

电阻式气敏传感器：以微结构创新为途径，促进深层次科教融合

杨为家，申冬玲，何鑫，曹小兵

五邑大学应用物理与材料学院，广东 江门

收稿日期：2026年4月14日；录用日期：2026年10月16日；发布日期：2026年10月29日

摘 要

本文探讨了微结构创新在电阻式气敏传感器领域的发展，并基于此设计了一个面向本科生的光电综合训练教学模块，重点培养学生的创新思维与科研实践能力。该模块以具有微结构创新的电阻式气敏传感器为核心研究对象。通过光学显微镜、扫描电子显微镜、拉曼光谱、X射线衍射等技术，学生掌握了材料基本物理性能表征方法。利用气-湿敏综合测试系统，学生获取了传感器对乙醇的气敏响应数据，并进一步对传感器的性能提升机理进行了深入分析。本教学实践以教师的科研成果为基础，采用“引导式探究学习”的模式，引导学生独立完成器件制备、性能测试与结果分析的全过程，有效促进了科研成果向本科教学的深度转化，显著加深了学生对电阻式气敏传感器原理、工艺及应用的理解。

关键词

电阻式气敏传感器，微结构创新，探索性实验，科教融合

Microstructure Innovation in Resistive Gas Sensors: A Pathway to Deepening the Integration of Scientific Research and Undergraduate Education

Weijia Yang, Dongling Shen, Xin He, Xiaobing Cao

School of Applied Physics and Materials, Wuyi University, Jiangmen Guangdong

Received: April 14, 2026; accepted: October 16, 2026; published: October 29, 2026

文章引用: 杨为家，申冬玲，何鑫，曹小兵. 电阻式气敏传感器：以微结构创新为途径，促进深层次科教融合[J]. 创新教育研究, 2026, 14(10): 692-701. DOI: 10.12677/ces.2026.1410834

Abstract

This paper explores recent advances in the development of resistive gas sensors through microstructural innovation and, building on this foundation, designs an integrated optoelectronics training module for undergraduates, with an emphasis on cultivating creative thinking and practical research skills. The module takes resistive gas sensors featuring microstructural innovations as its central subject of study. Students are introduced to characterization techniques for basic material properties using optical microscopy, scanning electron microscopy, Raman spectroscopy, and X-ray diffraction. With the aid of a combined gas- and humidity-sensing test system, they collect sensor response data for ethanol and carry out an in-depth analysis of the mechanisms responsible for performance improvement. Grounded in the instructors' research achievements, this teaching practice adopts a guided inquiry-based learning model that enables students to independently complete the entire process of device fabrication, performance testing, and result analysis. It effectively promotes the deep translation of research outcomes into undergraduate teaching and significantly enhances students' understanding of the principles, fabrication processes, and applications of resistive gas sensors.

Keywords

Resistive Gas Sensor, Microstructure Innovation, Exploratory Experiment, Integration of Research and Education

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

气敏传感器是工业环境监测与日常安全防护中的关键器件，主要用于检测有毒有害气体，从而保障生产安全与人员健康[1][2]。此外，其在军事监测、公共安全、农业监测等领域也发挥着不可或缺的作用，例如用于密闭空间(如空间站、潜艇)内的生命气体(O_2 , CO_2)监控、痕量毒品检测以及农作物病虫害预警等[3]。根据检测原理，气敏传感器主要可分为催化燃烧式、电阻式、电化学式、光学式与声表面波式等类型。其中，电阻式气敏传感器因其结构简单、工艺成熟、成本较低、响应较快等优点而被广泛应用[3][4]。提升此类传感器性能的有效途径之一是增大其敏感材料的比表面积。随着低维材料与纳米技术的发展，利用微纳材料特有的高比表面积、丰富的表面活性位点及显著的尺寸效应等优势，有望显著改善电阻式气敏传感器的综合性能，展现出广阔的发展前景。目前，许多高校电子信息工程等相关专业的实验教学在器件制备与测试方面资源相对有限，尤其缺乏系统性的气敏传感器实训内容。为此，本文设计了一项基于微结构创新的电阻式气敏传感器综合性教学实验。该实验采用引导式探究学习的教学模式，围绕传感器工作原理、微结构设计、器件制备工艺、性能测试分析及实际应用等环节展开系统训练，旨在推动前沿科研成果向教学实践转化，培养学生分析和解决复杂工程问题的能力，并激发其创新意识。

2. 电阻式气敏传感器工作原理

电阻式气敏传感器的核心原理，是通过检测目标气体与半导体敏感材料表面相互作用所引起的材料

电导率(或电阻)变化来实现气体探测[5]。通常,器件需被加热至一个稳定的工作温度。当气体分子扩散至材料表面时,首先发生物理吸附,部分分子可能脱附,而另一部分则因损失动能被材料表面捕获,进而发生化学吸附[5]。在化学吸附过程中,若吸附分子的电子亲和能高于半导体材料的功函数,则分子将从材料表面获取电子,形成带负电荷的吸附离子(如 O_2 , NO_x),这类气体被称为氧化性气体或电子受主气体;反之,若半导体材料的功函数大于吸附分子的电离能,材料将从分子夺取电子,使其成为带正电荷的吸附离子(如 H_2 , CO , 碳氢化合物及醇类),这类气体则被称为还原性气体或电子给体气体[5]。对于N型半导体,吸附氧化性气体会消耗其表面电子,导致载流子浓度下降、电阻增大;而吸附还原性气体则会向材料注入电子,使载流子浓度增加、电阻减小。P型半导体的电阻变化规律与之相反(见图1)[5]。空气中氧分压相对稳定,半导体表面吸附氧的浓度在一定温度下会达到动态平衡,从而使器件基线电阻保持相对恒定。当目标气体引入后,其与表面吸附氧发生反应,打破这一平衡,引起电阻变化。通过建立电阻变化量与气体浓度之间的定量关系,即可实现气体浓度的检测[5]。

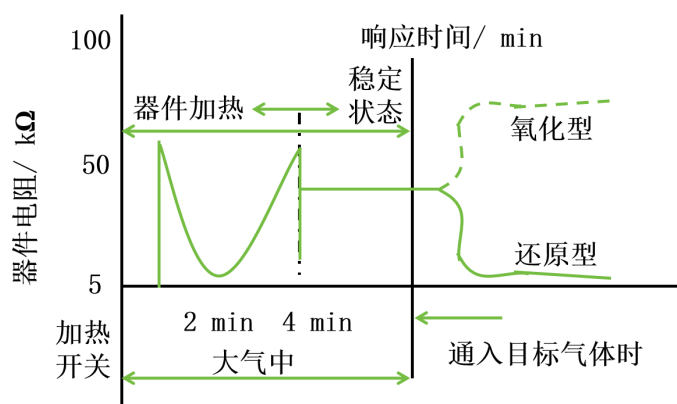


Figure 1. Schematic diagram of resistance change in an N-type semiconductor upon gas adsorption [5]

图1. N型半导体吸附气体时的电阻变化示意图[5]

3. 微结构创新在电阻式气敏传感器中的应用

传统电阻式气敏传感器常面临灵敏度低、响应/恢复慢、工作温度高等挑战。为提升其性能,研究者发展了多种策略,主要包括设计新型微纳结构、构建异质结、进行元素掺杂以及负载贵金属纳米颗粒等[6][7]。其中,构筑特定的微纳结构(如纳米线、纳米片、多孔结构等)能够极大增加材料的比表面积,暴露更多活性位点,并可能引入独特的电子传输特性,因而在气敏传感领域受到广泛关注并展现出巨大潜力(如图2所示)[6]。例如, Li 等人[8]设计并制备了具有纳米多孔和中空结构的 SnO_2/Zn_2SnO_4 异质结传感器,实现了对三乙胺的高性能检测。与纯 SnO_2 相比,该传感器在紫外光照射下的最佳工作温度从 $260^\circ C$ 降至 $120^\circ C$, 响应时间从 24 秒缩短至 14 秒。Sun 等人[9]报道的 CuO 敏化非晶 $ZnSnO_3$ 空心立方体传感器对 H_2S 表现出高灵敏度和选择性,在 $160^\circ C$ 下对 10 ppm H_2S 的响应值高达 574。Hu 等人[10]采用水热法制备的中空介孔 SnO_2/Zn_2SnO_4 异质结/还原氧化石墨烯(RGO)复合材料,在 $200^\circ C$ 下对 100 ppm 丙酮的响应达到 107。本课题组前期利用磁控溅射技术制备的氧化镓纳米线复合结构传感器,对氧气响应值达 20,且工作温度可降低至 $300^\circ C$ [11]。此外,以阳极氧化铝(AAO)为模板制备的锡酸锌纳米复合结构传感器对氢气表现出优异性能,响应值超过 300,响应时间仅 5 秒。在电化学沉积方面,本课题组已熟练掌握 ZnO 纳米线、 ZnO 纳米片、 ZnS 纳米片等多种纳米材料的可控制备工艺。这些扎实的科研积累为后续教学实验的设计与实施奠定了坚实基础。

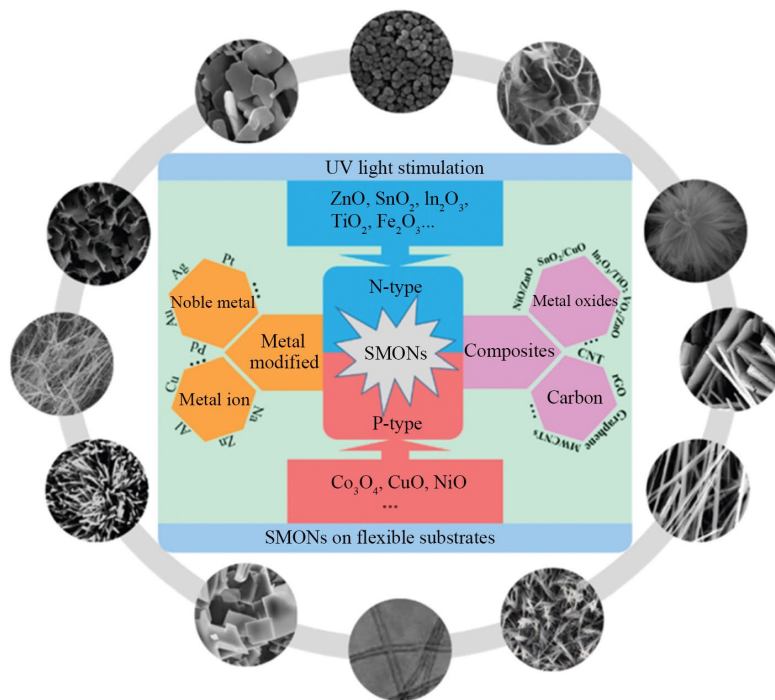


Figure 2. Schematic diagrams of selected room-/near-room-temperature gas-sensing materials based on oxide nanostructures [6]

图 2. 部分基于氧化物纳米结构的室温/近室温气敏传感材料示意图[6]

4. 基于微结构创新的电阻式气敏传感器教学实验设计

本综合实验面向大学三年级下半学期的电子信息工程专业(半导体绿色光源、光电工程方向)学生开设。此时,学生已完成《光电子学》《固体物理》《光电功能材料》《半导体物理与器件》等先修理论课程,具备了开展本实验所需的基础知识。本综合实验总学时 10~16 学时(课内学生 4 学时,课外学时 6~12 学时)。实验以电阻式气敏传感器为主题,以 ZnO 纳米材料为主要研究对象,重点探索基于微结构创新的传感器设计与性能。教学采用“引导式探究学习”的模式。实验前期,教师提供必要的理论和技术支持,协助学生完成实验方案设计;实验过程中,学生独立完成器件制备、部分表征测试、数据处理与分析及结果讨论。通过这种全程参与式的训练,学生不仅能深度体验科研探索过程,实现从理论知识到实践能力的升华,还能有效锻炼科学思维,培养创新意识和基本的科研素养。

4.1. 电阻式气敏传感器的制备

在器件制备环节，学生需首先通过文献调研，了解电阻式气敏传感器的常见制备方法(如化学气相沉积、磁控溅射、电化学沉积、阳极氧化等)，归纳其优缺点，并掌握工业生产与实验室研究中的常用技术。这有助于拓展学生的知识视野，对接未来的职业方向。教师将在实验方案设计阶段，根据实验室现有设备条件，引导学生确定以“一步法电化学沉积”作为本次实验的主要制备方法，并针对其中几种关键工艺进行提问和抽查。实验前，指导教师对学生进行电化学工作站的操作培训，确保其熟练掌握后方可开始实验。

学生以商业化的陶瓷叉指 Ag 电极为衬底,采用电化学沉积法直接生长 ZnO 纳米材料,构建传感器。具体实验流程如图 3 所示,主要包括:

- (1) 使用无水乙醇和去离子水对陶瓷电极进行超声清洗, 并在烘箱中干燥。

- (2) 以硝酸锌和六亚甲基四胺为溶质，去离子水为溶剂，配制电解液 A，磁力搅拌后转移至电解池。
- (3) 以硫酸亚铁和硫脲为溶质，去离子水为溶剂，配制电解液 B，磁力搅拌均匀备用。
- (4) 将陶瓷电极(工作电极)、Pt 片(对电极)和参比电极接入电化学工作站，依次在电解液 A 和 B 中沉积，分别生长 ZnO 纳米线/柱和 FeS 纳米片，最终形成基于 ZnO/FeS 复合微结构的电阻式气敏传感器。
- 为探究工艺参数的影响，学生可选择工作电压、生长温度、电解液浓度等 2~3 个关键变量，设计包含 3~5 个水平值的对照实验。例如，可设置 ZnO 生长电压分别为-1.0 V，-1.1 V，-1.2 V，-1.3 V。

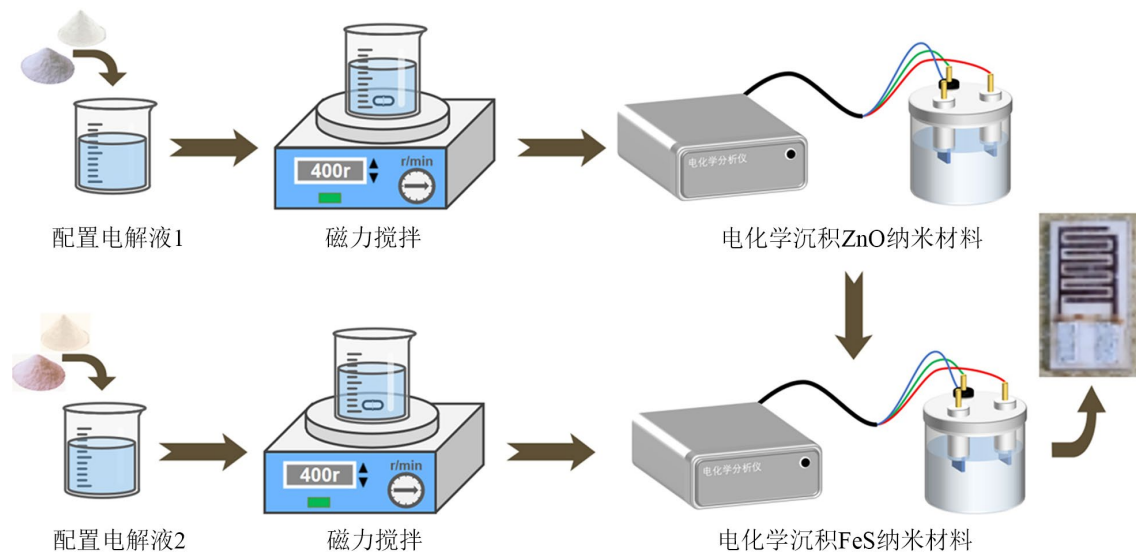
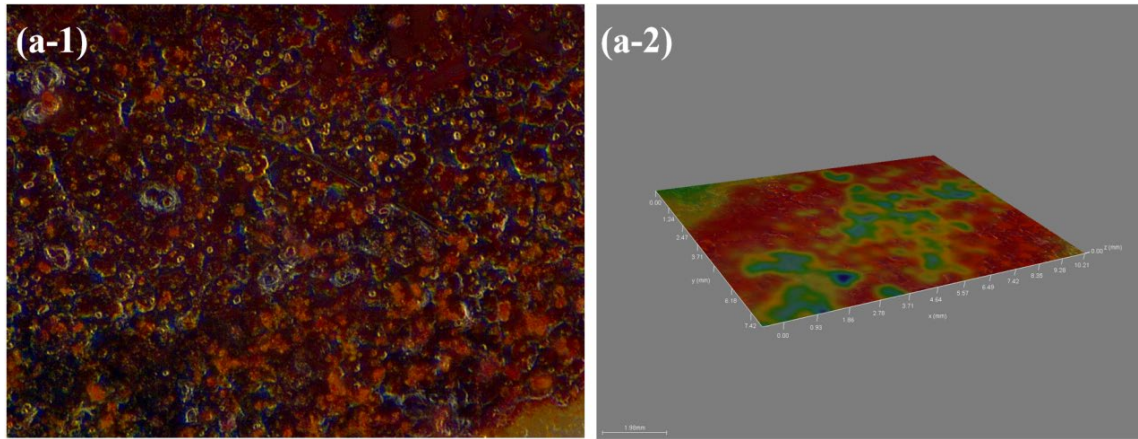


Figure 3. Fabrication process of ZnO/FeS nanocomposite gas sensors
图 3. ZnO/FeS 纳米复合材料气敏传感器制备流程图

4.2. 电阻式气敏传感器的材料基本表征

在性能表征前，教师布置预习任务，要求学生自主学习相关测试设备(光学显微镜、扫描电镜、X 射线衍射仪、拉曼光谱仪)的原理、操作及典型应用案例。正式测试前，教师集中讲解设备基本原理与安全事项。本次实验涉及的表征手段及其目的包括：莱卡 3D 光学显微镜和扫描电镜用于观察材料表面形貌与微观结构；X 射线衍射用于物相鉴定；拉曼光谱用于进一步确认物相、分析光学性质及缺陷态。为强化学生动手能力，光学显微镜和拉曼光谱的测试主要由学生独立完成。



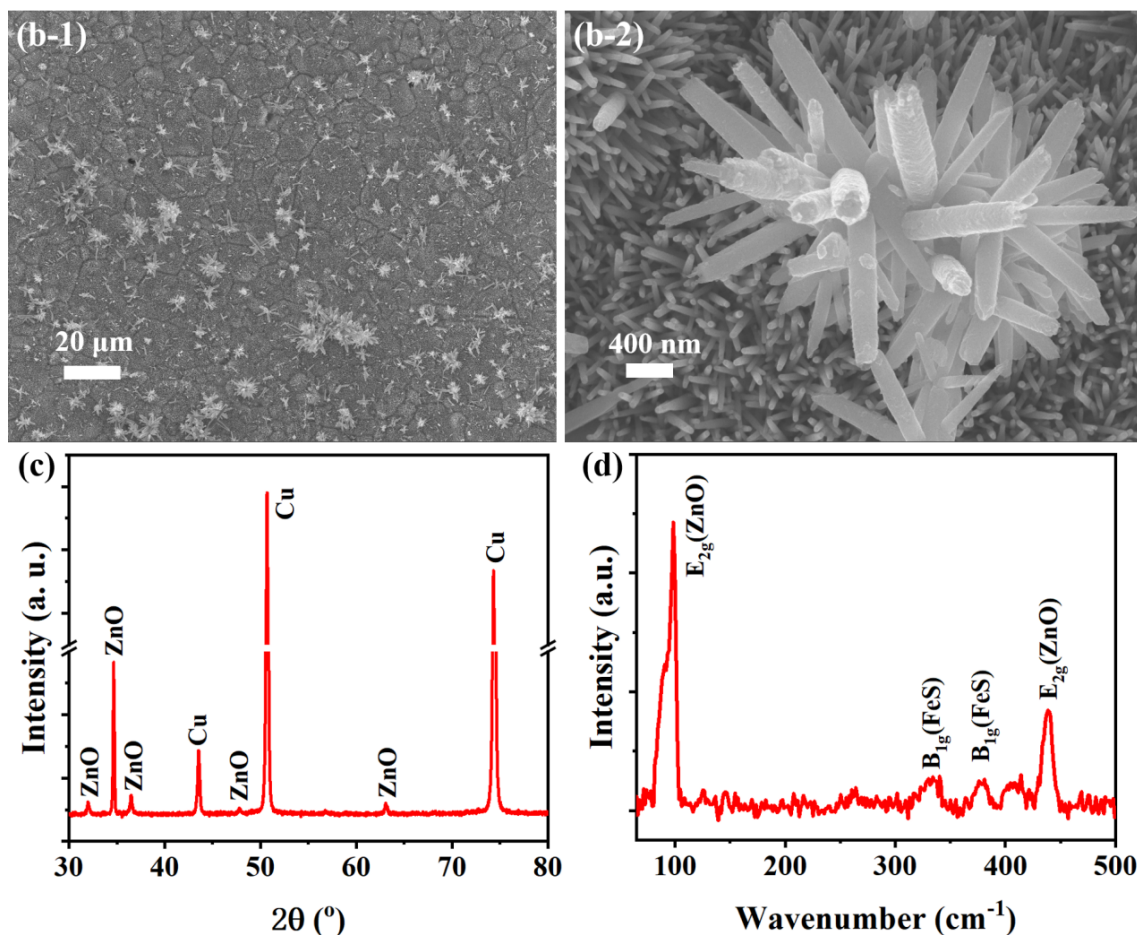


Figure 4. (a) Optical image and its 3D image, (b) SEM images, (c) XRD pattern and (d) Raman spectrum of ZnO/FeS nano-composite gas sensors

图 4. ZnO/FeS 传感器的(a) 显微镜照片及其 3D 图；(b) SEM 照片；(c) XRD 图谱；(d) 拉曼光谱

图 4(a)为所制备 ZnO/FeS 纳米复合材料传感器的光学显微照片，可见复合材料较为均匀地覆盖在叉指电极上，且表面存在明显起伏，预示其具有较大的比表面积。高倍 SEM 图像(图 4(b))清晰地展示了 ZnO 纳米线/柱与 FeS 纳米片交织的复合结构。图 4(c)为在铜衬底上同工艺制备的样品的 XRD 图谱，图中除 Cu 衬底的强衍射峰外，在 32.2°、34.3°、36.2°、47.9°、63.1°等处出现了归属于六方纤锌矿结构 ZnO 的特征衍射峰。由于 FeS 结晶性较弱或其主衍射峰可能被衬底峰掩盖，XRD 中未观察到明显的 FeS 衍射峰。图 4(d)为传感器的拉曼光谱，在 100 cm⁻¹ 和 434 cm⁻¹ 附近出现的两个特征峰分别对应 ZnO 的低声子 E₂ (low)和高声子 E₂ (high)振动模式[12]；而在 334 cm⁻¹ 和 377 cm⁻¹ 附近出现的峰可归属为 FeS 中 Fe-S 键的振动模式[13][14]，从而证实了 FeS 纳米片的存在。通过亲手操作仪器、获取并分析原始数据，学生得以将理论知识与实践观察紧密结合，完成从认知到应用的能力跃迁。

4.3. 电阻式气敏传感器气敏性能测试与机理分析

在教师指导下，学生使用气-湿敏综合测试系统对制备的 ZnO/FeS 传感器进行气敏性能测试。该系统主要由配气模块、带温控的样品测试腔、吉时利数字源表及控制计算机等组成(图 5)。为提高测试效率，学生需在测试前明确两个主要目的：一是比较不同生长电压对所制器件气敏性能的影响；二是建立传感器响应值与气体浓度之间的定量关系。

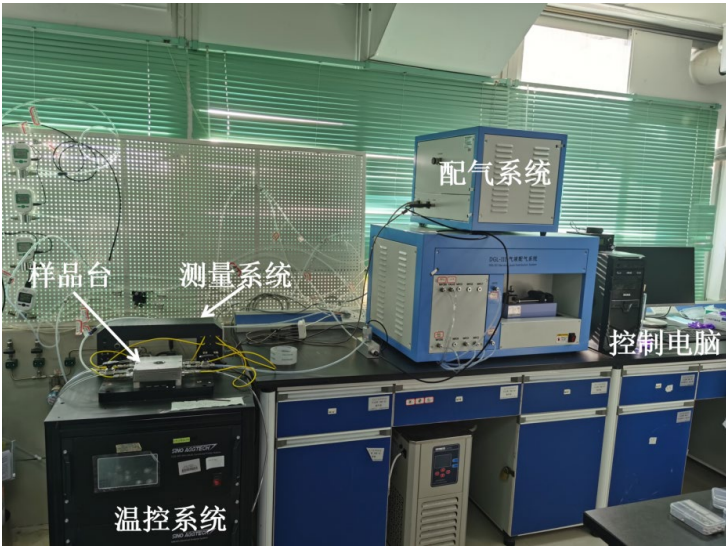


Figure 5. Gas-humidity sensing detection system
图 5. 气湿敏综合测试系统

图 6 展示了学生测试得到的、由不同电压生长的 ZnO/FeS 传感器在 275℃ 下对 50 ppm 乙醇的动态响应曲线。如图 6(a)所示, -1.1 V 条件下生长的传感器响应值约为 11.5, 且响应迅速, 响应时间仅 4.0 秒。相比之下, -1.15 V 条件下生长的传感器响应值仅为 5.6, 响应时间则长达 37.6 秒(图 6(b))。显然, -1.1 V 样品的响应值是 -1.15 V 样品的 2.05 倍, 而响应时间仅为后者的约十分之一, 这清晰地表明了生长电压对器件性能具有决定性影响。

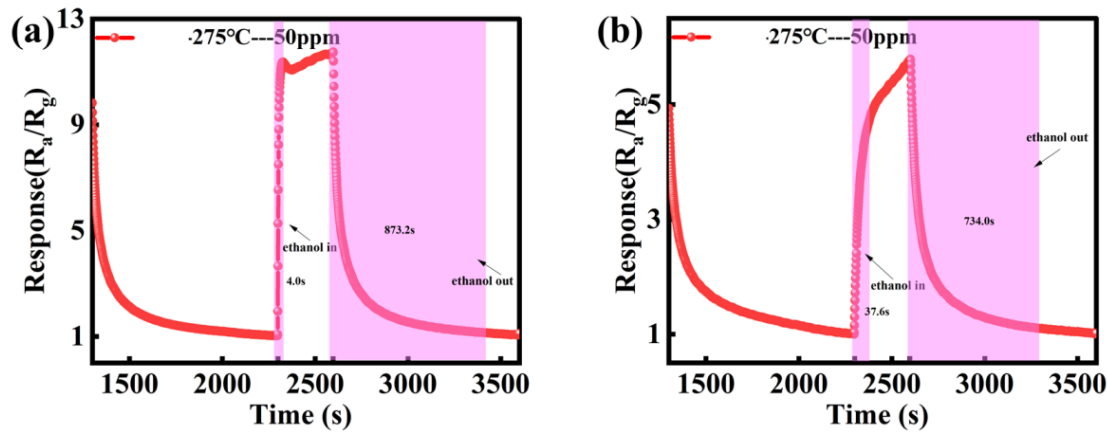


Figure 6. Responses of ZnO/FeS nanocomposite gas sensors to 50 ppm ethanol: (a) -1.1 V and (b) -1.15 V
图 6. ZnO/FeS 复合材料气敏传感器对 50 ppm 乙醇的响应: (a) -1.1 V 和(b) -1.15 V

图 7 展示了 -1.1 V 样品在 300℃ 下对不同浓度乙醇的响应及拟合结果。可以看出, 在 2~50 ppm 和 200~1000 ppb 两个浓度区间内, 传感器均表现出良好的线性响应。响应值(Y)与乙醇浓度(X)之间的关系可分别用以下方程描述:

$$Y = 0.285X + 6.117 \quad (2 \sim 50 \text{ ppm}, R^2 = 0.941) \quad (1)$$

$$Y = 0.0005X + 1.01 \quad (200 \sim 1000 \text{ ppb}, R^2 = 0.958) \quad (2)$$

至此, 学生完成了气体浓度与响应信号之间定量关系的构建。

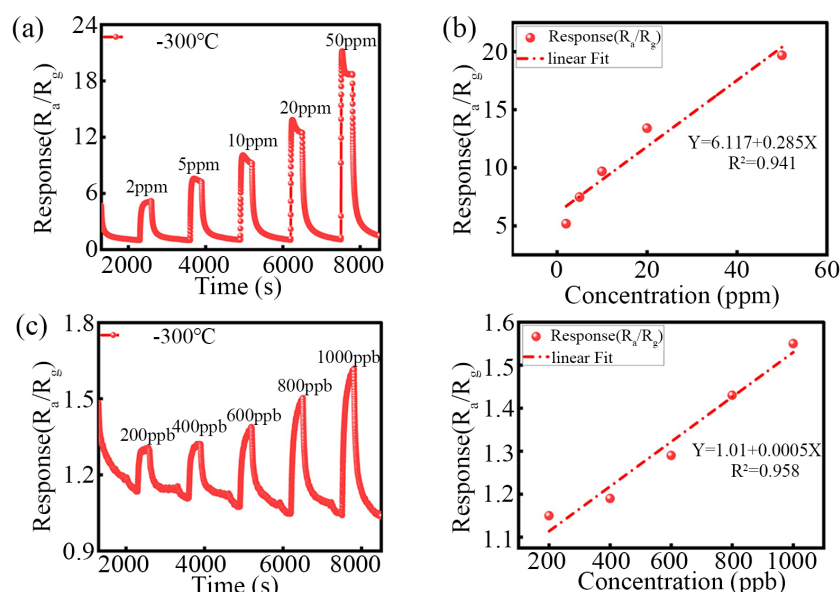


Figure 7. Responses of ZnO/FeS nanocomposite gas sensors: (a) to 2~50 ppm ethanol and (b) its corresponding fitting curve; (c) to 200~1000 ppb ethanol and (d) its corresponding fitting curve

图 7. ZnO/FeS 复合材料气敏传感器对乙醇的响应图: (a) 2~50 ppm 的连续响应及其(b) 线性拟合图; (c) 200~1000 ppb 的连续响应及其(d) 线性拟合图

在此基础上,引导学生去发现器件性能与微纳结构(SEM、XRD 等测试结果)之间的内在联系,即构效关系。通过构效关系的建立,使学生深刻理解器件为什么可以获得好性能,进而理解实际工程研发中“需求分析与方案设计-样品实现(试样)-测试、仿真与验证-性能评估与问题分析-方案调整、工艺优化、批量验证”的模式。

尽管获得了初步的传感性能,但结果仍有优化空间。为培养学生的工程优化思维和精益求精的态度,教师引导学生查阅文献,探索进一步提升传感器性能的途径。文献表明,利用 Pt、Au、Ag 等贵金属纳米颗粒对气敏材料表面进行修饰,是一种有效且简易的改性方法[15]-[17]。如图 8 机理示意图所示[18],贵金属修饰主要发挥双重作用:一是其催化效应可促进气体分子的解离与表面反应,增加活性吸附氧物种的浓度,从而显著提升响应值;二是贵金属与半导体之间可能形成肖特基结,调制材料表面的电子耗尽层,利于电荷传输,从而加快响应速度[18]。学生在理解该原理后,可结合实验室条件,将贵金属修饰作为优化策略引入新一轮的实验设计,开展更深层的探索。这种以实际问题为导向的迭代式研究训练,能有效激发和培养学生的创新能力。

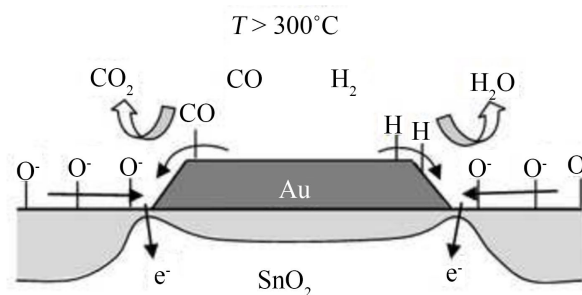


Figure 8. Schematic illustration of the mechanism for performance enhancement in gas sensors via metal modification [18]

图 8. 金属修饰增强气敏传感器性能的机理示意图[18]

5. 教学效果

本教学实践融合了文献调研、精读研讨、课前预习与小组协作等多种方法,将指导教师的前沿科研成果有机融入实验内容,鼓励学生尝试新颖的微结构设计。该模式在保障实验教学核心目标的同时,显著增强了学生的参与感与成就感,拓展了其学术视野,并有助于塑造批判性思维与创新思维。

课后问卷调查显示,通过完整参与实验全过程,85%以上的学生的动手能力与创新意识得到明显提升。他们不仅深入理解了电阻式气敏传感器的基本原理,还切实掌握了半导体器件相关仪器的操作,并对学科前沿进展有了更直观的认识,教学效果显著。具体体现在以下两个方面:

(1) 实验技能与工程能力提升:在实验操作阶段,教师鼓励学生基于 ZnO 纳米片、纳米柱、纳米花等不同形态,自主设计或复合新型微结构,提升了其解决复杂工程问题的能力。实验结束后,学生能熟练掌握电化学沉积制备 ZnO 纳米材料的工艺流程与关键控制点,并能基本独立操作拉曼光谱仪、气敏测试系统等大型仪器。这些核心实验技能的掌握对学生完成本科毕业设计乃至未来从事科研工作至关重要,显著增强了其科研基础素养。

(2) 数据分析与机理探究能力深化:在数据处理与讨论阶段,学生自主学习使用专业的数据分析与科研绘图软件,同时为了合理解释实验现象,会主动深化对气敏传感机理的理解。他们能够对实验结果进行初步分析,并提出进一步的性能优化设想。这为学生未来从事微纳器件设计、新技术开发及相关应用研究奠定了扎实基础。

教学评价从微结构设计的创新性、实验操作的规范性、环保意识以及实验报告质量四个维度综合考查学生的学习效果。通过本实验,学生不仅理解了“结构决定性能”的内涵与实践路径,巩固了绿色化学理念,也深化了对工作温度、选择性、响应/恢复时间等关键性能参数的认识,具备了系统测试与分析传感器性能的初步能力。在实验报告中,学生能够简要评述相关领域进展,完整、规范地记录实验过程与结果,并进行恰当的分析与讨论,得出较合理的结论。经过系统的训练,学生的综合实践与创新能力得到了明显提升。

6. 结束语

本文设计的电阻式气敏传感器综合教学实验,成功地将半导体材料的微结构创新这一前沿研究方向转化为本科生实践教学的有效载体。在教学实施中,指导教师将最新科研成果及“以结构创新驱动性能提升”的研究理念有机融入各教学环节,着力培养学生将创新构想转化为实践方案并加以验证的能力与思维习惯。学生通过亲历器件制备、性能测试、数据分析与机理探讨的全过程,深化了对基础理论及科研成果转化应用的理解,实现了从知识获取到能力生成的有效迁移。这一富有成效的科研实践体验,不仅夯实了学生的基本科研技能,更激发了其探索未知的科研兴趣与追求卓越的创新意识。

基金项目

广东省 2022 年度教育科学规划课题(高等教育专项)“以培养技术创新型人才为导向,探索《光电功能材料》课程中的创新教育”(项目编号:2022GXJK354);2022 年度五邑大学校级本科高质量课程建设与创新创业教育建设改革项目“光电功能材料”(项目编号:KC2022081)。

参考文献

- [1] 林毓韬,徐涛,程定峰,等. 新型氧化物半导体气敏传感器的研究进展[J]. 材料导报,2011,25(23): 45-48.
- [2] 陈享享,刘天豪,欧阳云飞,等. 基于金属氧化物半导体的瓦斯气体传感器研究现状及进展[J]. 金属矿山,2023(11): 34-44.

- [3] 林毓韬, 张谨, 邓宇翔, 等. 丙酮气敏传感器研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(A1): 410-414.
- [4] 张静宜, 孟哈日巴拉, 张战营. 金属氧化物半导体基三乙胺传感器研究进展[J]. 无机盐工业, 2021, 53(12): 67-73.
- [5] 刘国华, 杜忻锐. 半导体气敏传感器的原理及应用[J]. 煤炭技术, 2001, 20(9): 11-12.
- [6] Li, Z., Li, H., Wu, Z., Wang, M., Luo, J., Torun, H., *et al.* (2019) Advances in Designs and Mechanisms of Semiconducting Metal Oxide Nanostructures for High-Precision Gas Sensors Operated at Room Temperature. *Materials Horizons*, **6**, 470-506. <https://doi.org/10.1039/c8mh01365a>
- [7] Degler, D., Weimar, U. and Barsan, N. (2019) Current Understanding of the Fundamental Mechanisms of Doped and Loaded Semiconducting Metal-Oxide-Based Gas Sensing Materials. *ACS Sensors*, **4**, 2228-2249. <https://doi.org/10.1021/acssensors.9b00975>
- [8] Li, H., Ma, Q., Guo, J., Zhang, Q., Wang, X. and Wang, Y. (2022) Enhanced Surface Electron Migration of Porous and Hollow SnO₂/Zn₂SnO₄ Heterostructures for Efficient Triethylamine-Sensing Performance. *Applied Surface Science*, **597**, Article 153752. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153752>
- [9] Sun, C., Shao, J., Wang, Z., Liu, H., Li, Z., Zhang, H., *et al.* (2022) CuO-Sensitized Amorphous ZnSnO₃ Hollow-Rounded Cubes for Highly Sensitive and Selective H₂S Gas Sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **362**, Article 131799. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131799>
- [10] Hu, J., Xiong, X., Guan, W. and Tan, C. (2022) Hollow Mesoporous SnO₂/Zn₂SnO₄ Heterojunction and RGO Decoration for High-Performance Detection of Acetone. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **14**, 55249-55263. <https://doi.org/10.1021/acsaami.2c18255>
- [11] Zhao, J., Qin, B., Liu, L., Liang, C., Zhang, Y., Yang, W., *et al.* (2023) Enhanced Low-Temperature Response of Ga₂O₃-Based Oxygen Sensor by Modulating the Surficial Micro-Nano Structures. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **378**, Article 133180. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.133180>
- [12] Zhang, R., Yin, P., Wang, N. and Guo, L. (2009) Photoluminescence and Raman Scattering of ZnO Nanorods. *Solid State Sciences*, **11**, 865-869. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2008.10.016>
- [13] Zhou, G., Shan, Y., Wang, L., Hu, Y., Guo, J., Hu, F., *et al.* (2019) Photoinduced Semiconductor-Metal Transition in Ultrathin Troilite Fe Nanosheets to Trigger Efficient Hydrogen Evolution. *Nature Communications*, **10**, Article No. 399. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08358-z>
- [14] Xu, Y., Li, W., Zhang, F., Zhang, X., Zhang, W., Lee, C., *et al.* (2016) *In Situ* Incorporation of Fe Nanoparticles/Carbon Nanosheets Composite with an Interconnected Porous Structure as a High-Performance Anode for Lithium Ion Batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, **4**, 3697-3703. <https://doi.org/10.1039/c5ta09138a>
- [15] Chen, X., Shen, Y., Zhou, P., Zhong, X., Li, G., Han, C., *et al.* (2019) Bimetallic Au/Pd Nanoparticles Decorated ZnO Nanowires for NO₂ Detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **289**, 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.03.095>
- [16] Yousefi, H.R., Hashemi, B., Mirzaei, A., Roshan, H. and Sheikhi, M.H. (2020) Effect of Ag on the ZnO Nanoparticles Properties as an Ethanol Vapor Sensor. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **117**, Article 105172. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105172>
- [17] Lu, S., Zhang, Y., Liu, J., Li, H., Hu, Z., Luo, X., *et al.* (2021) Sensitive H₂ Gas Sensors Based on SnO₂ Nanowires. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **345**, Article 130334. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130334>
- [18] Korotcenkov, G., Brinzari, V., Gulina, L.B. and Cho, B.K. (2015) The Influence of Gold Nanoparticles on the Conductivity Response of SnO₂-Based Thin Film Gas Sensors. *Applied Surface Science*, **353**, 793-803. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.06.192>