

2025 年度山西省科学技术发明奖拟提名项目公示内容

项目名称：超灵敏腔增强激光气体检测技术及应用

提名者：山西大学

提名意见：

本项目面向环境监测、“双碳”战略、核电安全及石油天然气等领域对超灵敏痕量气体检测装备的需求，围绕腔增强激光光谱技术在工程应用中存在的激光-腔耦合效率低、半导体激光与腔频率锁定难、光学干涉噪声影响探测灵敏度等关键瓶颈开展系统攻关，形成了光学反馈线性腔增强/腔衰荡光谱技术、光电协同频率锁定与线宽压窄技术、多机制协同噪声抑制技术及超灵敏气体分析装备等多项成果。仪器装备已在生态环境部卫星中心、中广核阳江核电站、中石化、中海油、唐山燃气等数十家单位应用，服务于“碳达峰、碳中和”、“安全有序发展核电”等国家战略。

申报材料完整、客观，所附专利、查新报告等材料有效，应用证明及其他相关附件材料可信。

拟提名山西省科学技术奖（技术发明类）一等奖。

项目简介：

本项目属于物理与天文学领域。针对环境监测、“双碳”战略、核电安全及石油天然气等领域对 ppb 量级及以下浓度痕量气体检测的重大应用需求，发展多种腔增强激光光谱关键技术，提升技术的噪声抑制能力、灵敏度以及应用性。线性法布里-珀罗（FP）光学腔（由两块高反射镜构成）具备损耗低、结构简单、模式单一等固有优势，成为腔增强激光光谱技术中理想的核心光学腔结构。然而，其在应用中存在的激光-腔耦合效率低，半导体激光与腔的频率锁定难、光学干涉噪声对探测灵敏度影响大等技术瓶颈，严重制约着气体检测性能的提高。为此，项目团队历经多年技术攻关，聚焦上述关键问题，系统开展了腔增强激光痕量气体检测技术研究，在有效提升检测灵敏度的同时，显著增强了方法的实用性与适用范围，主要创新成果如下：

1.发明了新型线性腔增强激光光谱测量技术

提出了半导体激光线性腔光学反馈新理论，发展了常规半导体激光噪声抑制新方案，解决了半导体激光与高精度光学腔耦合效率低的问题；结合无效

腔模抑制的新方法，发明了完全模式匹配下的光学反馈线性腔增强吸收光谱技术和光学反馈线性腔衰荡光谱技术。

2.发明了线性腔光学反馈线宽压窄及频率锁定技术

发展了光学反馈与电学反馈相结合的半导体激光到高精细度线性光学腔频率锁定的新技术，实现了量子级联激光线宽由 MHz 压窄到了 Hz 量级，最大噪声抑制比优于 60 dB，解决了中红外波段精密光谱测量缺乏高性能光源的问题；实现了 GHz 量级线宽的半导体激光到 kHz 线宽线性腔模的连续频率锁定。

3.发展了腔增强激光光谱多噪声抑制技术

提出了多噪声抑制机制协同的光学干涉效应抑制新方法，发展了腔位置调制及平衡探测腔增强光谱技术，获得了 $2.3 \times 10^{-13} \text{ cm}^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$ 的光谱探测能力，达到了散粒噪声极限水平，最优探测灵敏度为 $2.2 \times 10^{-14} \text{ cm}^{-1}$ ，经文献比对达到世界最高纪录。

4.研制了多种超灵敏线性腔增强气体分析装备

基于上述技术革新，研制了系列超灵敏痕量气体检测装备，在环境检测、“双碳”碳监测、石油天然气、核电以及本科教学等领域实现了重要应用：① 研制的高精度痕量气体激光光谱检测设备，已应用到了生态环境部卫星中心、中科院大气所、唐山燃气、华润燃气等多家单位，为环境监测及燃气泄露提供了高质量的数据。② 研制的高精度 $^{13}\text{CO}_2$ 激光光谱分析仪在中石化、中海油实现了批量应用，有效支撑了井中石油成因、储量及地层能量变化的分析。③ 研制的高灵敏放射性 $^{14}\text{CO}_2$ 激光光谱分析仪已作为“国内核电系统首台引入的在线放射性 $^{14}\text{CO}_2$ 流出物分析装备”被应用到中广核阳江核电站。④ 研制的腔衰荡光谱气体检测演示仪器具备可拆解、多参数可调等功能，匹配物理学类本科专业高阶物理实验的培养目标，已应用于哈尔滨工业大学物理学院、浙江师范大学物理与光电工程学院等高校的本科教学过程。

本项目授权中国发明专利 20 项，其中 2 项实施了转化，在 *Sensors and Actuators B*、*Analytical Chemistry*、*Optics Letters* 等重要杂志上发表论文 65 篇。

客观评价：

科技成果评价：中国光学学会组织的科技成果评价认为，项目成果面向国家重大需求，研制的腔增强光谱气体分析技术及相关气体检测设备创新性强、

自主可控，整体达到国际先进水平，其中探测灵敏度、中红外激光线宽关键指标国际领先。

用户评价：苏州冠德能源科技有限公司评价“2021 年起，基于山西大学激光光谱研究所马维光教授、赵刚副教授团队的超灵敏腔增强激光光谱技术，相继开发出高精度 CH_4 、 CO_2 、 $^{13}\text{CO}_2$ 、 CO 、 NH_3 、 C_2H_6 气体激光分析仪及核用（高丰度）高灵敏 $^{14}\text{CO}_2$ 激光光谱分析仪等系列产品，并实现市场化销售。”

用户评价：北京普瑞亿科科技有限公司评价“相关产品为环境监测及燃气泄露检测提供了高质量的数据，保障了碳排放数据监测的准确性，提升了燃气管道传输的安全性。”

用户评价：蓝盾电子股份有限公司评价“相关技术及产品为环境监测提供了关键的数据支撑，实现了进口仪器的有效替代。”

用户评价：哈尔滨工业大学物理学院评价“该仪器具备高灵敏度的气体检测能力，可实现对 CO_2 、 CH_4 等温室气体的定量检测。其设计突出教学性与可操作性，采用可拆解结构，光路清晰可见，关键参数可调节，便于学生直观理解腔衰荡光谱技术的原理与系统构成，增强了实验的探究性与设计性。结合课程大纲，学生可在教师指导下自主搭建光路、调节参数、开展气体浓度检测实验，有助于培养学生的创新思维与解决复杂工程问题的能力。”

用户评价：浙江师范大学物理与电子信息工程学院评价“该仪器功能完善、贴合教学，可精准检测痕量气体，并具备可拆解结构、光路可见、参数可调等特点，便于学生直观理解光谱检测原理，促进理论与实践融合。”

引用评价：重庆大学国家百千万人才工程入选者陈伟根教授在其发表的文章中引用我们的工作，指出：“To the best of our knowledge, this is the highest detection sensitivity achieved based on NICE-OHMS.”

推广应用情况：

本项目成果已实现从核心技术到高端装备的转化应用，在环境监测、燃气安全、石油天然气、核电安全及高等教育等领域形成应用，产生了经济效益和社会效益。

1. 环境监测与燃气安全领域

研发系列高精度关键温室气体激光检测设备已成功应用于成都环境监测中心、新疆环境监测中心、生态环境部卫星中心、北京师范大学、唐山燃气、唐山天然气、镇江华润、铜川市生态环境局、中科院大气所、长沙市生态环境局、霍州市生态环境局和宿城区生态环境局等单位，主要作为碳监测核心设备，提

供温室气体排放关键数据。

2. 石油天然气

开发高精度 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 丰度激光分析仪，对 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的检测精度优于 0.25‰，可以用于石油勘探中分析石油来源、成熟度，仪器已经成为“中石油”、“中石化”、“中海油”相关产品独家供应商，并成功应用于大庆油田、胜利油田、中海油海上平台等现场

3. 核电安全

研制的 $^{14}\text{CO}_2$ 检测装备实现对核电站气态流出物中 $^{14}\text{CO}_2$ 的实时在线检测，解决了以往检测周期长、人工操作复杂的问题，设备为首台套面向核电站的在线 $^{14}\text{CO}_2$ 检测仪器，已成功应用于中广核阳江核电站。

4. 高等教育与人才培养领域

项目研制的新型腔衰荡光谱气体检测演示仪器采用可拆解、光路可见、参数可调的模块化设计，已应用于哈尔滨工业大学物理学院应用物理专业国家级实验教学示范中心的实验教学体系，以及浙江师范大学物理与电子信息工程学院相关实践课程，为学生理解光谱检测原理、开展实验训练和创新实践提供支撑。

成果近三年产值约 2 亿元。

主要知识产权证明目录：

➤ 发明专利：

序号	知识产权名称	知识产权类别	国别	发明（设计）人	专利权人	授 权 号
1	一种半导体激光频率到高精细度法布里玻罗腔的锁定方法	发明专利	中国	赵刚，马维光，尹王保，贾锁堂	山西大学	CN113178774B
2	一种基于光学反馈的近红外线性腔增强吸收光谱装置	发明专利	中国	马维光，周晓彬，赵刚，许非，贾锁堂	山西大学	CN113008829B
3	一种用于探测亚多普勒光谱的通用 NICE-OHMS 系统	发明专利	中国	马维光，刘建鑫，赵刚，周月婷，郭松杰，贾锁堂	山西大学	CN109270029B
4	一种基于光学反馈的线性腔衰荡光谱装置及方法	发明专利	中国	赵刚，张悦，马维光，王兴平，焦康	山西大学	CN114018868B
5	一种光学反馈锁定腔技术中反馈相位动态控制的方法	发明专利	中国	赵刚，马维光，尹王保，贾锁堂	山西大学	CN113178773B
6	一种抑制电流开启波长重复扫描影响的流控 CRDS 方法	发明专利	中国	马维光，许非，赵刚，田建飞，周晓彬	苏州冠德能源科技有限公司	CN111562005B

7	直接获取分布反馈半导体激光源电流调制波长响应的方法	发明专利	中国	马维光, 刘建鑫, 赵刚, 贾锁堂	山西大学	CN107941467B
8	基于 S2f 方法的免定标波长调制光谱气体检测方法	发明专利	中国	马维光, 赵刚, 谭巍, 李志新, 尹王保, 肖连团, 贾锁堂	山西博思通电子科技有限公司	CN105372205B
9	一种利用扫描振镜的多组分气体激光探测装置及方法	发明专利	中国	杨晨光, 李明星, 胡迈, 许振宇, 陈兵, 阚瑞峰、阮俊	中国科学院合肥物质科学研究院	CN111351768B
10	一种波长调制吸收光谱测量装置	发明专利	中国	杨晨光, 姚路, 阚瑞峰, 陈祥, 魏敏, 许振宇, 袁峰、陈兵	中国科学院合肥物质科学研究院	CN105606565B

➤ 代表性文章:

1. Tian Jianfei, Zhao Gang, Fleisher Adam J., Ma Weiguang, and Jia Suotang. Optical feedback linear cavity enhanced absorption spectroscopy, *Optics Express*, 2021, 29(17): 26831-26840.
2. 许非, 周晓彬, 刘政波, 赵刚, 马维光. 近红外光学反馈线性腔增强吸收光谱技术, *光学精密工程*, 2021, 29(5): 933-940.
3. Wang Xingping, Zhao Gang, Jiao Kang, Chen Bing, Kan Ruifeng, Cong Zhenhua, Liu Jianguo, and Ma Weiguang. Optical Feedback Linear Cavity Ringdown Spectroscopy, *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 857371.
4. 王兴平, 赵刚, 焦康, 陈兵, 阚瑞峰, 刘建国, 马维光. 光学反馈线性腔衰荡光谱技术不确定性, *物理学报*, 2022, 71(12): 124201.
5. Zhao Gang, Tian Jianfei, Hodges Joseph T., and Fleisher Adam J. Frequency stabilization of a quantum cascade laser by weak resonant feedback from a Fabry–Perot cavity, *Optics Letters*, 2021, 46(13): 3057-3060.
6. 杨家齐, 赵刚, 焦康, 高健, 闫晓娟, 赵延霆, 马维光, 贾锁堂. 基于光学反馈频率锁定的窄线宽稳定中红外激光产生技术研究, *物理学报*, 2024, 73(1): 014205.
7. Zhao Gang, Hausmaninger Thomas, Ma Weiguang, and Axner Ove. Shot-noise-limited Doppler-broadened noise-immune cavity-enhanced optical heterodyne molecular spectrometry, *Optics Letters*, 2018, 43(4): 715-718.
8. Zhao Gang, Hausmaninger Thomas, Schmidt Florian M., Ma Weiguang, and Axner Ove. High-resolution trace gas detection by sub-Doppler noise-immune cavity-enhanced optical

heterodyne molecular spectrometry: application to detection of acetylene in human breath, Optics Express, 2019, 27(13): 17940-17953.

9. Zhao Gang, Hausmaninger Thomas, Ma Weiguang, and Axner Ove. Differential noise-immune cavity-enhanced optical heterodyne molecular spectroscopy for improvement of the detection sensitivity by reduction of drifts from background signals, Optics Express, 2017, 25(23): 29454.
10. Zhao Gang, Hausmaninger Thomas, Ma Weiguang, and Axner Ove. Whispering-gallery-mode laser-based noise-immune cavity-enhanced optical heterodyne molecular spectrometry, Optics Letters, 2017, 42(16): 3109-3112.

主要完成人情况:

排名	姓名	完成单位	工作单位	主要贡献
1	马维光	山西大学	山西大学	提出了半导体激光线性腔光学反馈新理论,提出并发明了光学反馈线性腔增强光谱技术、光学反馈线性腔衰荡光谱技术,发明了无效腔模的抑制新方法,主导完成了多款新型腔增强光谱气体检测设备的设计研发以及应用推广。是8项主要发明专利的发明人,做出了创造性贡献。
2	赵刚	山西大学	山西大学	发明了半导体激光到高精细度线性光学腔频率锁定的新方法,提出了多噪声抑制机制协同的光学干涉效应抑制新方法,主导完成了多款新型腔增强光谱气体检测设备的设计研发。是8项核心专利的发明人,做出了创造性贡献。
3	阚瑞峰	中国科学院 合肥物质科学研究院	中国科学院 合肥物质科学研究院	发展了光学反馈线性腔衰荡光谱技术,采用新型流控CRDS方法,有效抑制无效衰荡信号的干扰,获得高纯度、可重复的衰荡信号序列。是2项主要发明专利的发明人,做出了创造性贡献。
4	张雷	山西大学	山西大学	参与发展了多项光谱技术研究工作。是多项核心论文的作者,做出了创造性贡献。
5	周晓彬	山西大学	山西大学	实现了基于光学反馈的近红外线性腔增强吸收光谱系统,参与发明了光学反馈线性腔增强光谱技术、新型流控CRDS方法,显著提升激光到腔耦合效率。是2项主要发明专利的发明人,做出了创造性贡献。
6	闫晓娟	山西大学	山西大学	发展了基于线性腔的光学反馈腔增强拉曼光谱技术, GHz量级线宽的半导体激光到 kHz线宽线性腔模的连续频率锁定。做出创造性贡献。

完成人合作关系说明：

自 2012 年以来，第一完成人马维光与其他完成人陆续展开合作，建立紧密的产学研合作关系。合作方式包括论文发表、专利申请、科研成果鉴定、合作研发等。各完成人在项目实施过程中通力合作，解决了从实验室研究到产业化所遇到的各种技术难题。项目完成人马维光、赵刚、阚瑞峰、张雷、周晓彬、闫晓娟经同意此排名顺序用于《超灵敏腔增强激光气体检测技术及应用》项目申报 2025 年山西省科学技术发明奖。