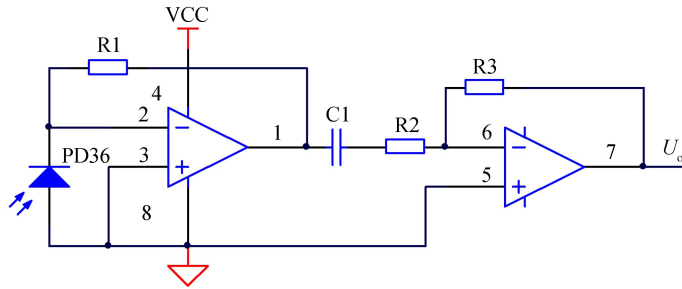


图 6 光敏信号处理电路

Fig.6 Circuit diagram of photosensitive signal processing

光电流经过光敏信号处理电路后转换为电压  $U_o$ ,然后进入微处理器 A/D 转换,得到  $U_o$  的值,经实际测算,传感器灵敏度为  $12.5 \text{ mV}/1\% \text{ VOL}$ 。在空气中测量 LED 光源和参考 LED 光源交替上电工作发射红外光线,PD36 检测到测量 LED 发射的红外光线信号转换为光电流,传感器记录此时  $U_o$  的值作为甲烷浓度零点电压值  $U_1$ ,记录参考 LED 工作时  $U_o$  的值作为诊断初始电压值  $U_2$ 。在存在甲烷气体的环境中,由测量 LED 工作时输出电压  $U_o$  与  $U_1$  的差值即可计算出甲烷气体浓度值。同时根据参考 LED 工作时输出电压  $U_o$  与  $U_2$  的差值即可对空气中湿度大小或传感器是否故障进行定性分析。

## 3 温度补偿技术及实验分析

### 3.1 温度影响及补偿算法

式(2)给出的甲烷浓度计算公式是在标准实验环境下得出的,在实际应用中因为温度变化对测量 LED 发射强度及光电二极管的光谱特性都会产生一定的影响,对于 LED 光源来说,随着温度增大,几个温度相关因素包括通过深层的非辐射性重组,表面重组和载体异质结壁垒的过度损耗,造成发射强度反而减小。另外,随着温度的增加,峰值波长将向更长的波长移动。而光线接受器件 PD36 的光电流随着温度的升高暗电流较小,光电流增大。另外光敏信号处理电路、电源等性能也受温度变化的影响,因此不宜通过理论公式推导温度补偿公式及系数。

为研究温度补偿算法,首先对红外甲烷传感器作为整体进行温度影响实验得到测试数据,然后分析得到变化规律,再采用经验数学公式进行温度补偿。首先,选取三台样机,在  $20^\circ\text{C}$  条件下采用  $1.99\% \text{ VOL}$  浓度的甲烷标准气体对红外甲烷传感器进行精度校准,然后使用经校准计量有效期内的高低温实验箱进行温度实验,在  $-20\sim 50^\circ\text{C}$  的温度范围内,每间隔  $10^\circ\text{C}$  选取一个测量点,依次通入  $0.51\% \text{ VOL}$ 、 $1.99\% \text{ VOL}$ 、 $20.2\% \text{ VOL}$  的甲烷标准气,记录三台传感器测量值的平均值,记录数据如表 1 所示。



表 1 -20~50℃ 温度范围内标准气体浓度下红外甲烷传感器测量值

Table 1 Measurement value of infrared methane sensor under standard gas concentration in the temperature range of -20~50℃

Temperature/℃	Concentration measurement at 0.51% VOL/(% VOL)	Concentration measurement at 1.99% VOL/(% VOL)	Concentration measurement at 20.2% VOL/(% VOL)
-20	0.66	2.46	24.3
-10	0.62	2.37	23.4
0	0.58	2.25	22.4
10	0.55	2.14	21.2
20	0.53	1.99	19.8
30	0.51	1.93	18.9
40	0.49	1.87	18.2
50	0.47	1.81	17.6

由表 1 可知,在-20~50℃ 的温度范围内,温度变化对传感器测量结果影响较大,测量值与真实值的偏差已经超过 20%,远远超过 AQ6211-2008 煤矿用非色散红外甲烷传感器行业标准中关于基本误差不超过真值的 6% 的规定,因此需进行温度补偿。

为获得传感器的准确温度值,在光学气室内设计有 6.8 kΩ 热敏电阻,经过微处理器 A/D 采样转换计算,得到准确的温度值.将表 1 内数据以 20℃ 测量值数据为基准进行归一化处理,得到 0.51% VOL、1.99% VOL、20.2% VOL 三条标准气体温度补偿系数  $\epsilon$  曲线,如图 7。

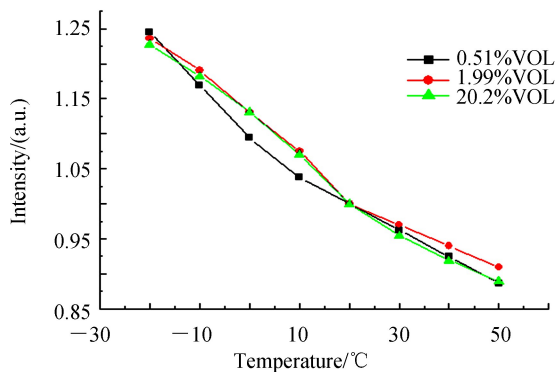


图 7 温度补偿系数曲线

Fig.7 Curve of temperature compensation coefficient

为消除温度变化对传感器测量结果的影响,引入温度补偿公式,表达式为

$$C = C' / \epsilon \quad (4)$$

式中,  $C$  为温度补偿后的甲烷浓度值,  $C'$  为未经温度补偿的浓度值,  $\epsilon$  是温度  $T_s$  的一次线性函数.对图 7 所示曲线进行线性拟合,得到拟合关系式为

$$\epsilon = -0.0049T_s + 1.1298 \quad (5)$$

根据式(4)和(5)完成软件程序算法编程,实现甲烷测量结果的温度补偿修正,提高传感器在不同环境条件下的测量精度。

### 3.2 实验分析

为验证双窄带 LED 光源红外甲烷传感器设计的可行性及温度补偿后甲烷检测效果,制作了红外甲烷传感器样件,设计加工了采用该传感器作为敏感元件的甲烷检测系统平台.具体样机和平台照片如图 8 所示,红外甲烷传感器的尺寸为  $\Phi 20 \text{ mm} \times 16.8 \text{ mm}$ 。

目前基于载体催化、热导、激光甲烷检测技术的敏感元件平均功耗至少为 100 mW,图 8 所示检测系统平台,红外甲烷传感器采用 3.3 V 直流供电,实测平均电流为 7.14 mA,则采用 LED 光源的红外甲烷传感器实际平均功耗为 23.56 mW,具有显著的低功耗性能优势。

在-20~50℃ 的温度范围内对传感器进行温度影响实验,进行实验数据分析,温度补偿后最大误差不超过真值的 3%,温度补偿算法效果显著。

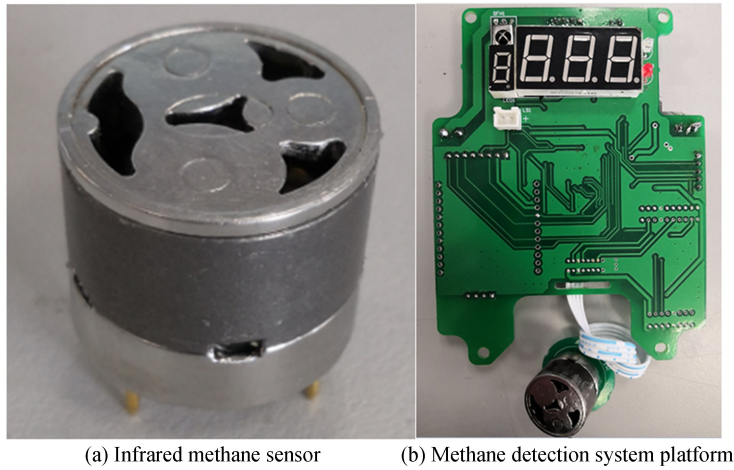


图 8 红外甲烷传感器及检测系统平台实物

Fig.8 Physical figure of infrared methane sensor and detection system platform

在 25%~95%RH 的湿度范围内对传感器进行湿度影响实验,数据如表 2 所示,传感器零点漂移最大值为 0.02%VOL,在 0.51%VOL 甲烷浓度下湿度的影响不超过 0.05%VOL、在 1.99%VOL 甲烷浓度下湿度的影响不超过真值的 4%,试验结果表明传感器甲烷测量结果基本不受水汽干扰。

表 2 25%~95%RH 湿度范围内标准气体浓度下红外甲烷传感器测量值

Table 2 Measured value of infrared methane sensor under the standard gas concentration in the humidity range of 25% ~ 95%RH

Humidity/%RH	No methane in the air/(%VOL)	Concentration measurement at 0.51%VOL/(%VOL)	Concentration measurement at 1.99%VOL/(%VOL)
25	0.00	0.53	1.98
45	0.00	0.53	1.99
70	0.01	0.55	2.03
95	0.02	0.56	2.07

对传感器工作电压、工作电流、基本误差、响应时间、工作稳定性性能指标进行测试,得出传感器基本性能参数,如表 3 所示。

表 3 传感器基本性能参数

Table 3 Basic performance parameters of sensor

Parameters	Value
Working voltage (DC)/V	3.0~3.6
Average current/mA	<10
Measuring range/(%VOL)	0~100
Indicationerror	±0.06/(0~1.00%)
	±6%/(1.00%~100%)
Response time/s	<25
Working stability/day	>60

由表 3 基本性能参数可知,研制的红外甲烷传感器性能指标均满足或优于 AQ6211-2008 煤矿用非色散红外甲烷传感器行业标准中相关参数的规定。

为便于研制的红外甲烷传感器在煤矿推广应用,后续需委托有资质的检验机构对传感器按照 GB3836.4-2010 中“ia”防护等级进行火花点燃试验测试与评价.同时在传感器采样气室进气孔处设计防水透气膜用来防尘防水,透气量为 1 000 mL,防护等级为 IP67.

## 4 结论

本文利用甲烷气体分子在 3.3  $\mu\text{m}$  处的主吸收峰,用新型的基于窄带隙 III-V 族半导体上的峰值波长为 3.3  $\mu\text{m}$  的 LED 器件作为测量光源,峰值波长为 2.7  $\mu\text{m}$  的 LED 器件作为参考光源,截止波长为 3.6  $\mu\text{m}$  的

PD 器件作为探测器,结合 LED 驱动电路及光敏信号处理电路设计完成了基于非色散红外光谱技术的红外甲烷传感器的研制.采用该传感器及检测系统平台进行了温度、湿度及其他性能实验,给出了温度影响实验数据和温度补偿公式,并根据测试结果给出了基本性能指标参数.本文研制的红外甲烷传感器功耗低、受水汽影响小、稳定性好,在煤矿甲烷检测方面具有重要意义.

### 参考文献

- [1] 贤集网.煤矿安全生产实现“三下降”,2019 年全国煤矿发生死亡事故 170 起[OL].(2020-01-15)[2020-03-20]. [https://www.xianjichina.com/news/details\\_183874.html](https://www.xianjichina.com/news/details_183874.html).
- [2] GUO Qing-hua, YU Qing, GOU Yi. Research of distributed multi-point methane detection system which based on laser self-stabilizing technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, **43**(2):371-376.  
郭清华, 于庆, 苟怡. 基于激光自稳频技术的分布式多点甲烷检测系统研究[J]. *煤炭学报*, 2018, **43**(2): 371-376.
- [3] FAN Rong, HOU Yuan-bin, GUO Qing-hua, *et al.* Technology temperature compensation technology of the methane sensor with tunable semiconductor laser spectrum absorption[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, **40**(1):226-231.  
樊荣, 侯媛彬, 郭清华. 可调谐半导体激光吸收光谱式甲烷传感器温度补偿技术[J]. *煤炭学报*, 2015, **40**(1): 226-231.
- [4] ZHA Shen-long, LIU Kun, TAN Tu, *et al.* Application of photoacoustic spectroscopy in multi-component gas concentration detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(6): 0612002.  
查申龙, 刘锬, 谈图, 等. 光声光谱技术在多组分气体浓度探测中的应用[J]. *光子学报*, 2017, **46**(6): 0612002.
- [5] DING Xue-zhi, LONG Rui-jun, MI Jian-dui, *et al.* Measurement of methane and carbon dioxide emissions from ruminants based on the NDIR technique[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(6): 1503-1506.  
丁学智, 龙瑞军, 米见对, 等. 非分光红外 (NDIR) 技术测定反刍动物甲烷和二氧化碳研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(6): 1503-1506.
- [6] ASAKAWA T, KANNO N, TONOKURA K. Diode laser detection of greenhouse gases in the near-infrared region by wavelength modulation spectroscopy; pressure dependence of the detection sensitivity[J]. *Sensors*, 2010, **10**(5): 4686-4699.
- [7] SONG Guang-lin, LUO Yun-jun, LI Jin-qing, *et al.* Determination of carbon dioxide in refined titanium tetrachloride by infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, **35**(3): 626-630.  
宋光林, 罗运军, 李晋庆, 等. 红外光谱法测定精四氯化钛中二氧化碳的含量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, **35**(3): 626-630.
- [8] TAN S, LIU W, WANG L, *et al.* Mid-infrared distributed-feedback quantum cascade laser-based photoacoustic detection of trace methane gas[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(5): 1251-1254.
- [9] TU Zhi-hua, ZHAO Yang, ZHENG Li-wen, *et al.* Detection of carbon dioxide concentration in soil profile based on nondispersive infrared spectroscopy technique[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, **35**(4): 997-1000.  
涂志华, 赵阳, 郑力文, 等. 基于非分散红外 (NDIR) 技术的土壤剖面二氧化碳浓度的测定[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, **35**(4): 997-1000.
- [10] DOOLY G, CLIFFORD J, LEEN G, *et al.* Mid-infrared point sensor for in situ monitoring of CO<sub>2</sub> emissions from large-scale engines[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(31): 7636-7642.
- [11] YU X, LV R, SONG F, *et al.* Pocket-sized nondispersive infrared methane detection device using two-parameter temperature compensation[J]. *Spectroscopy Letters*, 2014, **47**(1): 30-37.
- [12] ZHU Z, XU Y, JIANG B. A one ppm NDIR methane gas sensor with single frequency filter denoising algorithm[J]. *Sensors*, 2012, **12**(9): 12729-12740.
- [13] HE Q, DANG P, LIU Z. TDLAS-WMS based near-infrared methane sensor system using hollow-core photonic crystal fiber as gas-chamber [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, **49**(3): 115.
- [14] YE W, LI C, ZHENG C. Mid-infrared dual-gas sensor for simultaneous detection of methane and ethane using a single continuous-wave interband cascade laser[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(15): 16973-16985.
- [15] ZHENG Ling-jiao, NIU Xin-tao, WANG Jia-ning, *et al.* Development and agricultural application of a mid-infrared carbon dioxide sensor system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(8):0812004.  
郑玲娇, 牛新涛, 王嘉宁, 等. 中红外二氧化碳传感器的研制及在农业中的应用[J]. *光子学报*, 2017, **46**(8): 0812004.
- [16] YU Xin, LI Lei, ZHAO Jing, *et al.* Development and test of multi-parameter compensation mid-infrared methane detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(6):0612001.  
于鑫, 李磊, 赵靖, 等. 多参数补偿中红外甲烷检测仪的研制与实验[J]. *光子学报*, 2019, **48**(6): 0612001.



- [17] XIONG Shi-fu, FU Xiu-hua, LIU Dong-mei, *et al.* Narrow-band filter based on infrared absorption characteristics of methane gas[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(10): 1023003.  
熊仕富, 付秀华, 刘冬梅, 等. 基于甲烷气体红外吸收特性窄带滤波器的研究[J]. *光子学报*, 2017, **46**(10): 1023003.
- [18] YE Wei-lin, HE Xun, MENG Yong-xian, *et al.* Highly-accuract mid-infrared atmospheric methane sensor system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(11): 1128003.  
叶玮琳, 何迅, 孟永贤, 等. 一种高精度中红外大气甲烷传感系统的研制[J]. *光子学报*, 2017, **46**(11): 1128003.