

# 国产中红外量子级联激光多组分气体分析仪的 研制进展

谢光明<sup>1</sup>, 朱卫东<sup>2</sup>, 顾潮春<sup>1</sup>, 赵玲宝<sup>1</sup>, 赵建忠<sup>1</sup>, 黄金城<sup>1</sup>

(1. 南京霍普斯科技有限公司, 江苏 南京 210000; 2. 中国仪器仪表学会分析仪器分会, 北京 100085)

**摘要:** 简要介绍了中红外量子级联激光多组分气体分析仪的研发背景, 包括中红外激光多组分气体分析、中红外半导体激光器、量子级联激光器(QCL)、量子级联激光吸收光谱(QCLAS), 以及国内外中红外激光气体分析仪的技术应用. 重点以 HQLS-1000 为例介绍国产中红外 QCLAS 多组分气体分析仪及分析系统 QCL-CEMS 的研制, 包括阵列式 QCL 模块、长光程测量池及多组分激光驱动信号的分时复用设计技术等. 概要介绍了国产 QCL-CEMS 的系统集成技术及性能.

**关键词:** 中红外激光多组分气体分析; 量子级联激光器; 量子级联激光吸收光谱; 国产化

中图分类号: O657.38

文献标志码: A

文章编号: 1006-3757(2025)01-0069-08

DOI: 10.16495/j.1006-3757.2025.01.009

CSTR: 32263.14.j.1006-3757.2025.01.009

## Development Progress of Domestic Mid-Infrared Quantum Cascade Laser Multi-Component Gas Analyzer

XIE Zhaoming<sup>1</sup>, ZHU Weidong<sup>2</sup>, GU Chaochun<sup>1</sup>, ZHAO Lingbao<sup>1</sup>, ZHAO Jianzhong<sup>1</sup>, HUANG Jincheng<sup>1</sup>  
(1. NanJing Hopes Technology Company Limited, Nanjing 210000, China; 2. Analytical Instrument Branch of  
China Instrument and Control Society, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The development background of mid-infrared quantum cascade laser multi-component gas analyzer was briefly introduced, including mid-infrared laser multi-component gas analysis, mid-infrared semiconductor lasers, quantum cascade lasers (QCL), quantum cascade laser absorption spectroscopy (QCLAS), and the technological applications of mid-infrared laser gas analyzers both domestically and internationally. Focusing on HQLS-1000 as an example, it introduced the development of domestic mid-infrared QCLAS multi-component gas analyser and analysis system QCL-CEMS, including the arrayed laser module, long optical path cell, and the time-division multiplexing design technology for multi-component laser driving signals. The system technical features and measurement parameters of domestic QCL-CEMS were introduced.

**Key words:** mid-infrared laser multi-component gas analysis; QCL; QCLAS; domestic

中红外量子级联激光多组分气体分析技术的发展是基于中红外量子级联激光器(quantum cascade laser, QCL)的商品化、QCL 激光器模块的

阵列化及长光程测量池的应用, 使得中红外激光气体分析技术实现多组分气体的微量与痕量检测, 在环境污染、温室气体监测及工业过程分析中广泛应

收稿日期: 2024-10-14; 修订日期: 2025-01-22

作者简介: 谢光明(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事激光光谱技术和气相色谱技术的研究及国产化应用, E-mail: zhaoming.xie@hopes-tech.com

通信作者: 朱卫东(1943—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事现代分析仪器技术与应用研究, E-mail: zwd1943@163.com

用。目前,国内市场应用的激光多组分气体分析仪主要为国外进口,其中近红外激光气体分析仪无法检测在近红外光谱范围无特征吸收的组分,如  $\text{SO}_2$ 。而中红外激光多组分气体分析仪售价高,分析仪维护及售后不便。因此,国内用户急需国产化的中红外激光多组分气体分析仪。

## 1 中红外激光多组分气体分析与中红外半导体激光器介绍

近红外激光气体吸收光谱技术具有抗干扰性强、可实现长光程检测等优势,但其应用存在局限性:首先,近红外波段( $0.78 \sim 2.5 \mu\text{m}$ )对应气体分子的泛频吸收带,吸收系数比中红外基频吸收带低,导致对  $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$  等气体的检测灵敏度受限;其次,该波段仅覆盖含氢化学键的倍频吸收,导致  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等关键污染物无法检测。而中红外光谱区域内可检测的气体分子种类比近红外光谱多,且对应气体的吸收系数大多要比近红外区域高  $2 \sim 3$  个数量级<sup>[1-2]</sup>。因此,中红外激光气体分析技术具有更广泛的应用前景,特别是中红外激光多组分气体分析技术,是现代激光气体分析的新热点技术。

用于中红外激光光谱分析的激光器主要包括铅盐半导体激光光源、铽化物激光器、可调谐固体激光器、光参量振荡器(optical parametric oscillator, OPO)、差频激光器(difference frequency generation, DFG)等。然而,这些激光器存在显著局限性:铅盐半导体激光器需低温制冷(通常小于  $200 \text{ K}$ )且电光转换效率低;铽化物激光器在室温下辐射效率较低;OPO 和 DFG 虽能实现宽调谐,但需要泵浦源。此外,多数传统激光器难以实现单模分布反馈(distributed

feedback, DFB)输出,波长的快速调谐也存在技术瓶颈。随着 QCL 和带间级联激光器(interband cascade laser, ICL)的出现,显著突破了上述限制。常见近红外和中红外激光器的发射波长及供应商如图 1 所示<sup>[3]</sup>。

随着 QCL 的商品化及关键部件阵列式激光器模块与长光程气体测量池技术的应用,使得中红外激光气体分析突破了多组分气体的微量与痕量监测,检测极限可达  $10^{-6} \sim 10^{-9}$  级别,甚至  $10^{-12}$  级别。中红外激光多组分痕量气体检测技术,已突破了常规的一台激光气体分析仪只能检测一个组分气体的限制,使得激光光谱气体分析技术的应用拓宽。

### 1.1 量子级联激光器(QCL)

QCL 是一种基于半导体人工能带工程的革命性光源,1994 年诞生于美国贝尔实验室,其核心创新在于通过多级耦合量子阱结构实现电子能量的级联释放,彻底摆脱了传统半导体激光器对材料固有带隙的物理限制。QCL 的有源区由分子束外延(MBE)技术精准堆叠数百层纳米级异质结构成,电子在导带内子能级间逐级隧穿跃迁,每穿过一级量子阱释放一个光子,形成“单电子-多光子”的高效量子运输机制。这种设计使得输出波长由量子阱的几何参数和耦合强度调控,不再受激光材料的限制,QCL 技术被称为半导体激光器技术发展新的里程碑<sup>[1-2]</sup>。

QCL 按照结构特点分类,可分为法布里珀罗 QCL(Fabry-Perot QCL, FP-QCL)、分布反馈式 QCL(distributed feedback QCL, DFB-QCL)和外腔式 QCL(external cavity QCL, EC-QCL)三种类型。其中,FP-QCL 利用芯片的切割端面来形成激光腔

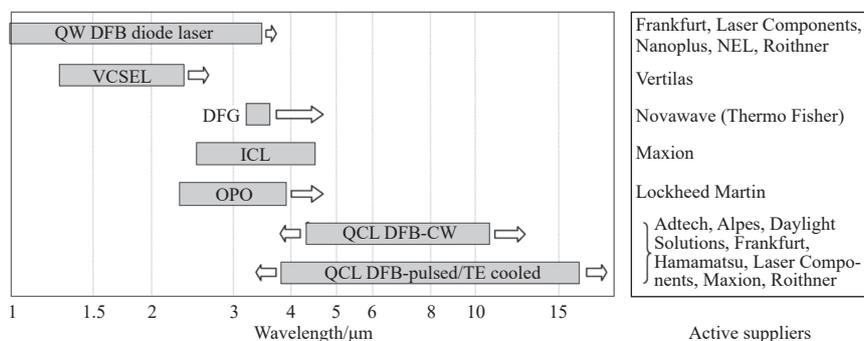


图 1 常见近红外和中红外激光器的发射波长及供应商(QW:量子阱,VCSEL:垂直腔面发射激光器,CW:连续波,TE:热电)<sup>[3]</sup>

Fig. 1 Active suppliers and emission wavelength of common near-infrared and mid-infrared lasers (QW: quantum well, VCSEL: vertical-cavity surface-emitting laser, CW: continuous wave, TE: thermoelectric)<sup>[3]</sup>

的 2 个反射表面, 由于所有波长均等反射在 FP-QCL 中, 因此芯片的增益分布中所有波长都可用于激光发射. DFB-QCL 在波导层中集成了衍射光栅 (通常位于有源区上方或下方). 这种光栅提供沿着波导长度分布的分布式反馈, 因此不再需要用于形成光腔的反射面. DFB-QCL 的光谱扫描方式, 可分为电流脉冲调谐光谱扫描和温度调谐光谱扫描. EC-QCL 将量子级联增益介质放置在外空腔中, 并可提供与波长相关的反馈, 可用作精密固定波长或宽可调激光器, 可以调整 QC 芯片的整个增益曲线, 允许可调谐范围: 10% ~ 25% 中心波长.

QCL 按照出光工作模式分类, 又分为脉冲式和连续波式. 以 DFB-QCL 为例: 一般情况下, 脉冲式 DFB-QCL 的线宽比连续式宽, 因此, 在特征峰 (指纹峰) 的选择上会受到限制, 从而会影响其检测下限. 在波长扫描调整方面, DFB-QCL 在连续波工作模式下, 可以通过控制温度和电流对波长进行扫描, 温度控制使用 TEC (thermoelectric cooler) 制冷进行慢调整, 电流控制对波长进行快速调整<sup>[4]</sup>. 而 DFB-QCL 在脉冲波工作模式下, 只能采用温度控制. 中红外激光分析应用大多以连续型为主. QCL 已实现在室温及低温下工作, 工作波长可覆盖中红外至 THz 区域, 范围为 2.63  $\mu\text{m}$  至 1.2 THz (250  $\mu\text{m}$ ), 具有高稳定性、单色性、窄线宽、高输出功率、长寿命等特点<sup>[5]</sup>.

## 1.2 量子级联激光吸收光谱分析 (QCLAS) 技术

量子级联激光吸收光谱分析 (quantum cascade laser absorption spectroscopy, QCLAS) 技术的原理: 通过直接改变 QCL 的工作温度或电流脉冲方式来实现起始波长的调节, 进而扫描被测气体得到一条或一簇吸收谱线的吸收光谱, 通过测量气体特定吸收谱线来反演气体浓度、温度和压强等参数, 其定量依据为朗伯比尔定律.

中红外激光吸收光谱的广泛应用, 是基于中红外光谱区域 (被称为“分子指纹区域”) 内涵盖了大量痕量气体的基频吸收带, 典型的气体分子红外吸收谱图如图 2 所示<sup>[6]</sup>. 随着中红外激光分析的关键器件 QCL 的商品化, 一台中红外 QCLAS 分析仪, 不仅可以用于高灵敏的单组分气体分析, 而且可以采用阵列式模块化激光器+长光程测量池实现多组分痕量气体分析. 特别适用大气环境气体监测、工业过程控制和分析、医疗和生物医学诊断及国防与安全等领域的微量和痕量气体检测.

## 2 国内外 QCLAS 分析的技术应用

### 2.1 国外 QCLAS 分析的技术应用

基于 QCL 的中红外吸收光谱分析技术, 主要有直接吸收光谱、波长调制吸收光谱、腔增强吸收光谱、腔衰荡吸收光谱、光声光谱等<sup>[7]</sup>. 因此, QCL 以其独特的优势成为激光气体分析的关键器件, 受

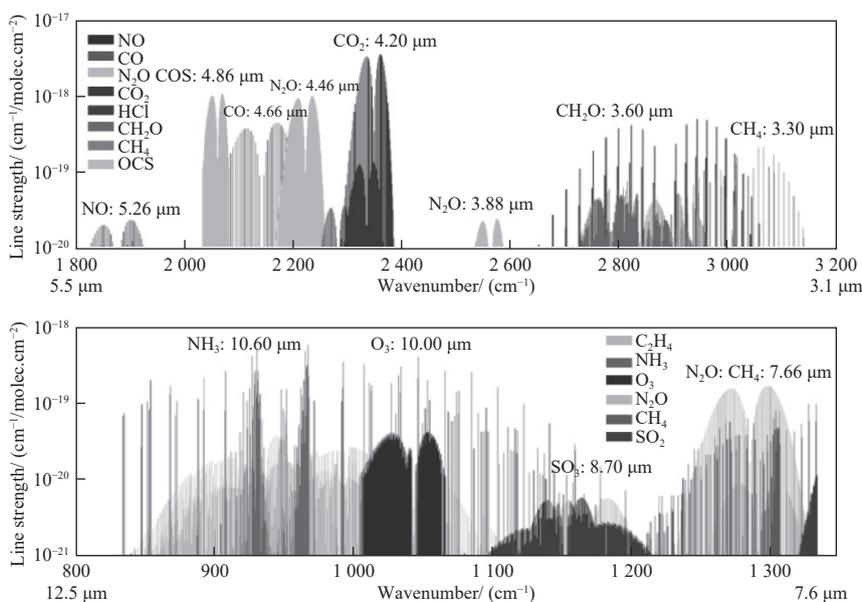


图 2 典型气体分子的中红外吸收谱图<sup>[6]</sup>

Fig. 2 Mid-infrared absorption spectra of typical gas molecules<sup>[6]</sup>

到很多企业的青睐. 基于 QCL 的 (包括直接吸收光谱和波长调制光谱等) 气体分析技术, 在痕量多组分气体检测领域已实现产业化应用, 主要的国外企业有 Emerson、NEO、Horiba、Aerodyne 等.

Emerson 开发的 CT5000 系列激光气体分析仪, 是一台多组量子级联激光器/可调谐二极管激光器(QCL/TDL)激光气体分析仪, 最多可配备 6 个激光器模块, 可同步测量多达 12 种组分(中红外 QCL:  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{NH}_3$ , 近红外 TDL:  $\text{O}_2$ 、 $\text{HF}$ 、 $\text{HCl}$  等), 测量范围  $10^{-6}$  级到 % 量级, 可用于过程气分析及烟气排放连续监测.

挪威 NEO 开发的中红外 LaserGas™ Q 系列激光气体分析仪, 可分析  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CF}_4$ 、甲醛等, 测量范围  $10^{-6}$  级到 % 量级, 可用于燃烧优化和排放控制.

Horiba 公司生产的 PLGA-1000 量子级联激光气体分析仪可测  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 、 $\text{CO}_2$  等组分, 测量范围从  $10^{-6}$  级可到 % 量级, 适用于石化行业测量石化过程中的碳氢化合物气体及其他气体.

Aerodyne 公司生产的单/双量子级联激光气体分析仪可以分析  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{COS}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等, 测量范围痕量  $10^{-12}$  级到  $10^{-6}$  量级, 主要用于环境质量、温室气体、稳定同位素、燃烧监测等.

## 2.2 国内 QCLAS 分析的技术应用

国内 QCLAS 的研究起步较晚, 目前研究单位以研究所和高校为主, 如中国科学院大连化学物理研究所、中国科学院半导体研究所、中国科学院安徽光学精密机械研究所、哈尔滨工业大学、重庆大学等, 已经取得许多重要的科研成果<sup>[8]</sup>.

国内企业南京霍普斯科技有限公司等已经可提供中红外 QCLAS 分析, 开发了基于中红外 QCL 的  $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_x$  等其他组分的激光多组分气体分析仪, 并试用于过程气监测及污染排放监测, 测量范围为  $10^{-6}$  级到 % 量级, 也可用于大气环境空气及温室气体监测, 如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  等.

## 3 国产化 QCLAS 多组分气体分析仪

以南京霍普斯科技有限公司研制的 HQLS-1000 型 QCLAS 分析仪为例, 介绍国产化 QCLAS 的研制及关键部件. 其设计基于中红外 QCLAS 技术, 采用模块化 QCL、多光源合束及长光程测量池增强吸收信号, 结合最小二乘浓度反演算法与光谱

数据库匹配, 实现高精度的激光光谱的单组分与多组分气体的检测, 多组分气体监测可同时检测  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  等组分, 气体组分的检测下限为  $10^{-6}$  级, 高灵敏度检测可达到  $10^{-9}$  级.

HQLS-1000 型 QCLAS 分析仪基于多组分气体激光仪器的设计技术, 主要采取阵列式激光器模块、独特的光路设计、多返测量池(Herriott)及软硬件光谱测量技术, 实现中红外激光多组分气体的高精度与微量在线测量. QCLAS 多组分气体分析仪的设计框图如图 3 所示.

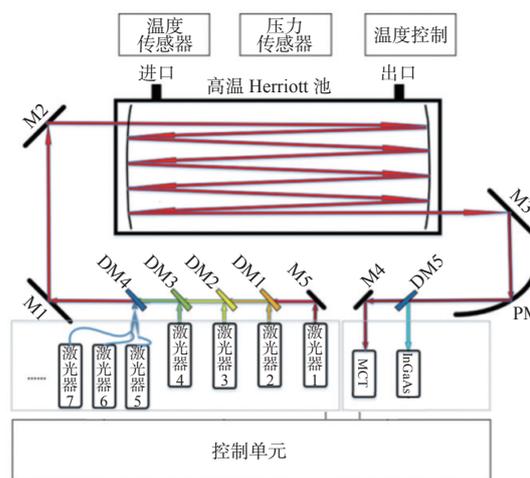


图 3 QCLAS 多组分气体分析仪的设计框图

Fig. 3 Schematic diagram of QCLAS multi-component gas analyzer

图 3 中, 由中红外 QCL 模块和/或近红外半导体激光模块发出的准直光束, 经镀金反射镜(M5)和二向色镜(DM1 ~ DM4)汇聚到镀金反射镜(M1), 后经镀金反射镜(M2)折转, 进入经精密控温控压的长光程测量池. 入射光束与待测物质相互作用后, 出射的中红外光束经镀金反射镜(M3)、抛物面镜(PM)、二向色镜(DM4)和镀金反射镜(M4)后进入中红外探测器模块(如 MCT), 经信号采集单元采集降噪放大处理直接信号后到控制单元, 直接信号换算成吸光度后, 经最小二乘浓度反演算法, 计算待测物质含量. 而出射的近红外光束在二向色镜(DM5)反射后进入近红外探测器模块(如 InGaAs), 经信号采集单元及控制单元后反演待测物质含量.

QCLAS 多组分气体分析系统(QCL-CEMS)是以 19" 机柜式 HQLS-1000 型 QCLAS 多组分气体分析仪为核心, 并集成取样处理系统等. 该系统包

括 QCLAS 多组分气体分析仪、样品取样处理模块、系统控制单元模块、辅助气单元模块及防护机柜等。最多可测 8~12 种组分, 试制样机已经在国内生物质新能源发电厂的烟气多组分气体监测得到应用。

## 4 国产化 HQLS-1000 型 QCLAS 的关键部件设计

### 4.1 QCLAS 的激光器模块

QCLAS 多组分气体分析仪的关键部分是 QCL 模块。QCL 模块包括单个 QCL 模块和阵列式 QCL 模块, 阵列式 QCL 模块的选用根据对多组分气体的检测需求设计。

#### 4.1.1 单个 QCL 模块

单个 QCL 激光器模块(如图 4 所示)的准直调节包括激光器和准直透镜, 可实现准直透镜在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向的微调, 从而保证激光器发出的激光束具有极小发散角。准直透镜固定支架的  $z$  轴方向安装交叉滚子滑轨, 可与微动调节旋钮配合, 提高  $z$  轴方向的调节精度、准确度, 调节的便捷性也大大增加。在  $xy$  平面上, 通过安装精密调节螺丝、波形弹簧和圆头圆柱销, 与准直透镜安装底座配合, 调节准直透镜在  $x$ 、 $y$  轴方向上的位置。这种设计可保证准直透镜仅在  $xy$  面上水平或竖直移动, 提高  $x$ 、 $y$  轴方向调节的精度和准确度。通过选用精密调节螺丝和精度高的螺牙牙距, 提高了调节的精度。

#### 4.1.2 阵列式模块

阵列式激光器模块最多可采用 8 个激光器, 可以兼容中红外 QCL 和近红外激光器。阵列式激光器模块中, 准直镜的固定与调节结构设计及其准直调节精度, 是实现多重激光器测量的关键。多个激光器组合采用阵列式的模块化封装技术, 并运用光学组件(二向色镜)将多个激光器发出的光束合并成单个光束。经过封装的阵列式激光器模块, 可根据需要拆卸、维修或更换, 不需要现场校准。阵列式激光器模块内置 QCL 专用驱动保护电路, 采用电压反馈恒流源与高频脉冲调制技术, 结合过流/过压保护, 可实时稳定驱动电流, 有效保护激光器避免损坏, 提高 QCL 激光器抗干扰能力。同时, 阵列式激光器采用分时复用技术, 低电平发光, 通过激光器分时脉冲驱动及模块 ID 设置, 以实现多种不同气体的激光吸收光谱分析。

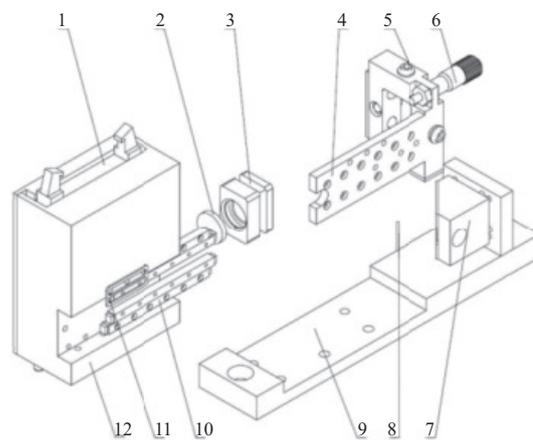


图 4 单个 QCL 模块示意图(其中:1-激光器主模块,2-准直透镜,3-透镜固定件,4-透镜调节支架,5-精密调节螺丝,6-微动调节旋钮,7-二向色镜固定件,8-二向色镜,9-底座,10-交叉滚子滑轨,11-透镜调节支架固定件,12-激光器安装座)

Fig. 4 Schematic diagram of single QCL module (1-laser main module, 2-collimating lens, 3-lens fixing mechanism, 4-lens adjustment bracket, 5-precision adjustment screw, 6-micrometric adjustment knob, 7-dichroic mirror fixing mechanism, 8-dichroic mirror, 9-base, 10-cross roller guide rail, 11-lens adjustment bracket fixture, 12-laser mounting base)

### 4.2 多组分气体驱动信号的分时复用

阵列式 QCL 模块的激光光谱驱动信号采用分时复用技术, 如图 5 所示, 以三激光器阵列为例, 各激光器按分时驱动, 低电平发光, 相邻激光器发光间隔时长( $T_{span}$ )相等, 各激光器发光时长独立, 发光周期及上述参数可通过现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)实时在线生成。激光器发光时长为 1 000 ns, 发光间隔 1  $\mu$ s, 发光周期自定义。

### 4.3 长光程赫里奥特池

被测气体浓度一定的情况下, 通过增加测量池的光程长度可以提高被测气体的检测灵敏度。为提高 QCLAS 气体分析仪的检测灵敏度, 测量池选用长光程赫里奥特池。赫里奥特池通过精密设计的凹面镜间距与入射角控制, 使激光光束在池内形成空间分离的离散光斑阵列。当窄线宽激光光源入射时, 相邻反射光斑的间距大于光束直径, 确保光斑间无空间重叠, 避免了激光的相互干涉, 从而避免了干涉噪音(标准具效应), 提高了信噪比。

QCLAS 的长光程赫里奥特池(主体尺寸和实

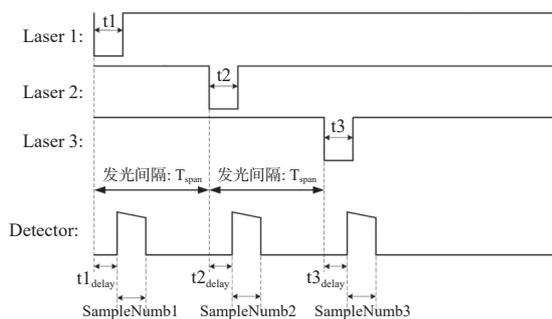


图 5 三激光器的分时复用示意图( $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  分别为三个激光器的发光时长)

Fig. 5 Schematic diagram of time-division multiplexing for three lasers

物如图 6 所示)采用两端入光/出光设计,左侧进光,右侧出光.两端反射镜采用镀金球面反射镜,同时金膜表面复镀一层贵金属膜,可以耐酸/碱腐蚀.测量池基长约为 250 mm,反射 42 次,有效光程 10.5 m,内部体积约 0.45 L.窗片一般采用 ZnSe,可保证测量池在常温及高温(如 180 °C)下同样适用.

## 5 国产 QCL-CEMS 的系统集成技术与性能

国产 QCL-CEMS 的设备外观如图 7 所示,型号为 PGCM-2001L. QCL-CEMS 主要集成采样探头、伴热管线、高温预处理单元(上箱)、分析单元(上箱、中箱)及电控单元(下箱)、辅助气单元(背箱)等部件.气体经过伴热管线和预处理后,进入分析单元,全程高温 180 °C,可分析  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_2(\text{ZrO}_2)$ .系统可接温压流在线监测系统,并可远程监测污染物因子排放浓度及分析系统的状态.

PGCM-2001L 型 QCL-CEMS 系统有标定、正常采样及维护三种状态.正常采样时,样气从烟道内被抽出,经过采样探头、过滤器、气阻、湿氧一体机,然后进入测量池,压缩气大部分作为喷射泵的动力气源,气量受比例调节阀控制,以保证测量池压力恒定,少部分用于分析单元持续吹扫.其技术特点与性能参数如表 1 和表 2 所列,适用于复杂背景组分的锅炉烟气超低排放的气体监测.

## 6 结论

QCLAS 具有高选择性、高灵敏度、快速响应等优点,已经在环境污染的微量与痕量温室气体监测、

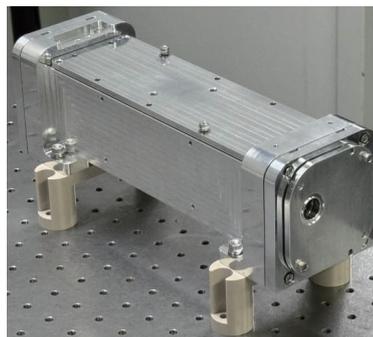
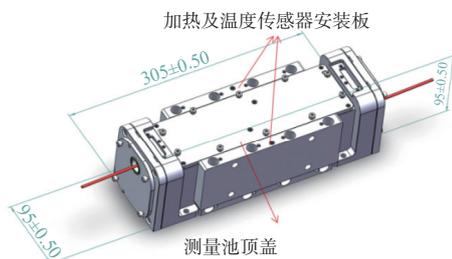


图 6 QCLAS 长光程赫里奥特池的主体尺寸和实物图  
Fig. 6 Main dimensions and real object of QCLAS long optical path Herriott cell



图 7 PGCM-2001L QCL-CEMS 系统外观  
Fig. 7 Appearance of PGCM-2001L QCL-CEMS

工业过程气体实时监测、危险物质检测与安全防护,以及医学诊断、食品与农业、基础科学研究等方面取得显著的研究成果<sup>[9-12]</sup>.

本文系统介绍了 HQLS-1000 型中红外量子级联激光多组分气体分析仪及其配套系统 QCL-CEMS 的研制进展,采用阵列式激光器模块、长光程赫里奥特池及分时复用驱动信号等技术,成功实现了国产化设备的开发与应用.

在技术层面, HQLS-1000 通过采用阵列式激光器模块(最多可集成 8 个激光器),结合光学合束技

表 1 PGCM-2001L QCL-CEMS 的技术特点  
Table 1 Technical features of PGCM-2001L QCL-CEMS

序号	特点	描述
1	抗干扰	QCLAS利用激光调制技术,使激光器仅扫描一个很小的光谱范围,激光器具有高单色性,平均线宽小于100 MHz,结合高速采集系统,QCLAS具有高光谱分辨率(通常 $0.001\text{ cm}^{-1}$ )
2	免标定	激光器稳定性好,结合在线光谱算法,使QCLAS可以适应不同条件下的气体测量,测量值随时间漂移小
3	多组分	运用阵列式QCL激光器模块,将多个光束组合形成单个光束,通过长光程测量池,可覆盖 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{HF}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 等气体,最多可测定12种组分
4	热湿法	允许在高达 $190\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下进行样品分析,气体预处理要求低
5	响应快	采用脉冲量子级联激光气体检测技术,激光脉冲快(最快可达 $100\text{ kHz}$ ),可以快速获取数据,实现连续在线气体分析
6	动态范围宽	QCL发射的光在中红外波段,可以进入许多分子的强基本吸收带.这使QCLAS具有极好的灵敏度;可以利用气体不同强度的吸收线提供了广泛的动态测量范围,范围从 $10^{-9}$ 到%水平

表 2 PGCM-2001L QCL-CEMS 的性能参数  
Table 2 Performance parameters of PGCM-2001L QCL-CEMS

技术参数	NO	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
量程	0~50 mg/m <sup>3</sup> 量 程可选	0~100 mg/m <sup>3</sup> 量 程可选	0~100 mg/m <sup>3</sup> 量 程可选	0~25%	0~20%
检测下限	$\leq 0.6\text{ mg/m}^3$		$\leq 0.2\%$	$\leq 0.2\%$	
噪音	$\leq 0.2\text{ mg/m}^3$		$\leq 0.05\%$	$\leq 0.05\%$	
响应时间	$T_{90} < 90\text{ s}$				
重复性	$< 1\%$				
零点漂移	$\leq \pm 2\%\text{ F.S.}$				
量程漂移	$\leq \pm 2\%\text{ F.S.}$				
测量池控温	$50\text{ }^\circ\text{C}/180\text{ }^\circ\text{C}$				
最大流量	2 000 mL/min				

术与分时复用驱动时序设计,实现了多组分气体的同步检测,检测下限可达 $10^{-9}$ 级别.长光程赫里奥特池(有效光程10.5 m)的应用显著提升了检测灵敏度,并通过精密控温控压设计保证了复杂工况下的稳定性.此外,国产QCL-CEMS系统集成了高温预处理、多组分分析及远程监控功能,可实时监测 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 等12种气体组分,满足生物质发电厂烟气超低排放监测的实际需求,其抗干扰性、免标定特性及快速响应能力( $\leq 90\text{ s}$ )已通过实际案例验证.

与国外同类产品相比,HQLS-1000填补了国产中红外激光气体分析仪的市场空白.然而,在激光器寿命、痕量检测极限(如 $10^{-12}$ 级别)及多场景适

应性方面仍需进一步优化.未来研究可聚焦于QCL芯片的国产化制备、多光谱融合算法的开发以及小型化、智能化系统的设计,以拓展其在医疗诊断、安全防护等新兴领域的应用.

#### 参考文献:

- [1] 刘文清. 环境光学与技术 [M]. 安徽: 安徽科学技术出版社, 2021: 88-170.
- [2] 温志渝, 王玲芳, 陈刚. 基于量子级联激光器的气体检测系统的发展与应用 [J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(8): 2043-2048. [WEN Zhiyu, WANG Lingfang, CHEN Gang. Development and application of quantum cascade laser based gas sensing system [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(8): 2043-2048.]
- [3] Hodgkinson J, Tatam R P. Optical gas sensing: a review [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(1): 012004.
- [4] 滨松光子学商贸(中国)有限公司. 量子级联激光器(QCL)在痕量气体检测中的应用及优势 [EB/OL]. <http://share.hamamatsu.com.cn/specialDetail/1852.html>.
- [5] 谭松. 应用于痕量气体检测的量子级联激光器研究 [D]. 北京: 清华大学, 2014. [TAN Song. Research on quantum cascade laser for its application in trace gas detection [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.]
- [6] Tittel F K, Lewicki R. Tunable mid-infrared laser absorption spectroscopy [M] // Semiconductor Lasers. Amsterdam: Elsevier, 2013: 579-629.
- [7] 张怀林, 吴涛, 何兴道. 基于QCL的红外吸收光谱技

- 术的研究进展 [J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(9): 2751-2757. [ZHANG Huailin, WU Tao, HE Xingdao. Progress of measurement of infrared absorption spectroscopy based on QCL[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(9): 2751-2757.]
- [ 8 ] 朱卫东. 现代在线分析仪器技术与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2022: 73-92.
- [ 9 ] Duan K, Wen D X, Ji Y B, et al. Quantum cascade laser absorption sensor for in-situ, real-time and sensitive measurement of high-temperature SO<sub>2</sub> and SO<sub>3</sub>[J]. [Spectrochimica Acta Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy](#), 2024, 309: 123864.
- [ 10 ] Wieman S T, Kapit J, Michel A P M, et al. Development of a quantum cascade laser absorption spectrometer for simultaneous measurement of <sup>13</sup>C-<sup>18</sup>O and <sup>18</sup>O-<sup>18</sup>O clumping in CO<sub>2</sub>[J]. [Rapid Communications in Mass Spectrometry](#), 2024, 38(16): e9836.
- [ 11 ] Zhou Z M, Shen C Y, Long W, et al. Simultaneous real-time detection of fractional exhaled nitric oxide and end-tidal carbon dioxide by quantum cascade laser absorption spectroscopy[J]. [Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy](#), 2024, 308: 123750.
- [ 12 ] 朱卫东. 碳监测与温室气体监测技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2024: 120-260.