

2026 年度陕西省自然科学奖公示信息

项目名称		面向痕量气体检测的半导体材料与传感性能调控机制研究					
提名者		陕西省知识产权局					
提名意见							
我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料，确认全部材料真实有效，并按照要求，我单位和项目完成单位都已对该项目的基本情况进行了公示，目前无异议。 该项目聚焦“痕量气体检测中半导体敏感材料与传感性能调控机制”核心科学问题，开展了深入系统的研究。取得了如下重要科学发现：（1）阐明湿度诱导半导体敏材料表面活性位竞争机制，建立了“抗湿竞争吸附-催化增感”双机制协同的抗湿增感策略。（2）建立了痕量气体分子的选择性识别机制——大分子与小分子 VOCs 的差异化识别，揭示了大分子与小分子 VOCs 在半导体敏感材料表面的差异化吸附与识别机制。（3）揭示了异价离子-缺陷协同调控与界面耦合增感机制，从异价离子掺杂、缺陷工程和界面耦合三个层面开展了系统研究，发现异价离子掺杂可有效调控材料中载流子的类型和浓度，进而实现对气敏性能的精准调控。 5 篇代表性论文发表在 Chem. Eng. J.等国际著名期刊上。研究成果受到多位英国皇家化学学会 Fellow 的引用和正面评价。 根据《陕西省科学技术厅关于 2026 年度省科学技术奖提名工作的通知》，参照自然科学奖评定条件和评定标准，提名该项目参评陕西省科学技术二等奖。							
主要完成人情况							
排名	姓名	技术职称	工作单位	完成单位			
1	程鹏飞	教授	西安电子科技大学	西安电子科技大学			
2	王莹麟	副教授	西安电子科技大学	西安电子科技大学			
3	郝熙冬	副教授	西安电子科技大学	西安电子科技大学			
4	王宸	助理研究员	西安电子科技大学	西安电子科技大学			
5	雷朝晖	无	西安电子科技大学	西安电子科技大学			
6	孙善富	副教授	西安电子科技大学	西安电子科技大学			
主要完成单位							
排名	单位名称						
1	西安电子科技大学						
代表性论文（专著）目录							
序号	论文（专著）名称/刊名/作者	年卷页码（xx 年 xx 卷 xx 页）	发表（出版）时间（年月日）	通讯作者（含共同）	第一作者（含共同）	作者	论文署名单位

1	Gas sensor towards n-butanol at low temperature detection: Hierarchical flower-like Ni-doped Co ₃ O ₄ based on solvent-dependent synthesis Sensors and Actuators: B. Chemical	2020 年 328 卷 129028 页	2020.10.22	Yinglin Wang	Pengfei Cheng	Pengfei Cheng, Fan Dang, Yinglin Wang*, Jianning Gao, Luping Xu, Chen Wang, Li Lv, Xu Li, Bao Zhang, Baijun Liu	西安电子科技大学
2	In-situ generated TiO ₂ /α-Fe ₂ O ₃ heterojunction arrays for batch manufacturing of conductometric acetone gas sensors Sensors and Actuators: B. Chemical	2021 年 340 卷 129926 页	2021.4.7	Yinglin Wang, Pengfei Cheng	Chen Wang	Chen Wang, Yinglin Wang*, Pengfei Cheng*, Luping Xu, Fan Dang, Tianliang Wang, Zhaohui Lei	西安电子科技大学
3	Sub-ppb mixed potential H ₂ S gas sensor based on YSZ and Nd ₂ AO ₄ (A=Cu, Ba and Ni) as a new type of sensing electrode Sensors and Actuators: B. Chemical	2023 年 382 卷 133500 页	2023.2.12	Pengfei Cheng, Xishuang Liang	Xidong Hao	Xidong Hao, Yinglin Wang, Pengfei Cheng*, Shanfu Sun, Luping Xu, Xishuang Liang*, Geyu Lu, Yue Hao	西安电子科技大学
4	P-type hollow hexagram Co ₃ O ₄ detect the acetone at low temperature and mechanism analysis Chemical Engineering Journal	2023 年 471 卷 144297 页	2023.6.28	Yinglin Wang, Pengfei Cheng	Zhaohui Lei	Zhaohui Lei, Fan Dang, Yinglin Wang*, Songlin Li, Tianliang Wang, Yiyang Xu, Luping Xu, Pengfei Cheng*	西安电子科技大学
5	Nanocomposite polymer blend membrane molecularly re-engineered with 2D metal-organic framework nanosheets for efficient membrane CO ₂ capture Journal of Membrane Science	2023 年 685 卷 121950 页	2023.7.22	Pengfei Cheng*, Sui Zhang*	Chen Wang	Chen Wang, Ji Wu, Pengfei Cheng*, Luping Xu, Sui Zhang*	西安电子科技大学

客观评价
(1) IEEE Fellow、SPIE Fellow、OSA Fellow、国立成功大学电机工程学系讲座教授张守进教授等在国际权威期刊 <i>Sensors and Actuators B: Chemical</i> 发表的论文 <i>Synthesis and characterization of an oxygen-controlled CuO/SnO₂ sensor for NO₂ detection</i> 中, 引用了代表性论文 1, 将其作为 p 型 Co₃O₄ 掺杂与微纳结构调控的相关研究依据, 并结合工作温度、表面吸附氧物种及负氧离子变化讨论了 p 型金属氧化物的气敏反应机制。 (2) 原长春理工大学校长苏忠民教授等在国际权威期刊 <i>Advanced Functional Materials</i> 发表的论文 <i>Bismuth-Based Metal-Organic Frameworks for Water Vapor Capture and Energy Storage</i> 中, 对代表性论文 2 行了引用。在论述原位构筑材料结构策略时, 苏忠民教授团队将程教授的研究列为相关支撑文献之一, 并指出此类原位构筑方法能够直接增强材料的电化学性能和稳定性 (“This approach directly enhances the electrochemical performance and stability of the supercapacitors.”), 表明该合成设计理念已经被拓展借鉴至能源存储材料领域。 (3) 此外, 上海海事大学物流科学与工程研究院 孙士斌教授等在 <i>Sensors and Actuators B: Chemical</i> 发表的论文 <i>Highly sensitive acetone sensor based on WO₃ nanosheets derived from WS₂ nanoparticles with inorganic fullerene-like structures</i> (2021, 343: 130135) 中, 也引用了代表性论文 2 中的异质结丙酮传感器研究。该论文在讨论金属氧化物丙酮传感及其表面氧吸附和电子转移机制时, 将程教授的原位异质结构工作作为相关研究基础, 体现了原位构筑异质结、促进界面电荷输运的研究思路在高性能丙酮气体传感器设计中的借鉴价值。 (4) 英国皇家化学会会士 邓勇辉教授等在国际权威综述 <i>Recent advances in non-ionic surfactant templated synthesis of porous metal oxide semiconductors for gas sensing applications</i> (<i>Progress in Materials Science</i>, 2025, 150: 101409) 中, 对论文 代表性论文 4 进行了引用评价。该综述在总结模板法和结构导向策略调控金属氧化物气敏材料时引用了该研究, 肯定了通过调节结构导向剂用量控制材料形貌和孔结构, 进而调节气体吸附、扩散及气敏响应的研究思路, 表明结构导向剂调控是实现气敏材料结构与性能协同优化的有效手段。 (5) 英国皇家化学会 Fellow 王海辉教授等在国际权威综述 <i>MOF membranes for gas separations</i> (<i>Progress in Materials Science</i>, 2025, 151: 101432) 中, 对代表性论文 5 进行了引用评价。王海辉教授等在总结 MOF 混合基质膜及二维 MOF 纳米片气体分离研究进展时指出, 此类混合基质膜能够结合 MOF 材料优异的气体传输特性与聚合物良好的柔韧性和可加工性, 有望突破传统聚合物膜在渗透性与选择性之间的性能制约。通过将二维 Cu-TCPP MOF 纳米片引入 Pebax/PEGMEA 聚合物基体, 实现了 CO₂渗透性和 CO₂/N₂选择性的同步提升, 并保持良好的长期运行稳定性, 为高性能气体分离膜的设计提供了代表性研究基础。
项目简介

气体传感器是获取气体种类和浓度信息的共性关键技术，在载人航天、环境监测、安全监控、物联网和人工智能等领域具有广泛应用。面向呼气分析疾病诊断和地质灾害被困人员搜救等重大需求，人体呼气中疾病标志物和生命体征相关痕量气体的精准检测，已成为传感领域的重要前沿方向。半导体金属氧化物传感器凭借灵敏度高、成本低、响应快等优势，一直是痕量气体检测的研究热点。然而，该类传感器在呼气等高湿、复杂气氛环境下仍面临四大核心瓶颈：一是抗湿性不足，呼气中水分子易引起响应漂移和灵敏度衰减；二是选择性不高，复杂背景气体下交叉响应严重；四是稳定性与可靠性不足，灵敏度与稳定性之间的本征矛盾亟待突破。上述问题的根源在于敏感材料与传感性能之间的调控机制尚未充分揭示，亟需从敏感材料设计与痕量气体感知机制两方面开展系统性基础研究。

本项目紧密围绕痕量气体检测中半导体敏感材料与传感性能调控机制这一核心科学问题，开展了深入系统的研究。主要科学发现如下：

一、阐明湿度诱导半导体敏材料表面活性位竞争机制，针对高湿复杂气氛下半导体金属氧化物传感器抗湿性不足、灵敏度衰减的难题，本项目系统揭示了水分子与目标痕量气体在敏感材料表面的竞争吸附与反应机制。通过构建疏水/亲气复合敏感层结构，实现了水分子的选择性阻隔与目标气体的高效扩散，通过理论计算探明了湿度对表面氧化物及载流子输运的调控规律。并进一步通过引入催化增感组分，利用电子敏化与化学敏化协同增强湿环境下目标气体的表面反应活性，建立了“抗湿竞争吸附-催化增感”双机制协同的抗湿增感策略。

二、建立了痕量大分子与小分子挥发性有机物气体的高选择识别机制，针对复杂环境中挥发性有机物（VOCs）选择性识别难题，本项目系统揭示了大分子与小分子 VOCs 在半导体敏感材料表面的差异化吸附与识别机制。通过构建层级多孔金属氧化物与金属有机框架复合薄膜结构，实现了气体分子扩散动力学的精准调控，通过理论计算探明了小分子和大分子 VOCs 因空间位阻效应产生的不同扩散机制。并进一步通过能带工程调控半导体材料的电子能级，实现轨道与不同 VOCs 前线分子轨道的能量匹配，驱动特异性吸附反应并优化电荷转移，建立了“分子筛分-轨道匹配”双机制协同的选择性识别理论。

三、揭示了异价离子-缺陷协同调控与界面耦合协同增感机制。针对灵敏度和选择性的协同提升难题，本项目从异价离子掺杂、缺陷工程和界面耦合三个层面开展系统研究。发现异价离子掺杂可有效调控材料中载流子类型和浓度。通过双离子位点协同调控，在晶格内引入中间能级并增强表面活性位点，显著提升氧空位密度，大幅提高半导体材料的敏感性能。同时，通过氧化还原循环促进氧空位介导的吸附位点生成，构建异质结界面，利用功函数差异驱动界面电荷重新分布，诱导能带弯曲和电子耗尽层形成，增强对目标气体的吸附和电荷转移效率。本项目系统阐明了“掺杂调控电子结构—缺陷提供活性位点—界面耦合促进电荷转移”的三级协同增感机制，为高性能气体传感器的理性设计提供了从原子尺度到界面尺度的完整理论依据。

上述研究成果发表于 Chem. Eng. J.等著名期刊。成果受到多位英国皇家化学学会 Fellow 的引用和正面评价，已成功应用于国家重点研发计划、国家自然科学基金、173 基础加强领域基金、陕西省自然科学基金以及中国博士后特别资助等重大项目与人体痕量气体标记物探测装备的研制，推动了我国痕量气体传感技术的原始创新与工程应用。

完成人合作关系说明

本项目完成人程鹏飞、王莹麟、、郝熙冬、王宸、雷朝晖、孙善富等 6 人，均为西安电子科技大学空间科学与技术学院“智能感知与探测团队”成员，长期围绕半导体气体传感材料、痕量气体检测及传感性能调控等方向开展科研合作，形成了稳定的科研合作团队。在项目研究过程中，各完成人充分发挥各自在敏感材料设计与制备、传感机理分析、器件构筑、性能测试及数据分析等方面的专业优势，围绕项目重要科学发现开展了持续深入的合作研究，并通过共同承担科研项目、合作发表学术论文及开展相关科研工作等方式形成了紧密的合作关系。其中，程鹏飞参与完成全部 5 篇代表性论文；王莹麟参与完成代表作 1、2、3、4；王宸参与完成代表作 1、2、5；雷朝晖参与完成代表作 2、4；郝熙冬参与完成代表作 3；孙善富参与完成代表作 3。各完成人分工明确、相互协作，共同推动了本项目系列研究成果的形成和发展。

