

陕西省自然科学奖公示

项目名称：无机半导体气敏材料的表界面调控与增敏机制

1 提名者及提名意见：

该项目针对传统金属氧化物半导体气敏性能受吸附位点、载流子传输行为和气-固界面反应势垒高的局限，提出了半导体金属氧化物纳米化增敏的新理论和策略。利用非金属空位缺陷等多维度活化了吸附位点、通过调控异质界面提高了界面电荷传输能力、基于光子与表面电子耦合敏化了气体传感性能，并从化学、电子学和光电子学等角度阐明了半导体材料的增敏机制，取得一系列具有重要科学意义和国际影响的创新性成果，为突破传统气敏传感基础理论、进一步提高金属氧化物半导体材料的感知性能提供了契机。该项目研究在 *Science Bulletin*、*Nano Today*、*ACS Sensor*、*Advanced Optical Materials*、*Advanced Science*、*Carbon*、*Sensor and Actuator B* 等相关领域权威刊物发表论文 85 篇，5 篇代表性论文发表在材料科学领域 TOP 期刊上，累计被 SCI 他引 274 次，单篇最高他引 98 次。代表性论文被 *Chemical review*、*Advanced Materials* 等期刊引用，得到了美国麻省理工学院 Michael S.Strano 教授、美国达特茅斯学院 Katherine A. Mirica 教授等国际知名学者的高度评价。该项目实现了基础理论突破和应用技术创新，有重要的学术价值和引领作用，对提升我国气体传感领域的国际学术地位具有显著促进作用。

经审查该项目成果材料属实、齐全、规范，无知识产权纠纷，无人员排序争议。符合陕西省自然科学奖提名条件，提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。

2 项目简介：

本项目属于物理、电子信息、纳米材料科学等多学科交叉领域。

传统的气敏材料为单一组分的金属氧化物半导体经压制烧结而成的气敏陶瓷粉体，通过少量添加其它元素改善其性能，但由于受其表面活性低、电荷传输能力差和气-固界面反应势垒高的限制，存在气敏响应值低、响应速度慢、工作温度高等不足，亟需发展新型气敏敏化策略。本项目在国家自然科学基金

等课题的支持下，建立了纳米片多孔网络、非金属空位缺陷和晶格畸变等敏化策略，从化学敏化角度提升了纳米半导体材料的活性吸附位点；创立了电活性接触的界面调控技术、三元合金增敏气体响应的设计方法，从电子学敏化角度提高了半导体气敏材料的电荷传输能力；提出了外源物理光场增敏新手段，从光电子学角度阐明了光生载流子降低气固界面反应势垒的机理。

1 半导体气敏材料的多维度吸附活化及化学敏化机理：提出了二维纳米片多孔网络强化敏感材料表面反应活性的设计思路，解决了传统半导体敏感材料易团聚、活性位点利用率低的难题，突破了敏感材料在高温工作条件下难以获得高离散化分布的传统观点；发现了半导体敏感材料中氧空位或硫空位缺陷的静电吸附强化和由此带来的电子传输机制改变是实现气敏性能提高的决定因素，利用氧空位缺陷与目标气体间的强静电吸附作用获得了气敏响应值高达 2329 的气敏传感器件；发现了 Sn-Ga 共掺杂半导体形成的堆垛位错及孪晶等晶格畸变现象并由此显著提高了气敏响应值，提出了 Sn-Ga 共掺杂提高半导体敏感材料气敏响应的新方法。

2 半导体气敏材料的界面调控策略及电子敏化机理：发现黑磷（BP）层上原位构建的电活性接触的 SnS₂/BP 结异质界面，实现了异质材料间的化学键作用力连接和全方位界面接触并首次实现了高效 NO₂ 传感应用。P 型 BP 中高氧化性的空穴，有效抑制了 SnS₂ 中 Sn²⁺和硫空位(Lewis 酸)的形成，强化了界面间电荷传输能力，促进了异质结对酸性 NO₂ 的吸附与气敏响应；发现在金属氧化物@金属二硫化物核壳间原位形成了金属硫化物缓冲层，获得了缓冲层电子敏化半导体敏感材料的新理论；提出了三元合金增敏气体传感的新思想，发现了高度混溶的三元合金中存在局域化电场，有效地分离了电子-空穴对，从而促进了载流子传输效率，实现了对目标气体的快速探测。

3 半导体气敏材料的光场调控及光电子学敏化机理：提出了通过紫外光光生电子活化吸附氧降低气-固界面反应势垒的新思想，阐明了紫外光诱导提升气敏特性的光电子学敏化机理，获得了对目标气体的室温下高灵敏探测，突破了传统金属氧化物半导体工作温度高的行业难题；发现了新型二维半导体碳材料-石墨炔薄膜对 640 nm 可见光的微秒级（5.15 μs）超快响应和超高选择性，实现了室温可见光诱导下对目标气体响应值和响应速度的协同提升。

3 客观评价:

(1) 美国达特茅斯学院的 Katherine A. Mirica 教授团队在 Chemical Review 2019, 119, 478–598 [代表性引文 1] 大篇幅报道, 对本发现点 (代表作 1 和 5) 进行了高度评述, 称 “于等研究表明原位定向生长的由超薄纳米片组装而成的 ZnO 纳米墙结构, 展现出了高灵敏、快响应等一系列优越的气敏特性。进一步研究发现退火工艺引入的氧空位缺陷和大量的孔隙显著提升了气敏特性”。

(2) 国家自然科学基金获得者、中国科学院化学研究所刘辉彪研究员团队在纳米材料领域著名期刊 Advanced Materials, 2023, 35, 2212159 [代表性引文 2] 高度评价了本研究成果 (代表作 2), 认为 “石墨炔可以直接用于光电探测器的活性光吸收剂。Li 等构建了石墨炔基可见光光探测器, 该器件展现出快速的响应-恢复时间, 分别为 5.15 μs 和 19.83 μs ”。

(3) 美国化学学会会士、韩国成均馆大学 Hyoyoung Lee 教授团队在国际材料科学领域著名期刊 Advanced Science 2023, 10, 2300925 [代表性引文 3] 高度评价本发现点 (代表作 2), 认为 “石墨炔光电探测器已实现对紫外光高响应 (1260 A W^{-1}) 并对可见光的超快 (5 μs) 响应”。

(4) 美国麻省理工学院 Michael S. Strano 教授在 ACS Sensors 2023, 8, 1357–1367 [代表性引文 4] 对本研究成果 (代表作 3) 高度评价, 认为 “张等提出了一种具有缺陷位点的 SnS_2 纳米片的 Ar 气等离子处理方法, 并将其应用于 NH_3 传感器, 等离子处理在 SnS_2 纳米片上产生了大量的表面缺陷, 通过调控等离子体处理时间改变了其电子状态”。

(5) 德国洪堡学者、国家优秀青年基金获得者、清华大学王钰言研究员团队在 [代表性引文 5] Materials Today Physics 35 (2023) 101133 高度评价了本研究成果 (代表作 3) 发现的 “离散化分布的 S 空位作为局域态极大地提高了少层二维半导体的电导率, 同时离散化的 S 空位有利于获得稳定的物理和化学吸附, 使得电子掺杂更有效”。

(6) Appl. Mater. Today 主编, 捷克共和国 CEITEC 未来能源与创新实验室首席顾问 Martin Pumera 教授在 Small 2025, 21, 2410360 综述中 [代表性引文 6], 引用了本项目的发现点 (代表作 3), 认为 “二维材料基面的非活性抑制了气体响应行为, 通过任意手段来激活基面可以显著提升其气敏特性”。

(7) 中国科学院院士江桂斌教授在 *Science of the total environments* [代表性引文 5] 引用了本研究成果 (代表作 4) 的发现点, 认为 “黑磷中高氧化性的空穴, 有效抑制了高价金属离子的还原, 使得材料表明具有高路易斯酸性, 从而促进了异质结对酸性 NO₂ 的吸附与气敏响应”。

(8) *Materials Research Express* 期刊编委, 瑞典林雪平大学 Ziyauddin Khan 教授在著名材料领域期刊 *Small* 上 [代表性引文 6], 对本项目多孔网络结构金属氧化物的构建工作进行大篇幅正面引用 (代表作 3 和代表作 5), 认为 “Yu 等研究了 ZnO 纳米墙在 220 °C 下对较宽浓度范围 1-50ppm 的 NO₂ 气敏性能, 表明对 50 ppm 的 NO₂ 具有高灵敏、快响应-恢复特性。随后作者又研究了在不同温度退火的 ZnO 纳米墙的气敏性能, 表现出高响应和高稳定性, 这归因于 ZnO 纳米墙的高孔隙率和氧空位缺陷”。

4 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 时间	通讯 作者	第一 作者	国内 作者	他引 总次数	检索 数据库	知识 产权 是否 归国内 所有
1	Dependence of Al ³⁺ on the growth mechanism of vertical standing ZnO nanowalls and their NO ₂ gas sensing properties	Sensors and Actuators B	于灵敏, 范新会	2014, 204, 96-101	2014-08-02	于灵敏, 范新会,	于灵敏	于灵敏, 韦建松, 罗宇阳, 陶彦龙, 雷曼, 范新会, 严文	37	SC I	是
2	Graphdiyne Visible-Light Photodetector with Ultrafast Detectivity	Advanced optical materials	李原	2021, 9, 6 (1-10)	2021, 01-26	张明佳, 黄长水, 李玉良	李原	李原, 张明佳, 胡秀丽, 李晓东, 李茹	29	SC I	是

								，于灵敏，范新会，黄长水，李玉良			
3	Activating the Basal Plane of Defective SnS ₂ Nanosheets for NH ₃ Gas Sensing	ACS applied nano materials	张波	2020, 3, 5, 4642 – 4653	2021-03-21	于灵敏，戴正飞	张波	张波，刘耀达，梁婷婷，于灵敏，戴正飞	61	SCI	是
4	Suppression of Sn ²⁺ and Lewis acidity in SnS ₂ /black phosphorus heterostructure for ppb-level room temperature NO ₂ gas sensor	Science Bulletin	梁婷婷	66 (2021) 2471 – 2478	2021.7.8	戴正飞，曾海波	梁婷婷	梁婷婷，戴正飞，刘耀	49	SCI	是

								达，张旭，曾海波			
5	Both oxygen vacancies defects and porosity facilitated NO ₂ gas sensing response in 2D ZnO nanowalls at room temperature	Journal of Alloys and compounds	于灵敏，范新会	2016, 682,352-356	2016.5.9	于灵敏	于灵敏	于灵敏, 郭芬, 刘盛, 杨冰, 蒋延兴, 祁立军, 范新会	98	SCI	是
									274		

5 主要完成人情况：

姓 名	于灵敏	性别	女	排 名	1	国 籍	中国
出生年月	1978. 6. 8			出 生 地	河北	民 族	汉族
身份证号	132324197806080346			归国人员	是 ☐ 否 ☒	归国时间	
技术职称	教授			最高学历	研究生	最高学位	博士
毕业学校	西安工业大学			毕业时间	2009. 12	所学专业	电 子 科 学 与 技 术
电子邮箱	yulingmin@xatu. edu. cn			办公电话	029-86173324	移动电话	

通讯地址	西安工业大学未央校区，西安市学府中路2号	邮政编码	710021			
工作单位	西安工业大学	行政职务	无			
二级单位	材料与化工学院	党派	民盟+党员			
完成单位	西安工业大学	所在地	陕西			
		单位性质	高等院校			
参加本项目的起止时间		2001.9.1 至 2022.12.31				
对本项目主要学术贡献： 提出本项目主要学术思想的负责人，负责完成本项目研究工作的学术指导及研究论文的撰写和修改，是代表作1，3，5的第一作者或通讯作者。 1 建立了多孔网络纳米结构、非金属空位缺陷和晶格畸变对纳米半导体气敏材料的化学增敏策略，提出了气敏薄膜的原位生长技术，突破了传统金属氧化物气敏厚膜涂覆工艺，解决了厚膜“转移”导致的膜破裂甚至脱落的难题。（发现点1，代表作1，5） 2 创立了界面调控新技术，提升了电荷传输能力，揭示了界面调控的电子学敏化机制。（发现点2，代表作3） 3 提出了光子耦合表面电子敏化气体传感的新策略，采用光诱导调控了能带结构和载流子输运特性，阐明了光学增敏机理。（发现点3）						
曾获科技奖励情况： 2019年，陕西省高校科学技术奖二等奖，气敏与光催化ZnO基功能材料表面缺陷及界面结构调控机理，排名第一。 2016年，陕西省高校科学技术奖，二等奖，金属氧化物半导体纳米材料的制备及对系列毒害气体的气敏研究机理，排名第二。						

声明：本人同意完成人排名，遵守《陕西省科学技术奖励条例》及其实施细则的有关规定，承诺遵守评审工作纪律，保证所提供的有关材料真实有效，且不存在任何违反《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等相关法律法规及侵犯他人知识产权的情形。该项目是本人本年度被提名的唯一项目。如产生争议，保证积极配合调查处理工作。如有材料虚假或违纪行为，愿意承担相应责任并接受相应处理。 本人签名： 年 月 日	完成单位声明：本单位确认该完成人情况表内容真实有效，且不存在任何违反《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等相关法律法规及侵犯他人知识产权的情形。如产生争议，愿意积极配合调查处理工作。 工作单位声明：本单位对该完成人被提名无异议。 单位（盖章） 年 月 日
---	--

姓 名	范新会	性别	男	排 名	2	国 籍	中国
出生年月	196503			出 生 地	陕西	民 族	汉族
身份证号	610103196503192477			归国人员	☐ 是 ☒ 否	归国时间	
技术职称	无			最高学历	研究生	最高学位	工学博士
毕业学校	西安工业大学			毕业时间	2020.07.01	所学专业	材料工程
电子邮箱				办公电话		移动电话	
通讯地址	西安工业大学未央校区，学府中路 2 号					邮政编码	210023
工作单位	西安工业大学					行政职务	无
二级单位	材料与化工学院					党 派	中共党员
完成单位	西安工业大学材料与化工学院					所 在 地	济南 青岛 西安
						单位性质	科研事业单位
参加本项目的起止时间		2018.09 至 2020.07					
对本项目主要学术贡献： 本项目中“非金属空位缺陷化学增敏效应”思路的共同提出者，参与金属氧化物纳米材料的合成与机制研究。在项目实施过程中，对关键科学问题凝练与研究思路形成发挥了重要指导作用，在项目中作出了重要贡献。指导完成代表性论著 1 和 5 相关研究工作。							

曾获科技奖励情况： 2016 年，陕西高校科学技术奖二等奖，金属氧化物半导体纳米材料的制备及对系列毒害气体的气敏机理研究，第一获奖人。证书编号：16L10。	
声明：本人同意完成人排名，遵守《陕西省科学技术奖励办法》及其实施细则的有关规定，承诺遵守评审工作纪律，保证所提供的有关材料真实有效，且不存在任何违反《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等相关法律法规及侵犯他人知识产权的情形。如产生争议，保证积极配合调查处理工作。如有材料虚假或违纪行为，愿意承担相应责任并接受相应处理。承诺该项目是本人本年度被提名的唯一项目。 本人签名： 年 月 日	完成单位声明：本单位确认该完成人情况表内容真实有效，且不存在任何违反《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等相关法律法规及侵犯他人知识产权的情形。如产生争议，愿意积极配合调查处理。 工作单位声明：本单位对该完成人被提名无异议。 单位（盖章） 年 月 日

姓 名	戴正飞	性别	男	排 名	3	国 籍	中国
出生年月	1987. 2. 26			出 生 地	安徽	民 族	汉族
身份证号	340521198702263811			归国人员	√是 □否	归国时间	2017. 12
技术职称	教授			最高学历	研究生	最高学位	博士
毕业学校	中国科学院大学			毕业时间	2013. 7	所学专业	材料物理与化学
电子邮箱	sensdai@xjtu.edu.cn			办公电话	029-82668610	移动电话	
通讯地址	陕西省西安市碑林区咸宁西路 28 号					邮政编码	710049
工作单位	西安交通大学					行政职务	无
二级单位	材料科学与工程学院					党 派	群众
完成单位	西安交通大学					所 在 地	陕西
						单位性质	高等院校
参加本项目的起止时间		2018. 9. 1 至 2023. 12. 31					

对本项目主要学术贡献： 本项目的参与者，创立了界面调控新技术，提升了电荷传输能力，揭示了界面调控的电子学敏化机制，对“重要科学发现之二”做出了重要贡献，指导完成代表性论著 3 和 4 相关研究工作。	
曾获科技奖励情况： 2023 年，中国材料研究学会科学技术奖一等奖，二维高空穴迁移率 p 轨道材料，排名第六。	
声明：本人同意完成人排名，遵守《陕西省科学技术奖励条例》及其实施细则的有关规定，承诺遵守评审工作纪律，保证所提供的有关材料真实有效，且不存在任何违反《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等相关法律法规及侵犯他人知识产权的情形。该项目是本人本年度被提名的唯一项目。如产生争议，保证积极配合调查处理工作。如有材料虚假或违纪行为，愿意承担相应责任并接受相应处理。 本人签名： 年 月 日	完成单位声明：本单位确认该完成人情况表内容真实有效，且不存在任何违反《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等相关法律法规及侵犯他人知识产权的情形。如产生争议，愿意积极配合调查处理工作。 工作单位声明：本单位对该完成人被提名无异议。 单位（盖章） 年 月 日

姓 名	李原	性别	男	排 名	4	国 籍	中国
出生年月	1990.02			出 生 地	陕西榆林	民 族	汉族
身份证号	612725199002171818			归国人员	☐ 是 ☒ 否	归国时间	
技术职称	无			最高学历	硕士研究生	最高学位	硕士学位
毕业学校	西安工业大学			毕业时间	2020.07.01	所学专业	材料工程
电子邮箱				办公电话		移动电话	
通讯地址						邮政编码	210023
工作单位	西安工业大学					行政职务	无
二级单位	材料与化工学院					党 派	中共党员
完成单位	西安工业大学材料与化工学院					所 在 地	济南 青岛 西安
						单位性质	科研事业单位
参加本项目的起止时间		2018.09 至 2020.07					

对本项目主要学术贡献： 提出了高质量新型碳材料石墨炔薄膜的绿色环保两相水溶液合成法，实现了对 640 nm 波长可见光的超快（5.15 μs）超高选择性响应，对“重要发现之三”做出了重要贡献，以第一作者身份发表代表作 2。	
曾获科技奖励情况： 无	
声明：本人同意完成人排名，遵守《陕西省科学技术奖励办法》及其实施细则的有关规定，承诺遵守评审工作纪律，保证所提供的有关材料真实有效，且不存在任何违反《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等相关法律法规及侵犯他人知识产权的情形。如产生争议，保证积极配合调查处理工作。如有材料虚假或违纪行为，愿意承担相应责任并接受相应处理。承诺该项目是本人本年度被提名的唯一项目。 本人签名： 年 月 日	完成单位声明：本单位确认该完成人情况表内容真实有效，且不存在任何违反《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等相关法律法规及侵犯他人知识产权的情形。如产生争议，愿意积极配合调查处理。 工作单位声明：本单位对该完成人被提名无异议。 单位（盖章） 年 月 日

姓 名	张波	性别	男	排 名	5	国 籍	中国
出生年月	1995 年 10 月 7 日			出 生 地	陕西西安	民 族	汉族
身份证号	610112199510072510			归国人员	☐ 是 ☒ 否	归国时间	
技术职称	无			最高学历	硕士研究生	最高学位	工学硕士
毕业学校	西安工业大学			毕业时间	2020 年 6 月	所学专业	材料工程
电子邮箱	375683266@qq.com			办公电话		移动电话	
通讯地址	西安市未央大学城学府中路 2 号					邮政编码	710021
工作单位	西安工业大学					行政职务	无
二级单位	材料与化工学院					党 派	共产党
完成单位	西安工业大学					所 在 地	陕西西安
						单位性质	高等院校
参加本项目的起止时间		至					

对本项目主要学术贡献： 提出了创制 S 空位缺陷的等离子快速处理方法，利用 S 空位缺陷实现了对 NH₃ 的高灵敏探测。对“重要发现之一”做出了重要贡献，以第一作者身份发表代表作 3。	
曾获科技奖励情况： 无	
声明：本人同意完成人排名，遵守《陕西省科学技术奖励办法》及其实施细则的有关规定，承诺遵守评审工作纪律，保证所提供的有关材料真实有效，且不存在任何违反《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等相关法律法规及侵犯他人知识产权的情形。如产生争议，保证积极配合调查处理工作。如有材料虚假或违纪行为，愿意承担相应责任并接受相应处理。承诺该项目是本人本年度被提名的唯一项目。 本人签名： 年 月 日	完成单位声明：本单位确认该完成人情况表内容真实有效，且不存在任何违反《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等相关法律法规及侵犯他人知识产权的情形。如产生争议，愿意积极配合调查处理。 工作单位声明：本单位对该完成人被提名无异议。 单位（盖章） 年 月 日

6 主要完成单位情况：

单位名称	西安工业大学				
排 名	1	法定代表人	姚尧	所 在 地	陕西
单位性质	高等院校	传 真		邮政编码	
通讯地址	陕西省西安市未央区学府中路2号				
联 系 人		单位电话		移动电话	
电子邮箱					
对本项目主要学术贡献： 西安工业大学是代表作1, 3, 5学术思想的提出单位和完成单位，对三个发现点做出了创造性贡献：建立了边缘不饱和位点、非金属空位缺陷和晶格畸变对纳米半导体气敏材料的化学增敏策略；创立了三元合金增敏气体响应的设计方法、外源物理光场增敏新手段，开拓了半导体敏感材料增敏新技术和新型碳材料的发展新方向，并从化学、电子学和光学诱导等角度阐明了半导体材料的增敏机制。 作为本项目完成单位，在本项目中承担了2项国家自然科学基金面上项目、1项青年基金项目、1项教育部优秀青年教师奖励计划、3项陕西省重点研发项目等。先后有5位教师、13位学生参与本项目的研究。					
声明： 本单位同意完成单位排名，遵守《陕西省科学技术奖励办法》及其实施细则的有关规定，承诺遵守评审工作纪律，保证所提供的有关材料真实有效，且不存在任何违反《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等相关法律法规及侵犯他人知识产权的情形。如产生争议，保证积极配合调查处理工作。如有材料虚假或违纪行为，愿意承担相应责任并接受相应处理。					
单位（盖章）					
年 月 日					

主要完成单位情况：

单位名称	西安交通大学				
排 名	2	法定代表人	张立群	所 在 地	陕西
单位性质	高等院校	传 真		邮政编码	710049
通讯地址	陕西省西安市咸宁西路 28 号				
联 系 人		单位电话		移动电话	
电子邮箱					
对本项目主要学术贡献： 西安交通大学是代表作 4 学术思想的提出单位和完成单位，对发现点 2 做出了创造性贡献：创立了电活性接触的界面调控技术，实现了异质材料间的化学键作用力连接和全方位界面接触并首次实现了高效 NO₂ 传感应用。发展了材料表面 Lewis 酸度描述方法即酸性介质下扩散双电层电容新理论。 作为本项目完成单位，在本项目中承担了 1 项国家自然科学基金青年项目、1 项陕西省自然科学基金面上项目。					
声明：本单位同意完成单位排名，遵守《陕西省科学技术奖励办法》及其实施细则的有关规定，承诺遵守评审工作纪律，保证所提供的有关材料真实有效，且不存在任何违反《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等相关法律法规及侵犯他人知识产权的情形。如产生争议，保证积极配合调查处理工作。如有材料虚假或违纪行为，愿意承担相应责任并接受相应处理。 单位（盖章） 年 月 日					

7 完成人合作关系说明：

在该项目执行期间，主要项目完成人在西安工业大学从事科研工作，第 3 完成人在西安交通大学，5 位项目完成人具有坚实的合作基础。其中，第 2 完成人是该团队的创始人，第 1 完成人是该团队创建的骨干成员，第 4 完成人于 2018.9 以硕士生身份加入团队，第 5 完成人于 2018.9 以硕士生身份成为团队成员并于 2019 年 9 月通过联合培养加入第 3 完成人团队。

项目执行期间，5 位完成人共同合作开展研究工作，包括共同承担科研项目、分方向指导研究生、合作发表论文，共同对本项目代表性论文做出了贡献。于灵敏教授（第 1 完成人）、范新会教授（第 2 完成人）共同完成代表性论文 1 和 5。李原（第 5 完成人）、于灵敏教授（第 1 完成人）、范新会教授（第 2 完成人）共同完成代表性论文 2；张波（第 5 完成人）、于灵敏教授（第 1 完成人）、戴正飞教授（第 3 完成人）共同完成代表性论文 3。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作起始时间	合作完成时间	合作成果	证明材料
1	论文合作	于灵敏、范新会/1、2	2004	2021	Dependence of Al ³⁺ on the growth mechanism of vertical standing ZnO nanowalls and their NO ₂ gas sensing properties	代表性论文 1
2	论文合作	李原、于灵敏、范新会/5、1、2	2017	2020	Graphdiyne Visible-Light Photodetector with Ultrafast Detectivity	代表性论文 2
3	论文合作	张波、于灵敏、戴正飞/5、1、3	2017	2020	Activating the Basal Plane of Defective SnS ₂ Nanosheets for NH ₃ Gas Sensing	代表性论文 3
5	论文合作	于灵敏、范新会/1、2	2016	2021	Both oxygen vacancies defects and porosity facilitated NO ₂ gas sensing response in 2D ZnO nanowalls at room temperature	代表性论文 5

承诺：本人作为项目第一完成人，对本项目完成人合作关系及上述内容的真实性负责，特此声明。