

一种中红外带间级联激光甲烷传感器的研制

郑文雪, 郑传涛, 姚丹, 杨硕, 党佩佩, 王一丁

吉林大学集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012

摘要 甲烷(CH_4)是大气环境监测、工业过程控制、煤矿生产安全等多个领域中需重点监测的气体之一, 研制 CH_4 传感器具有广泛的应用价值。利用 CH_4 分子在 $3.31 \mu\text{m}$ 附近的基频吸收带并选择其在 3038.5 cm^{-1} 的吸收线作为目标谱线, 研制了一种基于中红外室温、连续、单模带间级联激光器(ICL)的 CH_4 传感器。该传感器采用可调谐激光直接吸收光谱技术以及长光程(54.6 m)吸收光谱技术测定 CH_4 气体浓度。自主研制了高灵敏、低功耗的激光器温度控制器和电流驱动器, 编写了基于 LabVIEW 的数据产生、采集与处理程序。利用体积分数为 2.1×10^{-6} 的 CH_4 标准气体和气体稀释系统配备了不同浓度的 CH_4 气体样品, 开展了传感器的性能测试实验。根据传感器标准差的分析结果, 当采样周期为 2.5 s 时, 传感器的 1σ 检测下限约为 1.1×10^{-8} 。利用该传感器对室外大气中 CH_4 浓度进行了连续 84 h 的监测, 结果证实了所研制 CH_4 传感器的工程实用价值。

关键词 传感器; 激光光谱学; 甲烷传感器; 红外吸收光谱; 带间级联激光器

中图分类号 TH83

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0328013

Development of a Mid-Infrared Interband Cascade Laser Methane Sensor

Zheng Wenxue, Zheng Chuantao, Yao Dan, Yang Shuo, Dang Peipei, Wang Yiding

State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Jilin University Region,

College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract Methane (CH_4) is one of the most important gases to be monitored in many fields such as atmospheric environment monitoring, industrial process control and coal mine production safety. Developing CH_4 sensor has a wide application value. Based on the fundamental frequency absorption band of CH_4 molecule near $3.31 \mu\text{m}$ and its absorption line at 3038.5 cm^{-1} as the target line, a CH_4 sensor based on the mid-infrared room-temperature, continuous and single-mode interband cascaded laser (ICL) is developed. The sensor uses tunable laser direct absorption spectroscopy and long-path (54.6 m) absorption spectroscopy to measure CH_4 gas concentrations. A high sensitivity, low power laser temperature controller and current driver are developed independently, and the program of data generation, acquisition and processing based on LabVIEW is coded. The CH_4 standard gas with a volume fraction of 2.1×10^{-6} and a gas dilution system are used to prepare CH_4 gas samples with different concentrations. And the performance test of the sensor is conducted. According to the analysis of the standard deviation of the sensor, when the sampling period is 2.5 s , the lower 1σ detection limit of the sensor is about 1.1×10^{-8} . The sensor is used to monitor the concentration of CH_4 in the outdoor air for 84 h continuously. The results confirm the engineering practical value of the developed CH_4 sensor.

Key words sensors; laser spectroscopy; methane sensor; infrared absorption spectroscopy; interband cascade laser

OCIS codes 280.1120; 280.3420; 300.6340; 300.6360

1 引 言

自 1750 年以来, 大气中甲烷(CH_4)浓度增加了

约 150%, 目前大气中 CH_4 的体积分数约为 1.8×10^{-6} , 是造成温室效应的主要气体, 占温室气体总量的 20%^[1-2]。同时, 天然气在运输和储存过程中的

收稿日期: 2017-08-09; 收到修改稿日期: 2017-09-06

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFD0700101, 2016YFC0303902)、国家自然科学基金(61775079, 61627823, 61307124)、吉林省科技发展计划项目(20140307014SF)、吉林省省级产业创新专项资金项目(2017C027)、长春市科技发展计划项目(11GH01, 14KG022)

作者简介: 郑文雪(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事红外气体传感方面的研究。E-mail: zhengwx15@mails.jlu.edu.cn

导师简介: 郑传涛(1982—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事红外激光光谱学与传感器方面的研究。

E-mail: zhengchuantao@jlu.edu.cn(通信联系人)

泄露增加了大气中 CH_4 的含量,造成温室效应,也是亟需解决的问题。不仅如此, CH_4 还是工业安全重点监测的气体之一,如煤矿生产和液化 CH_4 生产领域。因此,开发实时、便携、可靠的 CH_4 浓度传感器至关重要^[3-7]。

与质谱法或气相色谱分析法相比,用红外吸收光谱法检测 CH_4 浓度具有尺寸小、响应时间短和成本低等优点^[8-12],并且不需要预处理和累积目标气体样品,可实现原位、在线测量。可调谐激光吸收光谱(TLAS)技术^[13-15]是非接触式、痕量气体检测的有效方法。该技术采用可调谐激光器,用单一、窄带的近红外或中红外激光扫描气体的吸收峰,提高灵敏度和实现选择性。基于铽镓砷(GaSb)的带间级联激光器(ICL)在室温下已可实现 $2.5\sim 6.0\ \mu\text{m}$ 之间的连续辐射,为中红外气体检测提供了新的辐射光源^[16]。近年来,单模和多模的 ICL 被广泛应用于气体检测中。

鉴于此,本文利用一种辐射波长覆盖 $3.31\ \mu\text{m}$ CH_4 基频吸收带的室温、单模、可调谐 ICL,并结合 TLAS 技术和长光程吸收光谱技术,研制了一种中红外 CH_4 传感器,其检测下限为十亿分之一(体积分数)量级,其性能远远优于本课题组以前报道的基于热光源的 CH_4 传感器^[17]和近红外量子阱激光传感器^[18]。

2 传感器结构及设计

2.1 CH_4 吸收线的选择

CH_4 在 $3.31\ \mu\text{m}$ 的中红外波段具有较强吸收特性。基于 HITRAN 数据库,设定气体压强为 $101.325\ \text{kPa}$ 、有效光程 L 为 $54.60\ \text{m}$ 、温度 T 为 $298\ \text{K}$,计算出体积分数为 2×10^{-6} 的 CH_4 和体积分数为 2% 的 H_2O (相对湿度约 60% ,温度为 $298\ \text{K}$) 的吸收光谱,如图 1(a)所示。选择 $3038.5\ \text{cm}^{-1}$ 作为 CH_4 气体的目标吸收线(吸收强度为 $8.958\times 10^{-20}\ \text{cm}/\text{molecule}$)。当体积分数小于 2% 时,位于 $3037.6\ \text{cm}^{-1}$ 的 H_2O 的吸收线在 $3038.5\ \text{cm}^{-1}$ 附近相对平坦,可将此范围内 H_2O 的吸收作为背景信息进行处理,从而消除 H_2O 的影响。采用 Nanoplus 公司生产的封装为 TO66 的 ICL 作为光源,与热电制冷器(TEC)封装在热沉上(尺寸: $5\ \text{cm}\times 5\ \text{cm}\times 5\ \text{cm}$),其发光的波数范围为 $3034\sim 3042\ \text{cm}^{-1}$ 。当 ICL 的工作温度为 $30\ ^\circ\text{C}$ 、驱动电流为 $54\ \text{mA}$ 时,其输出功率为 $1.9\ \text{mW}$ 。该 ICL 的电流调谐系数和温度调谐系数分别约为 $-0.232\ \text{cm}^{-1}/\text{mA}$ 和 $-0.240\ \text{cm}^{-1}/^\circ\text{C}$ 。

当工作温度为 $30.95\ ^\circ\text{C}$ 、工作电流为 $40\ \text{mA}$ 时,测得的激光器发光谱的半峰全宽约为 $0.12\ \text{cm}^{-1}$ ($3.6\ \text{GHz}$)。当工作温度为 $30.95\ ^\circ\text{C}$ 、驱动电流为 $40\ \text{mA}$ 时,激光器的出射波长为 $3038.5\ \text{cm}^{-1}$,如图 1(b)所示,该波长与选定的 CH_4 吸收线的波数相一致。

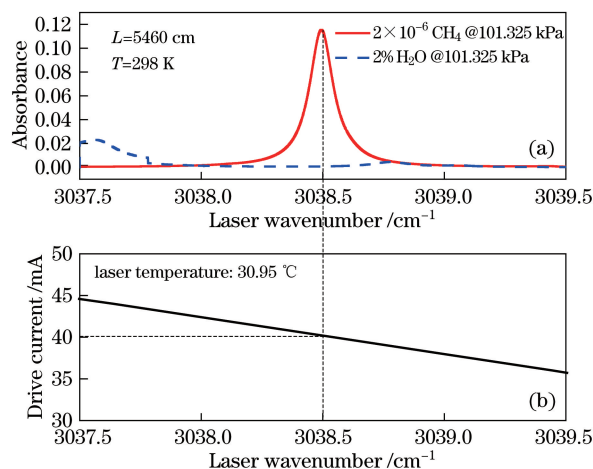


图 1 (a) CH_4 和 H_2O 的吸收光谱图;(b)工作温度为 $30.95\ ^\circ\text{C}$ 时,激光器发光波数与驱动电流的关系

Fig. 1 (a) Absorption spectra of CH_4 and H_2O ;

(b) relationship between the emission wavenumber of laser and the drive current at the working temperature of $30.95\ ^\circ\text{C}$

2.2 传感器结构

基于连续、热电制冷型 ICL 的中红外 CH_4 传感器的结构如图 2 所示,由光学和电学两部分组成。光学部分使用 $3291\ \text{nm}$ 室温、连续分布反馈 ICL (DFB-ICL) 作为红外光源。出射光经过透镜(L)汇聚后,由平面镜 M3、M4 反射进入光程为 $54.6\ \text{m}$ 的多通池(MPGC)。入射光在多通池内经历 435 次反射,并被 CH_4 气体吸收。利用抛物面镜(PM)将多通池的出射光汇聚到碲镉汞(MCT)探测器(VIGO System,型号:PVI-4TE-4)上,实施探测。该探测器的峰值响应波长为 $4\ \mu\text{m}$,敏感面积为 $1\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}$,峰值波长处的探测度为 $6\times 10^{11}\ \text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$,电流响应度为 $1\ \text{A}/\text{W}$ 。电学部分由笔记本电脑(戴尔,型号:PP04X)、数据采集卡(DAQ,美国 NI 公司,型号:USB-6356)、自主研发的激光器驱动器、温度控制器组成。根据 TLAS 技术原理,仅采用锯齿波来驱动 ICL,扫描激光器波长,使其扫过 CH_4 气体的吸收峰。这种利用直接强度探测气体浓度的方式,在硬件上,无需锁相放大提取二次谐波信号,简化了系统结构;在软件上,由于吸收系数与气体浓度具有确定的对应关系,因此该系统无需标定,简化了设计流程。利用 LabVIEW 控制的数据采集卡的数

模转换(DAC)模块产生扫描信号,同时同步触发数据采集卡的模数转换(ADC)模块采集探测器的输出信号。设计了基于 LabVIEW 的信号处理系统,实现扫描信号产生(SG)、信号采集(SA)、背景拟合(BF)、吸收线拟合(LAF)、浓度提取(CD)功能。

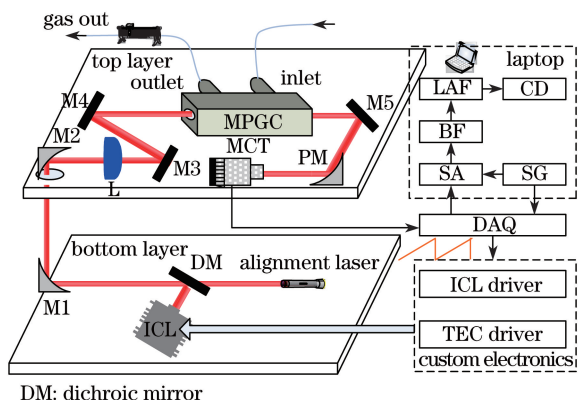


图 2 基于 ICL 的中红外 CH₄ 传感器示意图

Fig. 2 Schematic of the mid-infrared CH₄ sensor based on ICL

2.3 激光器驱动和温度控制器

利用单片机技术设计并研制了激光器电流驱动器和温度控制器,结构紧凑,体积小于 5 cm×5 cm,供电电压为 +12 V。温度控制器的控温精度为

±0.001 °C。为了提高电流精度,采用调理电路将输出电流与输入电压比调节为 2.14 mA/V。定制的激光器驱动器和温度控制器的功耗都小于 1.5 W,远低于商用产品(如 Thorlabs 的 TED200C 温度控制器,功耗高达 80 W)。

2.4 LabVIEW 数据处理平台

基于 LabVIEW 的数据处理平台的功能如图 3 所示。该平台有三个主要功能:信号产生、信号采集和信号处理。首先,数据采集卡的 DAC 模块产生扫描信号并扫描激光器。然后,使用数据采集卡的 ADC 模块,采用与 DAC 同样的采样率采集探测器的输出信号。在每个采样周期内,采集 N 帧吸收信号,并对 N 帧数据进行平均化处理,以此来抑制系统随机噪声。针对采集得到的 CH₄ 吸收信号(x 轴:采样点数;y 轴:电压信号),去掉气体吸收峰附近的若干数据点(有吸收)后,对所得信号两侧的数据(没有吸收)进行 5 次多项式拟合,得到拟合公式: $y = f(x)$,再将全部的 x 代入该公式,即可计算得到完整的背景信号。对吸收信号做归一化处理之后,进行洛伦兹吸收线性拟合,得到吸收峰处的吸收系数,以此确定 CH₄ 气体的浓度。

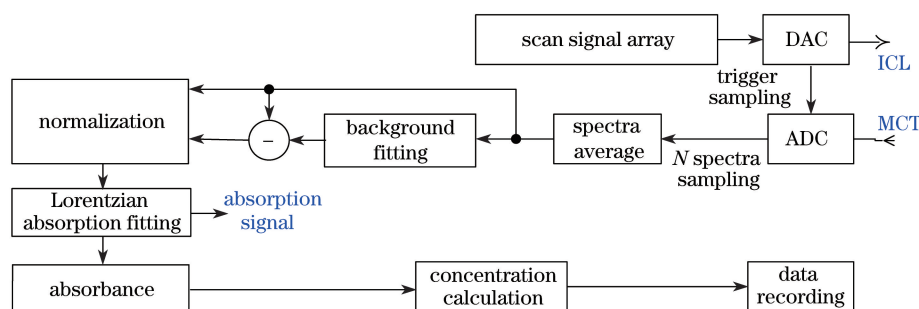


图 3 基于 LabVIEW 上位机平台的功能框图

Fig. 3 Function diagram of the laptop platform based on LabVIEW

在信号处理上,在每轮次的浓度计算中,利用数据采集卡采集 N 帧探测器输出的光谱数据,并对其做平均处理,得到:

$$u_{r,avr}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{r,i}(t) = \underbrace{u_{r,avr}(t)}_{\text{background}} - \underbrace{u_{r,avr}(t)}_{\text{absorption}}, \quad (1)$$

该信号包括两部分: $\underbrace{u_{r,avr}(t)}_{\text{background}}$ 为背景信号, $\underbrace{u_{r,avr}(t)}_{\text{absorption}}$ 为吸收信号。通过采集得到的 $u_{r,avr}(t)$, 可以利用 LabVIEW 拟合得到吸收谱的背景信号,即:

$$u_{r,bac}(t) = \underbrace{u_{r,avr}(t)}_{\text{background}}, \quad (2)$$

进而可以得到吸收系数:

$$u_{r,absorbance}(t) = -\ln \left[\frac{u_{r,avr}(t)}{u_{r,bac}(t)} \right]. \quad (3)$$

在确定光程的情况下,吸收系数和气体浓度呈正比关系,利用计算得到的吸收系数值并对比 HITRAN 数据库的吸收系数值,即可确定气体浓度。

3 传感器实验与应用

3.1 实验参数

实验中,将激光器温度设置为 30.95 °C。锯齿波扫描信号的频率为 500 Hz,幅度为 3.27 V,对应驱动电流为 38~45 mA,扫过的波数范围为 ~1.624 cm⁻¹。由锯齿波信号触发 DAC 采样,一个完整的采样周期包括 2000 个点。每个计算周期采

样 $N=50$ frame。气室中的压力为 1 个大气压,抽取气体样品的速度为 50 mL/min。利用体积分数为 2.1×10^{-6} 的 CH_4 标准气和纯氮气(N_2),使用气体稀释系统(EnviroNics, Series 4040)配备标准浓度气体样品,对 CH_4 传感器进行标定和性能评估。

3.2 传感器的动态检测性能

将体积分数为 2.1×10^{-6} 的 CH_4 标准气体样品抽入气室,同时采集探测器的输出信号并对 50 帧光谱信号进行平均,得到的吸收光谱结果如图 4 中圆点线所示。对图中的实验数据点进行洛伦兹拟合,如图 4 中红色实线所示。在采用锯齿波扫描激光器过程中,激光器的发光波数以及激光器的初始输出功率仍由该图所示。由于大气中 CH_4 的吸收作用,图 4 中波长为 3038.5 cm^{-1} 附近测得的功率出现了凹陷。

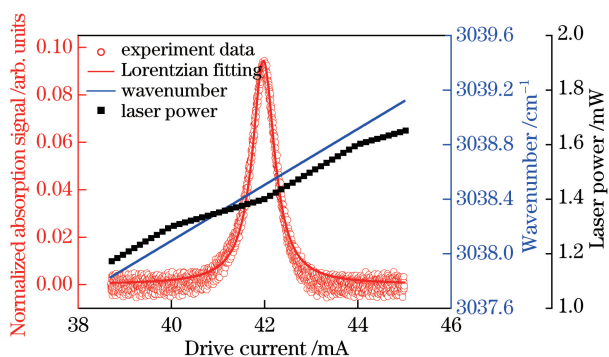


图 4 CH_4 体积分数为 2.1×10^{-6} 时,实验测得的归一化吸收信号及其洛伦兹拟合信号,以及激光器发光波数与初始输出功率随扫描电流的变化关系

Fig. 4 Experimental measured normalized absorption signal and its Lorentzian fitting signal for CH_4 sample with the volume fraction of 2.1×10^{-6} . The figure also shows the relation between the laser emission wavenumber, initial output power and the drive current

利用配气系统配备了体积分数分别为 1.0×10^{-6} 、 1.2×10^{-6} 、 1.4×10^{-6} 、 1.6×10^{-6} 的气体样品,将其经由气泵抽入气室中,实施探测,对每种样品的探测时间约为 10 min,探测结果如图 5 所示。从图 5 中可见,从 0 时刻开始,测得的 CH_4 气体浓度由室内 CH_4 浓度开始缓慢下降,直至测得的 CH_4 体积分数降至约 1.0×10^{-6} ,而后 CH_4 体积分数逐渐变为 1.2×10^{-6} 、 1.4×10^{-6} 、 1.6×10^{-6} 、室内 CH_4 浓度。可以看到,实验测得的结果与配备的气体样品的浓度基本一致,个别测量结果的差异是由气体稀释系统的偏差造成的(如对体积分数为 1.4×10^{-6} 的 CH_4 样品的测量结果)。当时间为 40 min 时,抽取

室内空气进入气室,测得的 CH_4 的体积分数略大于 2.1×10^{-6} 。

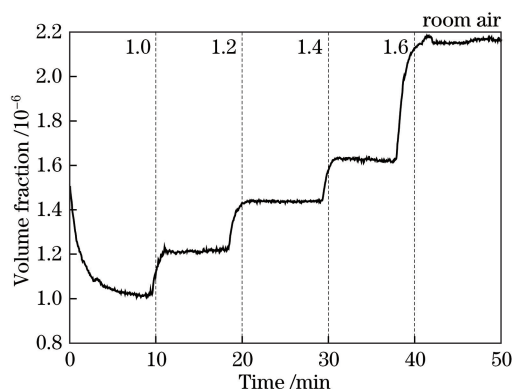


图 5 CH_4 传感器对不同浓度 CH_4 气体样品的动态测量结果
Fig. 5 Dynamic measurement results of CH_4 gas samples with different concentrations by using CH_4 sensor

3.3 系统的检测下限与 Allan 偏差分析

在标准大气压下,将体积分数为 2.1×10^{-6} 的 CH_4 标准气体样品抽入气室中。利用该传感器系统对该标准气体样品进行连续 50 min 的测量,采样周期为 2.5 s。测量得到的 CH_4 浓度的实时变化曲线如图 6(a) 所示。结果显示,在上述测试时间段内, CH_4 的平均体积分数为 $(2.1 \pm 0.011) \times 10^{-6}$ (1σ , σ 为测量结果的标准差)。考虑到传感器的响应是线性的,即传感器在 0 和 2.1×10^{-6} 的标准差应该近似相等。因此可近似得到,当采样时间为 2.5 s 时,传感器的 1σ 检测下限为 1.1×10^{-8} 。

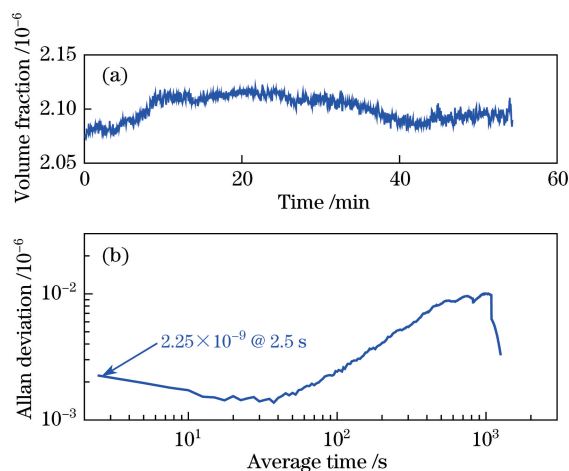


图 6 (a)对体积分数为 2.1×10^{-6} 的 CH_4 气体样品浓度的长时间测量结果;(b)阿伦偏差曲线

Fig. 6 (a) Long time measurement of CH_4 concentration for a CH_4 gas sample with the volume fraction of 2.1×10^{-6} ; (b) Allan deviation curve

根据图 6(a) 的结果,对测得的结果进行了 Allan 偏差分析,得到的 Allan 偏差曲线如图 6(b)

所示。当积分时间为 2.5 s 时, Allan 偏差为 2.25×10^{-9} ; 当积分时间为 40 s 时, Allan 偏差最小, 即传感器具有最佳的稳定性。

3.4 传感器的应用

为了验证传感器的性能, 利用该传感器测量了室外 CH_4 气体的浓度。利用长气体管以及气泵将室外的大气抽入气室, 实施检测, 总时长为 84 h。实验测得的 CH_4 浓度随时间的变化曲线如图 7 所示。实验结果表明, 在 84 h 的测试时间内, 室外 CH_4 的体积分数变化在 $1.86 \times 10^{-6} \sim 2.8 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 $(2.14 \pm 0.16) \times 10^{-6}$ (1σ); 浓度变化规律表明, 早上 CH_4 浓度较高并达到峰值, 随后浓度逐渐下降到大气背景水平 ($1.9 \times 10^{-6} \sim 2.2 \times 10^{-6}$)。

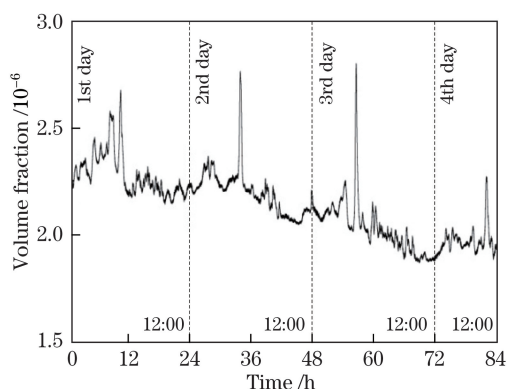


图 7 对室外大气中 CH_4 浓度的连续 84 小时的测量结果
Fig. 7 Measurement results of CH_4 concentration monitoring in outdoor atmosphere for 84 h continuously

表 1 三种 CH_4 传感器的性能及参数对比

Table 1 Comparison on the performances and parameters of three CH_4 sensors

Ref.	Source	Technique	Absorption length /cm	Detection limit
[17]	3.31 μm wire source	NDIR	7.6	5×10^{-6}
[18]	1.65 μm laser	WMS	40	3×10^{-5}
This paper	3.291 μm ICL	LDAS	5460	1.1×10^{-8}

参 考 文 献

- [1] Balzter H, Gerard F F, George C T, *et al.* Impact of the Arctic Oscillation pattern on interannual forest fire variability in Central Siberia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(14): L14709.
- [2] Simpson I J, Rowland F S, Meinardi S, *et al.* Influence of biomass burning during recent fluctuations in the slow growth of global tropospheric methane[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(22): 126-136.
- [3] Dong L, Wright J, Peters B, *et al.* Compact QEPAS sensor for trace methane and ammonia detection in impure hydrogen[J]. *Applied Physics B*, 2012, 107(2): 459-467.
- [4] Leis J, Buttsworth D, Snook C, *et al.* Detection of potentially explosive methane levels using a solid-state infrared source[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2014, 63(12): 3088-3095.
- [5] Triki M, Ba T N, Vicet A. Compact sensor for methane detection in the mid infrared region based on quartz enhanced photoacoustic spectroscopy[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 69: 74-80.

3.5 性能对比

将本工作与课题组前期工作^[17-18]进行对比, 结果如表 1 所示。文献[17]使用中红外热光源, 其采用的是差分式非分光红外 (NDIR) 技术, 光程约为 7.6 cm, 得到的检测下限约为 5×10^{-6} ; 文献[18]使用近红外激光器, 其采用的是波长调制吸收光谱 (WMS) 技术, 光程约为 40 cm, 得到的检测下限约为 3×10^{-5} ; 所研制的传感器由于同时采用了中红外激光器和长光程吸收光谱技术, 对 CH_4 的检测下限约为 1.1×10^{-8} , 相比文献[17-18]而言, 降低了约 3 个量级。

4 结 论

基于中心波长为 3.291 μm 的 ICL 和光程为 54.6 m 的多通池, 采用直接吸收光谱技术, 设计并研制了一种中红外 CH_4 气体浓度传感器。自主研制了高灵敏、低功耗的激光器温度控制器和电流驱动器, 编写了基于 LabVIEW 的数据产生、采集与处理程序。利用体积分数为 2.1×10^{-6} 的 CH_4 标准气体样品和气体稀释系统配备了不同浓度的 CH_4 气体样品, 开展了传感器的性能测试实验。当积分时间为 2.5 s 时, 传感器的 Allan 方差为 2.25×10^{-9} 。相比本课题组以前报道的近红外 CH_4 传感器和基于红外热光源的非分光红外 CH_4 传感器, 该传感器的检测下限降低了约 3 个量级。此外, 利用该传感器对室外大气 CH_4 浓度进行了连续 84 h 的监测, 结果证实了所研制传感器的工程实用价值。

- [6] Köhring M, Huang S, Jahjah M, *et al.* QCL-based TDLAS sensor for detection of NO toward emission measurements from ovarian cancer cells[J]. Applied Physics B, 2014, 117(1) : 445-451.
- [7] Ren W, Luo L, Tittel F K. Sensitive detection of formaldehyde using an interband cascade laser near 3.6 μm [J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2015, 221: 1062-1068.
- [8] Lancaster D G, Weidner R, Richter D, *et al.* Compact CH_4 sensor based on difference frequency mixing of diode lasers in quasi-phase matched LiNbO_3 [J]. Optics Communications, 2000, 175(4): 461-468.
- [9] Lancaster D G, Dawes J M. Methane detection with a narrow-band source at 3.4 μm based on a Nd:YAG pump laser and a combination of stimulated Raman scattering and difference frequency mixing[J]. Applied Optics, 1996, 35(21): 4041-4045.
- [10] Fischer C, Sigrist M W. Trace-gas sensing in the 3.0- μm region using a diode-based difference-frequency laser photoacoustic system[J]. Applied Physics B, 2002, 75(2-3): 305-310.
- [11] Richter D, Lancaster D G, Curl R F, *et al.* Compact mid-infrared trace gas sensor based on difference-frequency generation of two diode lasers in periodically poled LiNbO_3 [J]. Applied Physics B, 1998, 67(3): 347-350.
- [12] Petrov K P, Waltman S, Dlugokencky E J, *et al.* Precise measurement of methane in air using diode-pumped 3.4- μm difference-frequency generation in PPLN[J]. Applied Physics B, 1997, 64(5): 567-572.
- [13] Silver J A. Frequency-modulation spectroscopy for trace species detection: theory and comparison among experimental methods[J]. Applied Optics, 1992, 31(6): 707-717.
- [14] Werle P. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 1998, 54(2): 197-236.
- [15] Schilt S, Thévenaz L, Robert P. Wavelength modulation spectroscopy: combined frequency and intensity laser modulation[J]. Applied Optics, 2003, 42(33): 6728-6738.
- [16] Vurgaftman I, Bewley W W, Canedy C L, *et al.* Rebalancing of internally generated carriers for mid-infrared interband cascade lasers with very low power consumption[J]. Nature Communications, 2011, 2(1): 585.
- [17] Zheng C T, Ye W L, Li G L, *et al.* Performance enhancement of a mid-infrared CH_4 detection sensor by optimizing an asymmetric ellipsoid gas-cell and reducing voltage-fluctuation: theory, design and experiment[J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2011, 160(1): 389-398.
- [18] Li B, Zheng C T, Liu H F, *et al.* Development and measurement of a near-infrared CH_4 detection system using 1.654 μm wavelength-modulated diode laser and open reflective gas sensing probe[J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 2016, 225(7): 188-198.