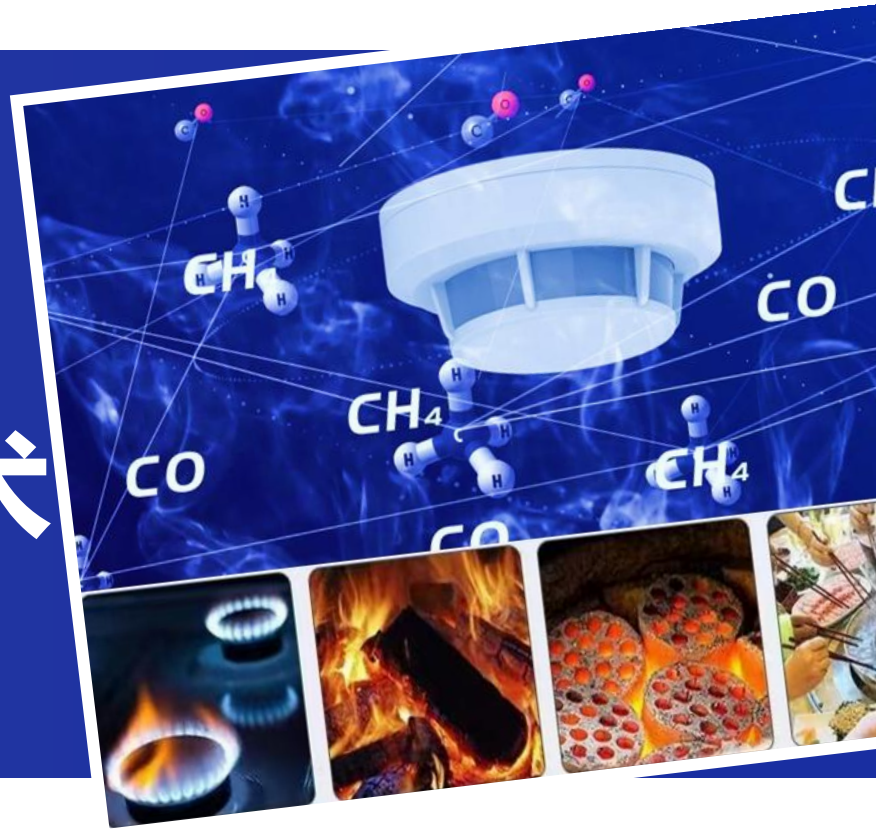
面向燃气安全监测的中红外半导体激光TDLAS技术



报告人:张贺　2026年10月22日

长春理工大学 半导体激光全国重点实验室

汇报内容

01 半导体激光全国重点实验室

02 高精度气体检测研究背景

03 中红外半导体激光器研究

04 多组分气体检测系统研制

05 结论与展望

汇报内容

01 半导体激光全国重点实验室

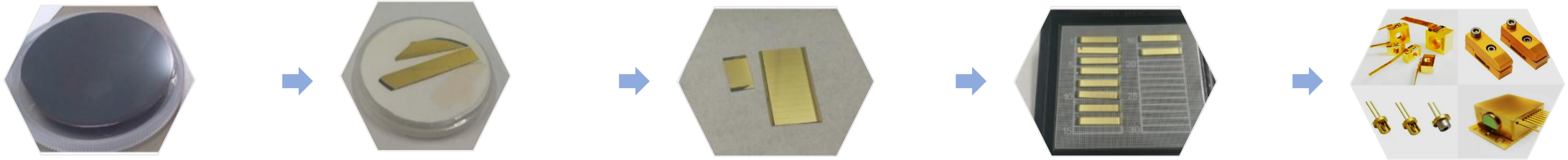
02 高精度气体检测研究背景

03 中红外半导体激光器研究

04 多组分气体检测系统研制

05 结论与展望

半导体激光器体积最小、寿命最长、效率最高、波长覆盖最广



高功率半导体激光

依托长春理工大学建设
发展高功率半导体激光技术

1993年 批复建设

1997年 正式运行

1998年 对俄技术引进

2002~2015年 条件提升建设

2015~今 平台完善与成果应用

- 发表高水平SCI论文706篇
- 获授权发明专利185项



- 国家科技进步二等奖 1 项
- 省部级奖励 16 项









长春理工大学牵头联合南开大学和中国科学院苏州纳米所

调整为半导体激光全国重点实验室



郝 群
实验室主任

面向装备需求
开展半导体激光技术研究





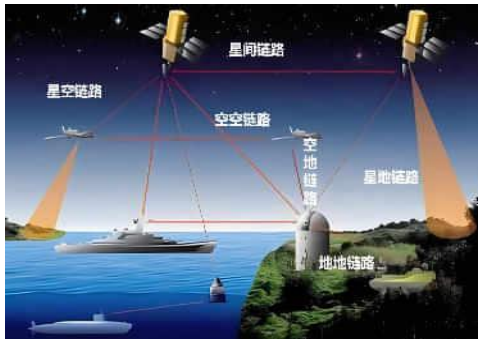


激光制导



远程精准 移动目标 高效毁伤

激光通信



全时全域 海量传输 超远距离

激光传感



复杂场景 电磁拒止 隐身目标

汇报内容

01 半导体激光全国重点实验室

02 高精度气体检测研究背景

03 中红外半导体激光器研究

04 多组分气体检测系统研制

05 结论与展望

2.1 燃气应用场景对气体监测提出多样化需求



燃气管线巡检·浓度异常监测

燃气输配储运

泄漏初期浓度较低
微弱异常难以及时感知



天然气泄漏·生物源排放

不同来源气体辨识

不同原因均可能增加CH_4 浓度仅凭单一组分难以准确区分



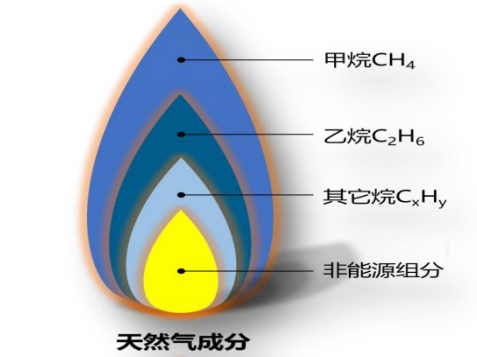
温度变化·环境扰动

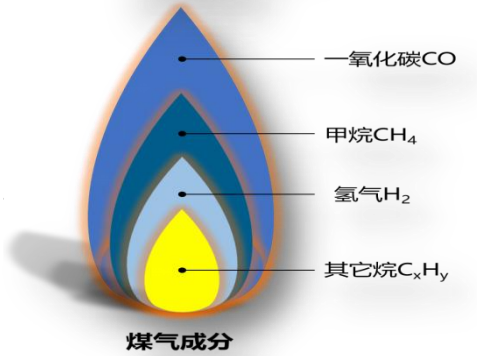
复杂现场工况

温度、压力、气流等条件变化，增加连续测量与稳定检测难度

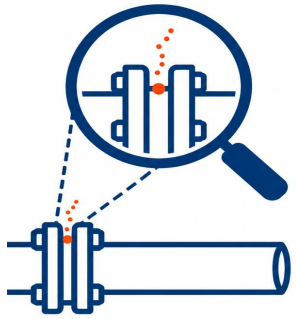
燃气输配储运、不同气体来源辨识及复杂工况监测，涉及多样化的气体感知任务；微弱泄漏、单一组分信息有限及现场环境变化，对气体检测提出不同挑战。

2.2 复杂工况下高精度气体检测面临挑战

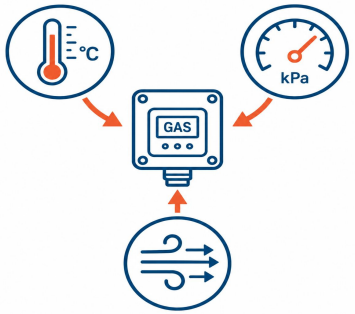




气体组分多样



目标信号微弱



环境干扰复杂

高灵敏度

痕量目标
灵敏感知

高选择性

多重组分
准确识别

高精度

气体浓度
准确测量

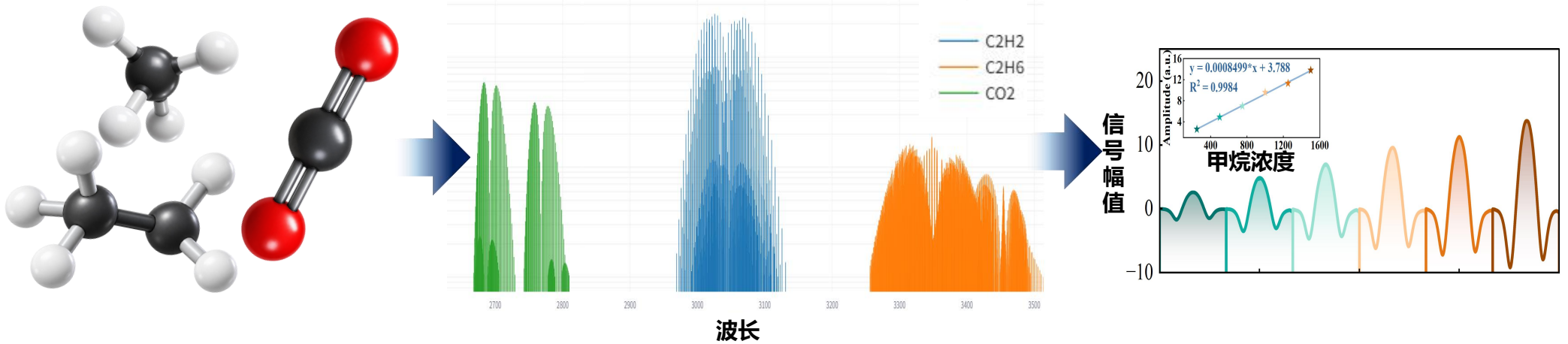
长期稳定

复杂工况
稳定运行

低浓度信号微弱、气体组分共存及环境因素扰动增加了准确检测的难度
对气体监测的灵敏度、选择性、测量精度和运行稳定性提出了要求。

2.3 气体特征吸收为组分识别与浓度测量提供依据

如何从混合痕量气体中准确识别目标组分，并获得浓度信息?



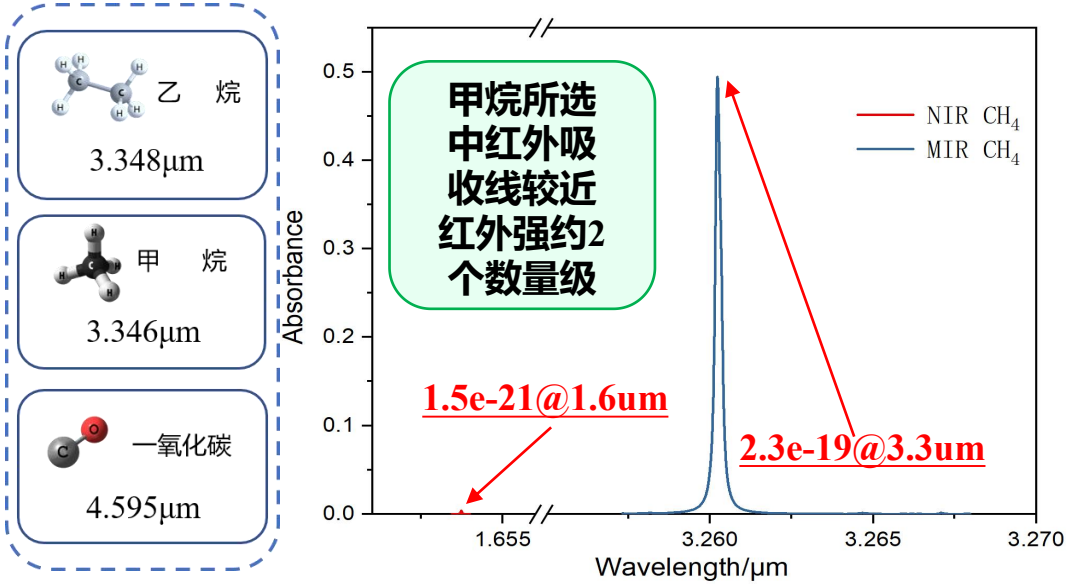
吸收位置与形状
提供组分识别依据

吸收信号强度与浓度相关
提供浓度定量依据

不同气体具有各自的特征吸收，可利用光谱信息识别目标组分；
气体吸收信号强度与浓度相关，为浓度定量测量提供物理依据。

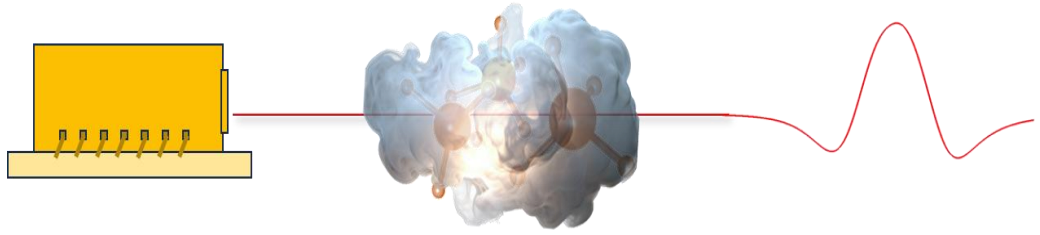
2.4 中红外TDLAS为高性能气体检测提供技术路径

中红外：特征吸收优势



更强特征吸收
有利于提升低浓度气体检测灵敏度

TDLAS：选择性光谱测量



扫描谱线 → 吸收响应 → 浓度反演

目标谱线扫描

光谱信号解调

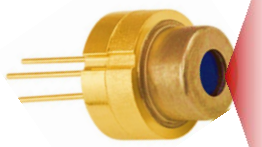
快速连续监测

多组分检测拓展

为提高微弱气体信号的检测灵敏度，可选择具有较强特征吸收的中红外波段；
结合TDLAS的可调谐激光扫描与光谱测量，可开展快速、连续的气体检测。

2.5 面向燃气应用的中红外光源与TDLAS系统关键技术研究

半导体激光器核心需求



- 中红外波段覆盖
- 窄线宽
- 可调谐
- 小体积

TDLAS检测系统核心需求

- 噪声与干扰抑制
- 高精度检测
- 多组分检测
- 高集成度



围绕应用于燃气安全监测的中红外TDLAS高灵敏、高精度气体检测技术开展半导体激光光源性能提升与检测系统抗干扰、多组分测量等研究。

汇报内容

01 半导体激光全国重点实验室

02 高精度气体检测研究背景

03 中红外半导体激光器研究

04 多组分气体检测系统研制

05 结论与展望

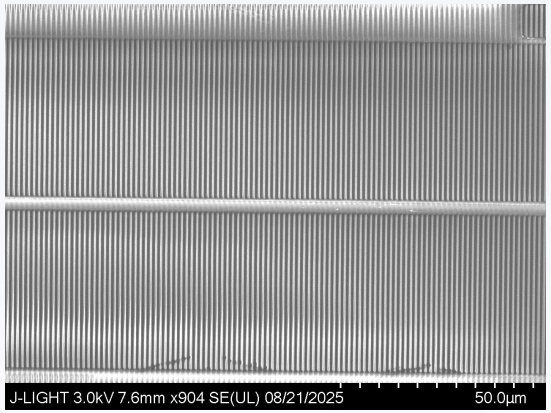
3 自研中红外激光器的主要难点与解决思路

要解决的问题	我们的工作	对燃气监测的意义
不同气体需要不同波长	设计和研制多个代表波段的激光器	让光源匹配目标气体
器件小，整套光学系统仍然大	发展微腔激光器与集成封装	为便携设备提供器件基础
出射光容易发散、光斑不规则	用超表面调控光束	便于光路耦合与系统集成

围绕波段覆盖、器件尺寸与光束质量改进核心光源，
使光源更好地匹配目标气体，并为便携检测与系统集成提供基础。

3.1 自研激光器实现多个中红外代表波段

2.33 μm
锑化物激光器



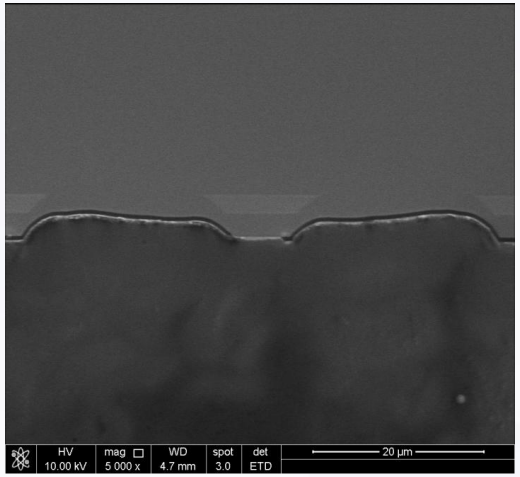
光栅结构显微图

连续输出 5 mW

25°C，线宽约 20 MHz

气体：甲烷、一氧化碳

4.78 μm
量子级联激光器



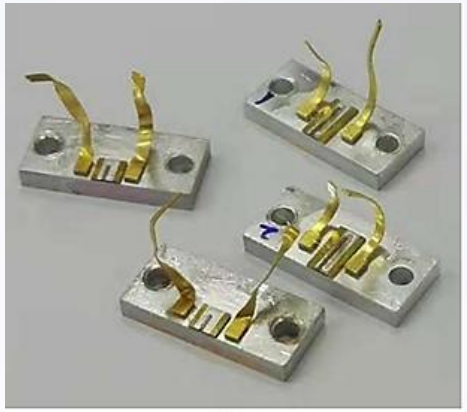
材料截面显微图

连续输出最高 3 W

室温，F-P 腔器件

气体：一氧化碳

8 μm
量子级联激光器



(b)

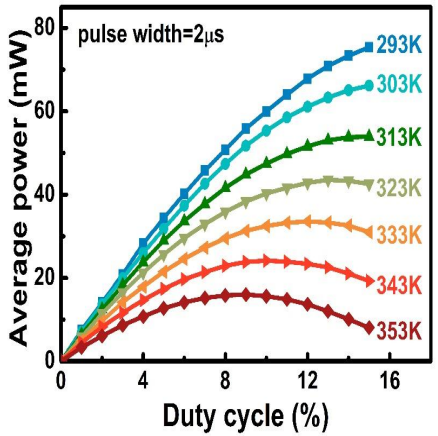
封装器件实物

连续输出 401 mW

283 K（约 10°C）

气体：甲烷

14.2 μm
量子级联激光器



功率与占空比测试

平均功率 75 mW

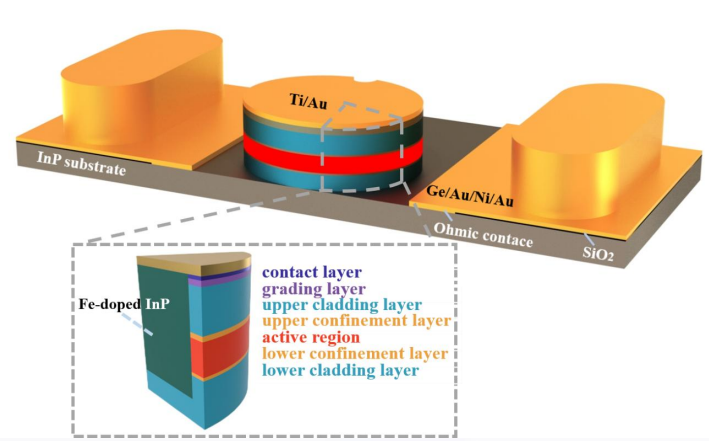
293 K，15% 占空比，脉冲

气体：乙烯

围绕不同气体的吸收特征，研制多个中红外代表波段的激光器，展示器件结构、封装形式及输出性能，为多气体检测提供光源选择。

3.2微腔激光器为小型化检测提供器件基础

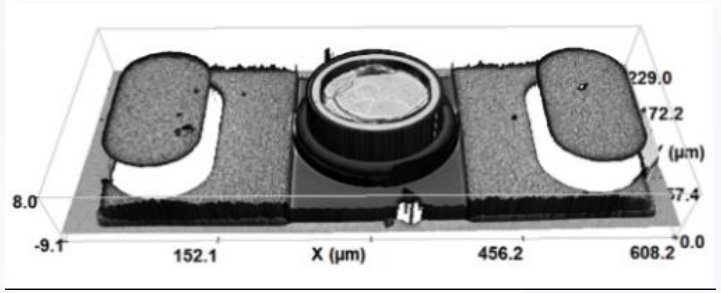
微型腔体结构

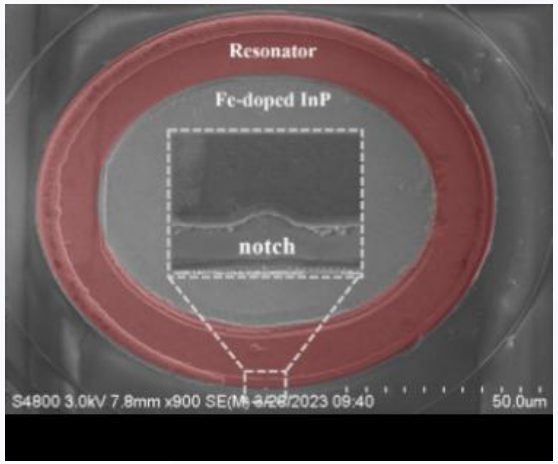


72 μm × 60 μm

谐振腔长轴仅 **0.072 mm**

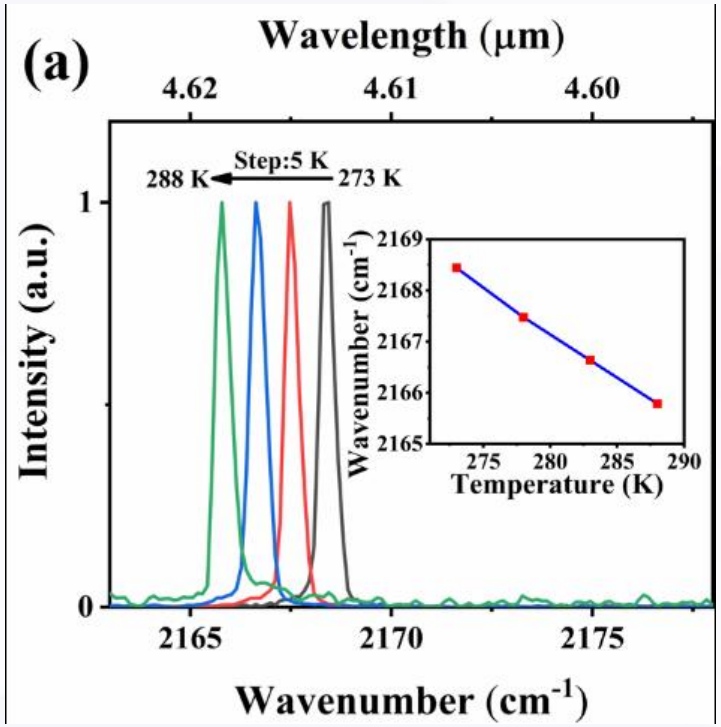
加工后的器件实物





完成微腔加工与器件封装

温度变化时的出光测试



273–288 K 测试中
保持单峰输出

微腔设计减小谐振腔尺寸，且在273–288 K测试中保持单峰输出，为紧凑集成和检测光源小型化提供器件基础。

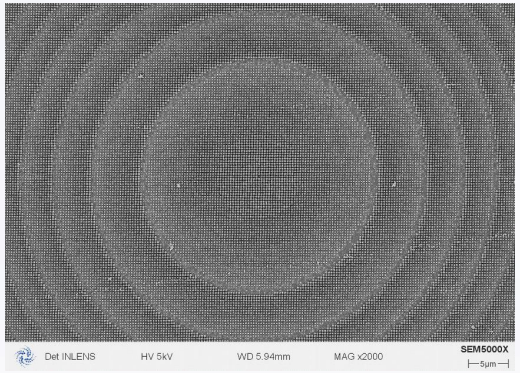
3.3超表面光束整形与光路耦合



平面超透镜与传统透镜

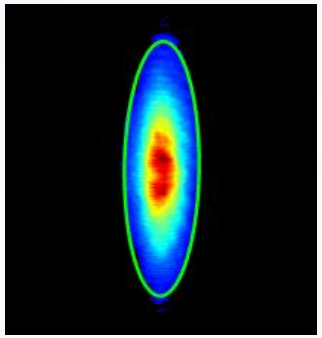
原始光束发散大、光斑不规则，
增加光路收集与对准难度。

通过两级超表面调控出光：
先减小发散，再改善光斑圆度



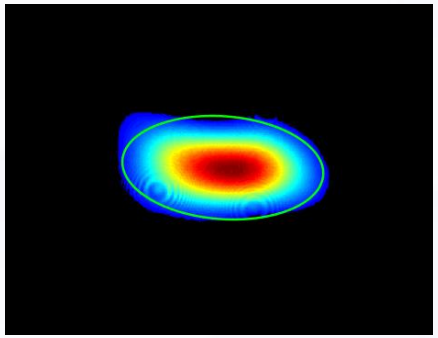
已制备4.6 μm硅基超表面

原始光束



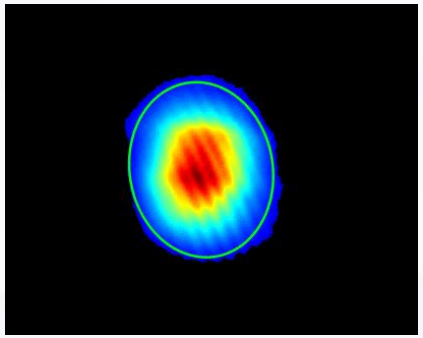
37.3° / 11.4°
椭圆度0.29

第一级超表面后



0.25° / 0.50°
椭圆度0.51

两级超表面后

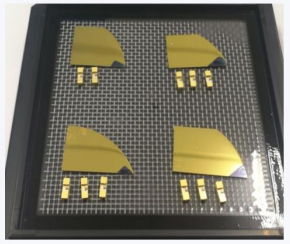


0.28° / 0.30°
椭圆度0.82

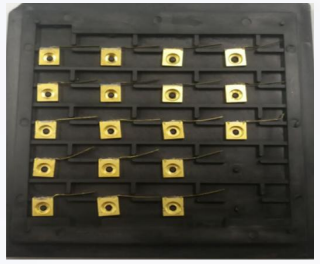
第一级超表面压缩发散，第二级主要改善光斑圆度，
获得更易耦合至气室的近圆形光束，为检测光路的小型化与集成提供基础。

3.4 中红外半导体激光器研发能力

具备2微米锑化物、4-14微米级联激光器研发能力



巴条



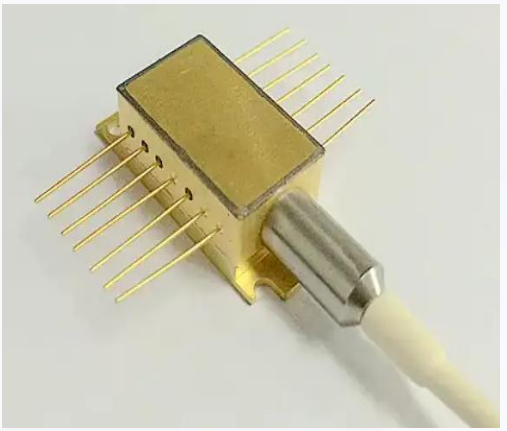
C-mount



高热负载封装



TO封装



蝶形封装

目前已具备锑化物与量子级联激光器研发能力，形成巴条及多种封装形式，为不同检测系统的光源集成提供器件基础。

汇报内容

01 半导体激光全国重点实验室

02 高精度气体检测研究背景

03 中红外半导体激光器研究

04 多组分气体检测系统研制

05 结论与展望

4 燃气检测的现存问题与我们的解决办法

现场干扰会影响读数，我们从信号处理和测量方法入手

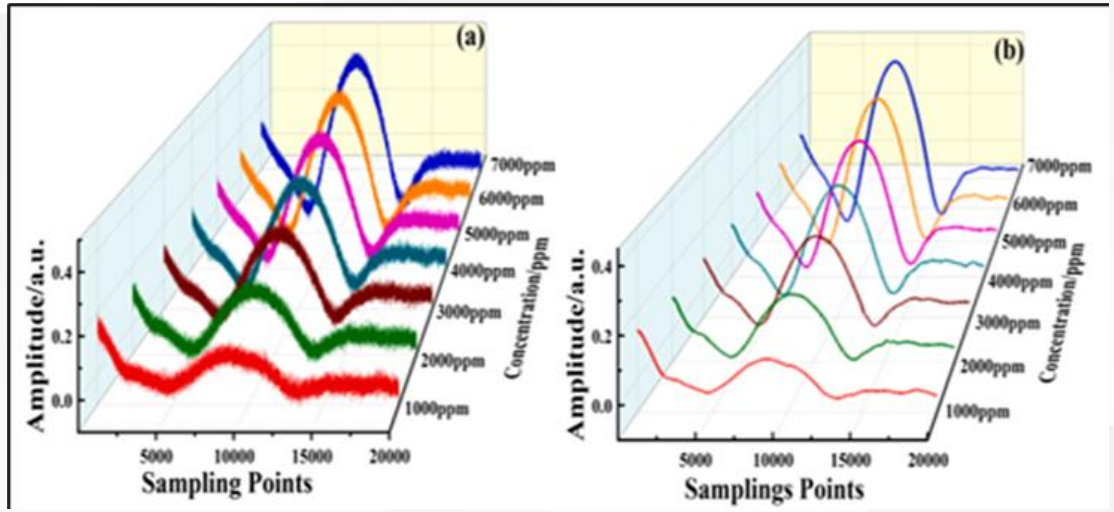
现存问题	我们的解决办法	取得的效果
气体信号弱，杂音多	识别噪声并保留有效波形	微弱信号更清楚
多种气体相互干扰	交替调制，模型分辨组分	甲烷、乙烷分别读出
温度变化影响浓度	利用多种波形特征，联合估算浓度与温度	降低变温测量误差
算法运算等待长	自动选参，改进分解结构	更快得到计算结果

针对噪声、组分串扰、温度变化和计算耗时，分别改进信号处理与测量方法，并通过实验和整机测试验证效果。

4.1 信号降噪与快速分解

CEEMDAN-EP-WTD 复合降噪

引入噪声评估参数，指导小波阈值处理，
提高弱吸收信号的信噪比。

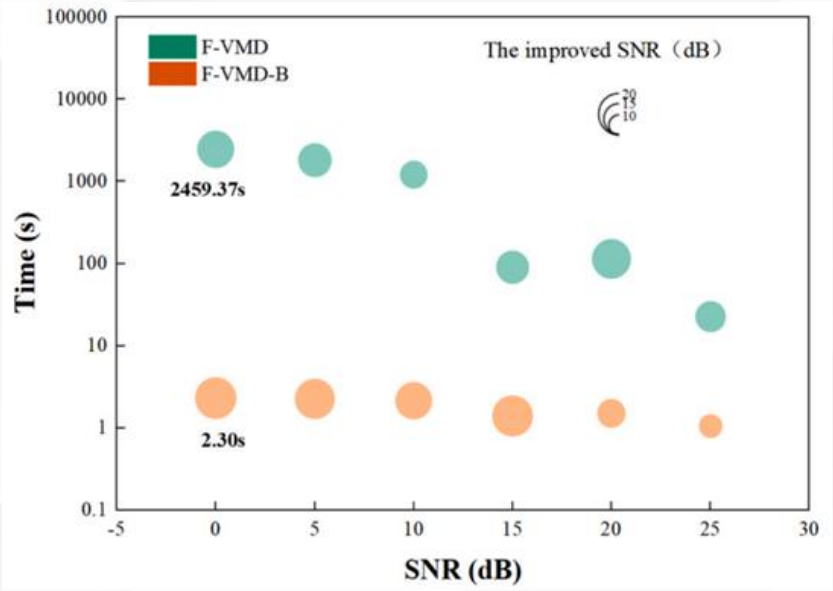


信噪比

4.41 dB 提高至 28.86 dB

Feature-VMD-Binary 快速分解

基于信号特征自适应选参，结合二元分解，
在相同降噪效果下缩短运算时间。



同等降噪效果的对比工况

约 41 分钟缩短至 2.30 秒

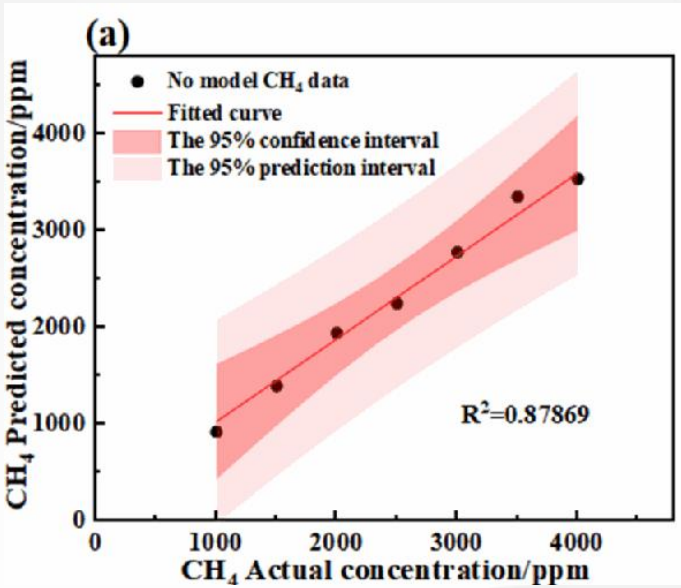
Infrared Physics & Technology 141 (2024) 105466；Analytical Chemistry 2025, 97(33), 18177–18187

采用复合降噪提高有效信号质量，并通过特征选参与二元分解缩短运算时间，分别改善气体信号的可读性和计算效率。

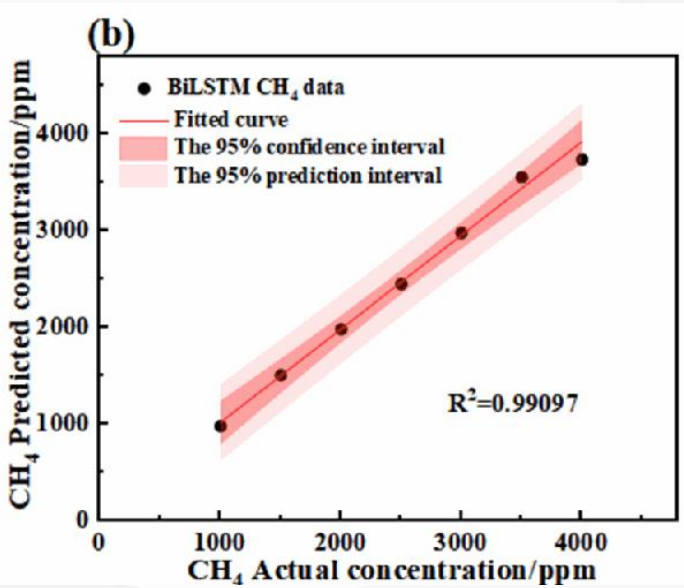
4.2 双组分气体解耦检测

采用交替调制与 BiLSTM 光谱解耦模型，分辨两种气体的重叠信号，提高甲烷、乙烷浓度预测的一致性。

甲烷：引入模型前



引入模型后



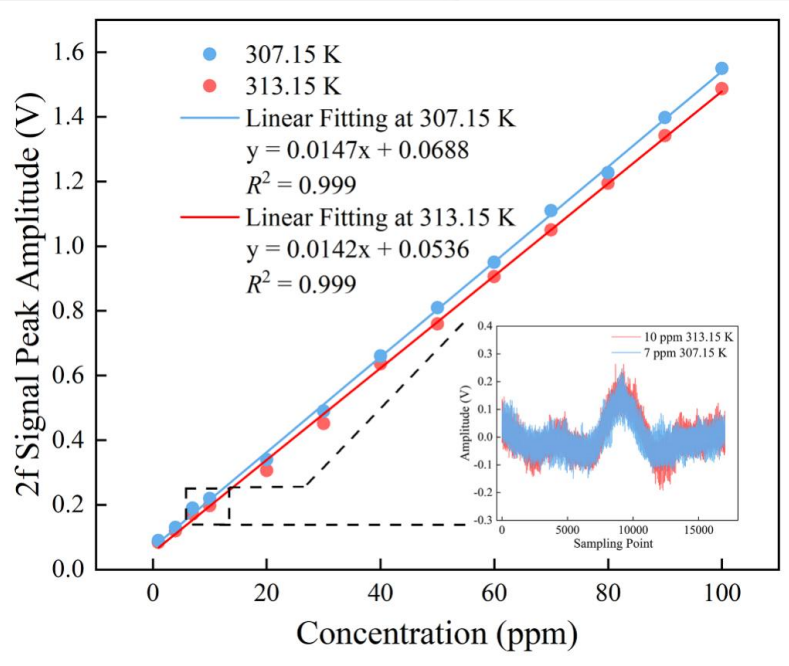
气体	原方法 R^2	加入模型 R^2
甲烷	0.87869	0.99097
乙烷	0.98947	0.99819

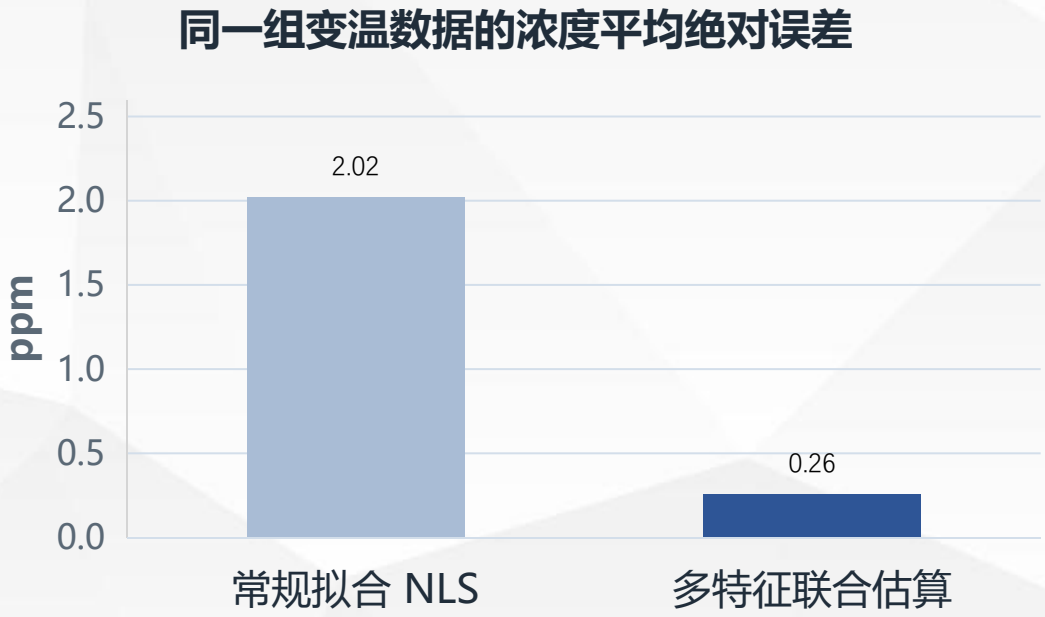
两种气体的预测结果与已知浓度更一致

交替调制优化双气体信号，BiLSTM模型分辨重叠吸收，提高甲烷、乙烷在混合气体中的浓度预测一致性。

4.3 浓度与温度联合反演

采用多特征粒子滤波算法，融合单条 2f 信号的幅值与宽度等特征，
联合反演浓度和温度，提高变温条件下的测量准确度。



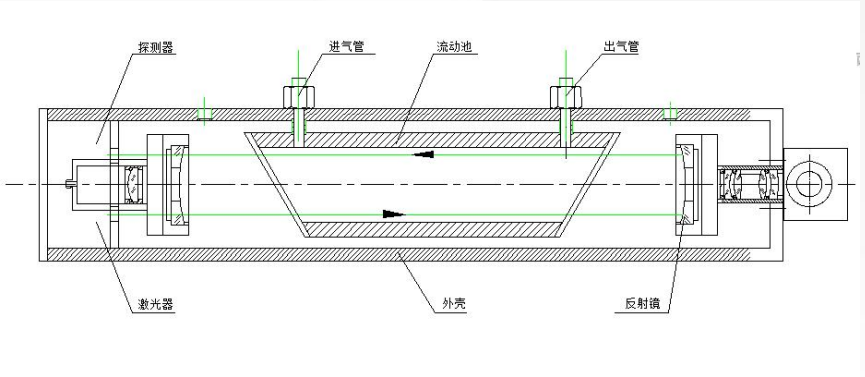


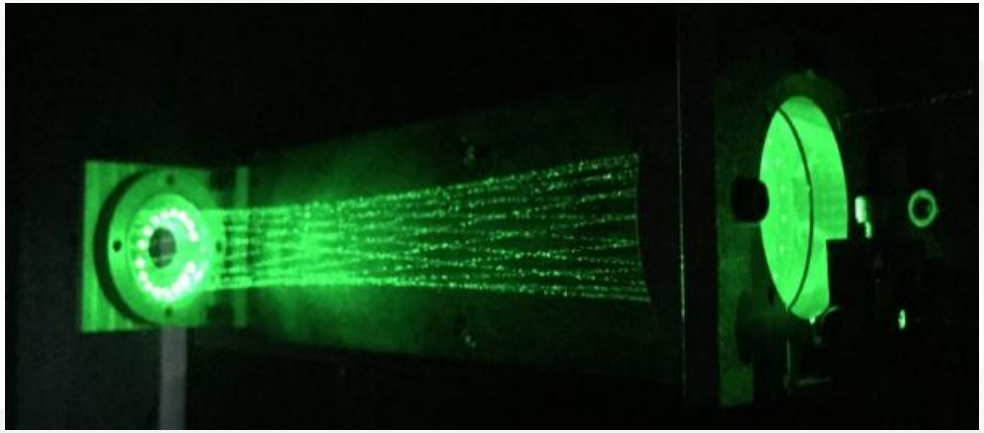
在验证范围内：浓度误差 < 0.5 ppm，温度偏差约 2°C 以内

利用同一条2f信号的多种特征联合反演浓度与温度，减小变温误差，
将浓度平均绝对误差由2.02 ppm降至0.26 ppm。

4.4 多波长共光路检测系统

采用多波长共光路设计，将多路激光耦合至同一气室，实现多组分高精度测量。





检测气体	24 h 精度
甲烷 CH_4	0.08 ppb
二氧化碳 CO_2	0.05 ppm
一氧化碳 CO	0.08 ppb
水汽 H_2O	30 ppm

自研光源与整机系统
形成多组分测量能力

多路激光共用气室与传播光路，实现甲烷、二氧化碳、一氧化碳和水汽测量，并通过24小时测试验证整机精度。

4.5 燃气巡检平台集成

将激光检测模块与移动载体集成，形成适应不同空间的燃气巡检装置。



车载巡检



背包巡检



单车巡检



无人机挂载

技术指标	指标参数
检测方法	红外激光光谱技术
检测气体	甲烷、乙烷
灵敏度	CH_4： <1ppbv C_2H_6： <0.5ppbv
检测范围	CH_4：10ppb-10,000ppm C_2H_6：1ppb-1000ppm
气体响应	上升/下降时间 (10–90% / 90–10%) < 3s

甲烷灵敏度 <1 ppbv
乙烷灵敏度 <0.5 ppbv
气体响应时间 <3 s

将激光检测模块与多种移动载体集成，
形成车载、背包、单车及无人机等巡检装置，适应不同空间的燃气检测需求。

汇报内容

01 半导体激光全国重点实验室

02 高精度气体检测研究背景

03 中红外半导体激光器研究

04 多组分气体检测系统研制

05 结论与展望

中红外激光器：具备2-14微米中红外激光器能带设计-材料外延-器件工艺-封装测试完整链条研发能力

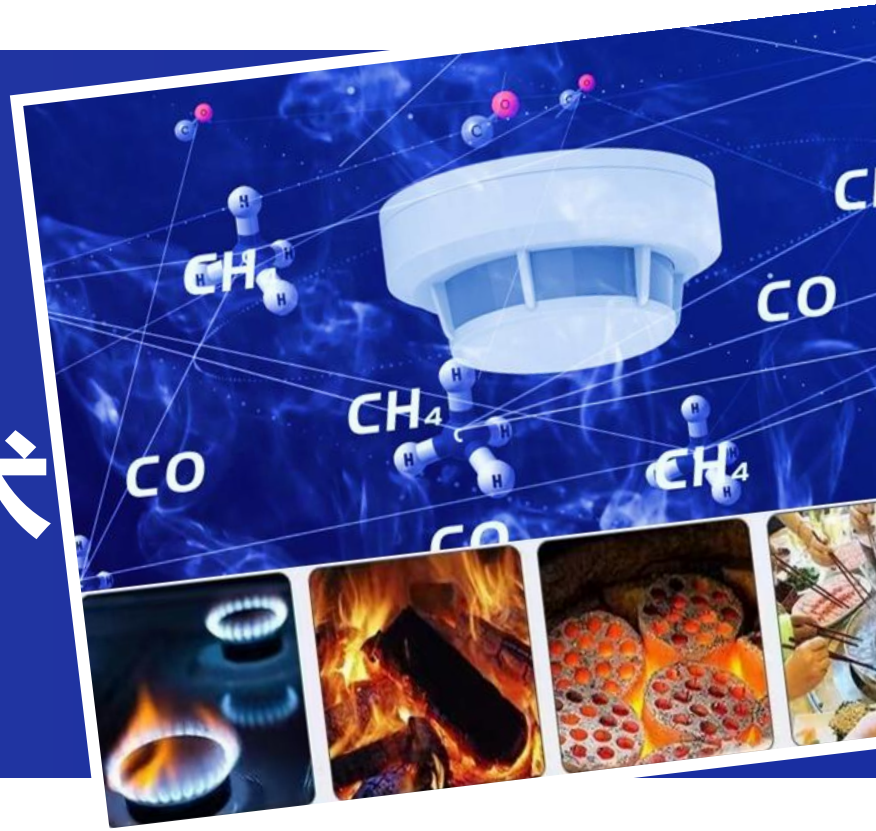
TDLAS系统：具备TDLAS系统搭建，多组分检测算法开发，分频、滤波和噪声去除技术

提升器件工艺稳定性与可靠性，推进中红外激光器产品化

开展系统智能化、小型化、多组分化与平台化开发

实现自研光源的高精度多组分气体检测TDLAS系统

面向燃气安全监测的中红外半导体激光TDLAS技术



报告人:张贺　　2026年10月22日

长春理工大学 半导体激光全国重点实验室

谢　　谢



合作者：刘俊岐研究员



半导体激光全国重点实验室

团队成员：张贺、唐吉龙、李科学、贾慧民、牛守柱、高旭等



军委科技委

