



基于场效应管型气敏传感器的微电子工艺 实验设计

王海珍¹, 冯德海¹, 李德慧^{2*}

(1. 华中科技大学 集成电路学院, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430074)

摘要: 现阶段我国集成电路产业人才短缺, 培养具有创新实践能力的集成电路产业人才刻不容缓。微电子工艺是集成电路的基础, 更是培养集成电路人才创新实践能力的重要实践课程。因此, 设计了基于场效应管型气敏传感器的微电子工艺实验, 采用微电子工艺方法制备硅基电极并利用水相法制备敏感材料 SnO₂/ZnO 得到场效应管型气敏传感器。采用 X 射线衍射对敏感层材料进行表征, 并进一步对传感器的气敏性能进行测试。该实验涵盖了材料合成及表征、微电子工艺、器件制备、气敏特性测试等手段, 涉及材料学、微电子及集成电路学科, 并将科研内容与实验教学相结合, 有助于激发学生的科研兴趣, 进而培养学生的创新实践能力。

关键词: 微电子工艺实验; 场效应管型; 气敏传感器; 气敏性能

中图分类号: TN386.4

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240056

Design of Microelectronic Process Experiment Based on Field-Effect Transistor Gas Sensors

WANG Haizhen¹, FENG Dehai¹, LI Dehui^{2*}

(1. School of Integrated Circuits, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: At present, China is facing a talent shortage in the integrated circuit industry, and it is imperative to cultivate talents with innovative and practical capabilities. Microelectronic process is the foundation of integrated circuits, and is also an important practical course for cultivating the innovative and practical abilities of integrated circuit talents. Therefore, a microelectronic process experiment based on field-effect transistor gas sensors is designed. Silicon-based electrodes are fabricated using the microelectronic process method, and the sensitive material SnO₂/ZnO is synthesized via the aqueous phase method to construct the field-effect transistor gas sensors. X-ray diffraction is used to characterize the sensitive layer material, and the gas sensing performance of the sensors is further tested. This experiment encompasses material synthesis and characterization, microelectronic process, device fabrication and gas sensing performance testing. It is involved in materials science, microelectronics and integrated circuits, and incorporates research content into experiment teaching. This approach can help stimulate students' interest in scientific research and further cultivate their innovative and practical capabilities.

Key words: microelectronic process experiment; field-effect transistor; gas sensor; gas sensing performance

集成电路产业作为信息产业的核心, 是社会发展的基础性产业, 其发展水平关系到国家的综合国力。然而现阶段我国集成电路产业人才短缺^[1], 根据《集成电路产业人才发展报告(2020—2021年版)》, 截至 2023 年集成电路行业人才缺

口或达 20 万人。因此, 培养具有创新实践能力的应用复合型集成电路产业人才刻不容缓, 是我国高等教育的新目标^[2]。微电子工艺是集成电路产业的基础, 是集成电路制造的关键手段, 更是培养集成电路和微电子专业学生实践能力的重要实践

收稿日期: 2024-02-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62074064); 华中科技大学实验技术研究项目面上项目(校技改 2023-16, 2025-2-38)。

作者简介: 王海珍, 博士, 工程师, 主要从事集成电路传感器及微纳器件方面的研究。E-mail: wanghz@hust.edu.cn

* 通信作者: 李德慧, 博士, 教授, 主要从事新型微纳光电器件方面的研究。E-mail: dehuili@hust.edu.cn

课程^[3-4]。

受实验场地特殊以及设备昂贵等条件的限制,当前国内各高校的微电子工艺实验教学多采用软件仿真及实习等方式开展,学生自主动手完成集成电路制造的实践教学较为少见^[5]。因此,如何基于现有资源,构建并完善实验流程,让学生自主实现设计、制造及测试等半导体工艺制造全流程的微电子工艺实践课程尤为关键^[6-7]。通过对集成电路工艺实践课程设计的探索,让学生自主动手参与微电子工艺课程的实践学习,可有效地使学生将理论知识与实践结合,进而培养学生的创新实践能力,实现具备理论知识和较强动手能力的应用创新型集成电路人才的培养,为突破集成电路产业“卡脖子”现状增加储备力量。

“强化科研育人功能,推动高校及时把最新科研成果转化为教学内容”是教育部在2019年发布的《关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量的意见》中提出的要求^[8]。因此将科研成果纳入实验教学,实现创新人才培养是高校人才培养的目标。气敏传感器因其对各类气体的检测性能在智能家居、环境监测、工业过程等方面有很大的应用前景,是电子专业的特色研究方向^[9]。场效应管型的气敏传感器^[10]满足器件小型化和高度集成化的需求,成为当前研究的热点。本文设计了基于场效应管型气敏传感器的微电子工艺制备实验,学生自主完成器件设计、掩模版设计、器件制备及测试的全过程,有利于培养学生的创新实践能力,为培养集成电路应用复合型人才打好基础。

1 微电子工艺实验设计

微电子工艺课程设计基于理论课程“微电子工艺学”,面向集成电路设计与系统和微电子科学与工程专业的本科生开设。旨在通过理论及实践课程学习,使学生掌握集成电路微电子器件制造,包括光刻、溅射、蒸发、离子注入、扩散等主要工艺步骤,掌握构成硅平面工艺的关键单项工艺原理,能够将课程所学知识运用到微电子器件工艺集成,为后续集成电路的设计、制造及相关科研打下坚实的理论和技術基础。

实验建议4~5个学生组成一组^[11],课程采取

开放式预约形式,学生可以自主选择器件类型和实验间,通过合理分工与合作,完成文献调研,进而实现“器件工艺仿真—掩模版设计—器件制备—测试”的制备流程。实验开始前先进行安全实验操作培训/单项工艺的理论课程和设备操作学习,确保学生安全顺利完成实验。该实验可以让学生学习集成电路工艺全链条流程,包括集成电路工艺仿真、版图绘制、工艺制造及器件测试等。

评价体系是检验实验教学的举措和实施是否达到教学目标的主要依据。本实验结合阶段评价和综合评价于一体,采取“实验操作过程、实验报告撰写、面试问答效果”三位一体的评价体系。该体系包括:实验过程中操作是否规范、实验步骤是否合理、是否掌握关键知识点;在实验报告中实验方案设计及数据统计分析是否合理正确、是否结合理论知识探究原理;面试问答过程通过与学生互动检验学生实验内容的掌握情况和教学反馈效果。从而形成“以学生为中心”的实验教学体系,持续改进实验内容,提高实验教学质量,培养学生的创新实践能力。

2 基于场效应管型的气敏传感器的微电子工艺制备

2.1 实验材料与仪器

实验材料:SiO₂(300 nm)/Si片、Au/Cr电极材料、四氯化锡(SiCl₄·5H₂O)、醋酸锌(Zn(Ac)₂·2H₂O)、柠檬酸(C₆H₁₀O₈)、光刻胶(AZ5214)、显影液(ZX-238)。

实验仪器:超声清洗机(KQ5200E)、匀胶机(EZ4)、热板(SC-H-1)、热蒸镀(JSD400)、光刻机(URE-2000/17)、磁力搅拌器、电子天平(ME-303E)、X射线衍射仪(XRD-7000)、超纯水机(成都渗源SHOWT)、干燥箱(DHG-9030A)。

2.2 场效应管型气敏传感器的制备

2.2.1 实验流程

场效应管型气敏传感器的器件结构设计如图1所示^[12],器件以SiO₂/Si(N型,电阻率为0.01~0.02 Ω·cm)衬底为底栅,300 nm厚度的SiO₂为介电层,蒸镀的Cr/Au电极分别为源和漏极,沟道宽度20 μm。

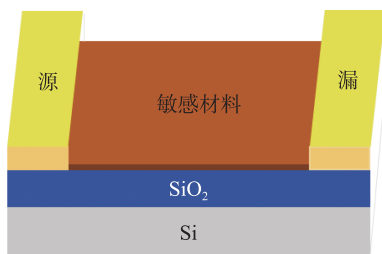


图 1 场效应管型气敏传感器的器件结构图

制备的基本流程如图 2 所示。采用配位剂配位辅助的水相法，以 SnO_2/ZnO 复合材料为敏感材料，采用微电子工艺制备方法得到器件的电极结

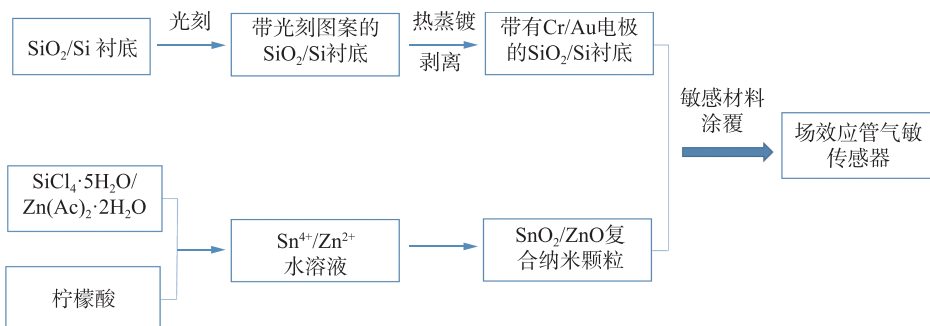


图 2 场效应管型气敏传感器的制备流程图

SnO_2 的制备：实验制备纯 SnO_2 作为对比，除未加入醋酸锌原料外，所采用的其他原材料用量、反应温度和时间与上述相同，煅烧后得到淡黄色粉体。

2.2.3 气敏传感器衬底电极的微电子工艺制备

传感器衬底电极的微电子工艺制备工艺流程如图 3 所示，采用两指电极作为初始电极，电极宽度为 $20\ \mu\text{m}$ ，电极间距即沟道宽度为 $20\ \mu\text{m}$ 。

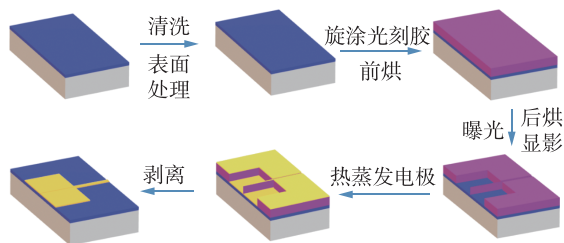


图 3 气敏传感器衬底电极的微电子工艺制备流程图

1) 衬底清洗。选取表面带有 $300\ \text{nm}\ \text{SiO}_2$ 氧化层的硅片作为衬底，亦可采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)让学生自己生长氧化层，依次采取丙酮/乙醇和去离子水进行清洗并用高纯氮吹干，将硅片在 $120\ ^\circ\text{C}$ 下浸泡在六甲基二硅氮烷， $200\ \mu\text{L}$ 六甲基二硅氮烷(HDMS)，保持 $30\ \text{min}$ ，随后用异丙醇清洗硅片得到疏水表面。

构，最后用涂覆方法得到器件待测。

2.2.2 敏感材料的制备

SnO_2/ZnO 复合材料的制备：根据参考文献 [13]，采取摩尔比约为 $20:1$ 的原材料制备复合材料，分别称取 $20.5\ \text{mmol}$ 柠檬酸， $0.5\ \text{mmol}$ $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 $10.0\ \text{mmol}$ 四氯化锡倒入含有 $15\ \text{mL}$ 去离子水的烧杯中， $1000\ \text{rad/min}$ 磁力搅拌 $30\ \text{min}$ 使其充分溶解，随后将溶液转移至坩埚内，在马弗炉中 $600\ ^\circ\text{C}$ 下煅烧 $2\ \text{h}$ ，自然冷却至室温后得到白色粉体备用。

2) 采用光刻和热蒸镀方法制备 $50\ \text{nm}\ \text{Cr}/50\ \text{nm}\ \text{Au}$ 电极于 $\text{SiO}_2(300\ \text{nm})/\text{Si}$ 衬底上。采用 AZ5214 光刻胶在 $3500\ \text{rad/min}$ 转速下旋涂 $60\ \text{s}$ 完成匀胶后在 $100\ ^\circ\text{C}$ 条件下前烘 $2\ \text{min}$ ，在光刻机下曝光 $3\ \text{s}$ 后再次转移至热板后烘 ($115\ ^\circ\text{C}$ ， $2\ \text{min}$)，进一步裸曝光 $15\ \text{s}$ ，在显影液中浸没约 $25\sim 30\ \text{s}$ 直至全部图案出现，最后采用去离子水清洗并用高纯氮气吹干。采用热蒸发蒸镀电极，分别用机械泵和真空泵抽真空到电离基元显示 7×10^{-4} 时，调节电流大小约为 $60\ \text{A}/40\ \text{A}$ 分别蒸镀厚度均为 $50\ \text{nm}$ 的 Cr/Au 电极，蒸镀完毕依次停止分子泵、电磁阀和机械泵，最后放气取样，采取丙酮剥离方式最后得到所需要的硅片衬底电极。

2.2.4 气敏性传感器制备及测试

将制备的敏感材料充分研磨并分散在无水乙醇中得到浆料，最后旋涂浆料 ($3000\ \text{rad/min}$ ， $30\ \text{s}$) 于衬底上得到气敏传感器。制备好的器件直接使用基于 Keithley 2450 源表的测试系统进行气敏测试，在常压 $1.01\times 10^5\ \text{Pa}$ 、 $20\ ^\circ\text{C}$ 和相对湿度为 40% 条件下体积为 $12\ \text{L}$ 的亚克力密封室内完成。测试装置如图 4 所示，在测试过程中，其中一个源表通道接传感器的源极与漏极，用于扫描漏

源电压并测量漏源电流, 另一源表的通道接传感器的源极与栅极, 控制栅极电压相对于源极电压的值。

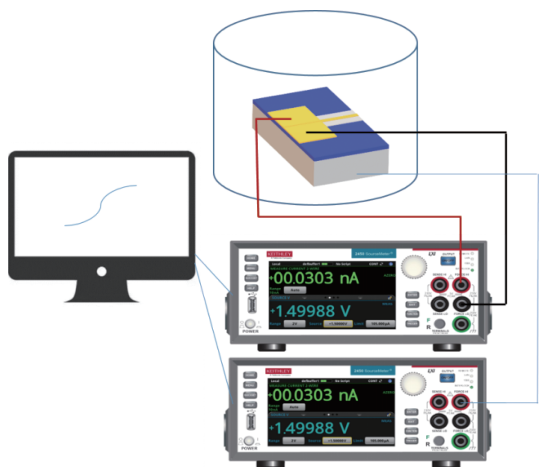


图 4 气体传感器测试装置示意图

3 实验结果与讨论

3.1 X 射线衍射

X 射线衍射用于表征纯 SnO_2 和 SnO_2/ZnO 复合材料的晶相和纯度。实验采用 XRD-7000 衍射仪在 $20^\circ\sim 80^\circ$ 范围内($\text{Cu K}\alpha$ 射线, $\lambda=1.54056\times 10^{-10}\text{m}$) 对水相法制备的上述敏感材料进行测试表征。如图 5 所示, 粉末的衍射峰都与 SnO_2 标准卡片(JCPDS 41-1445)有较好的吻合, 属于四方晶系^[14], 可以基本确定样品为 SnO_2 。样品中没有观测到其它杂质峰, 表明 SnO_2 样品的纯度较高, 衍射峰相对较窄, 表明样品结晶度较高。

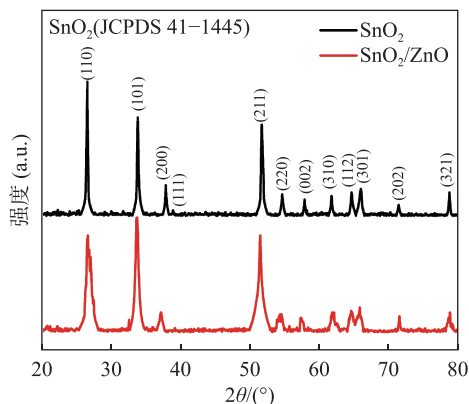


图 5 所制备的敏感材料的 X 射线衍射图谱

将所制备白色粉体复合材料的 X 射线衍射花样与 SnO_2 标准卡及 ZnO 标准卡对比, 观察到结果与 SnO_2 标准卡(JCPDS 41-1445)基本一致。这是由于掺杂的 ZnO 量非常少, ZnO 衍射峰不明显

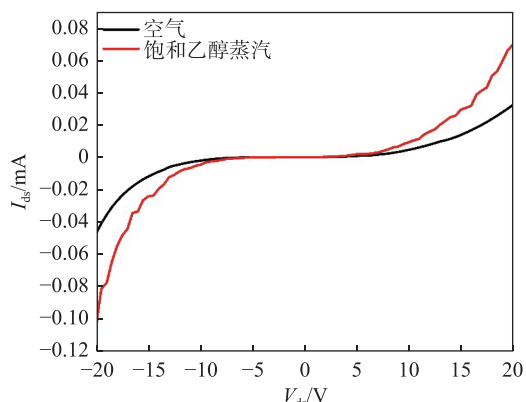
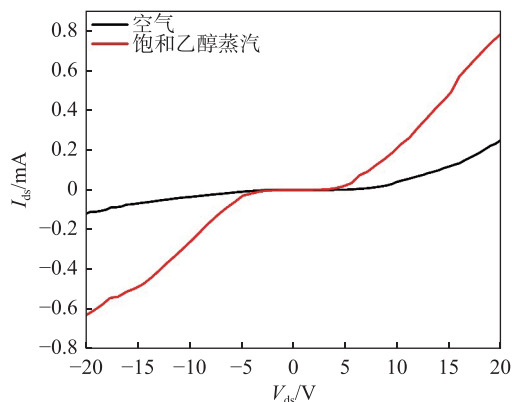
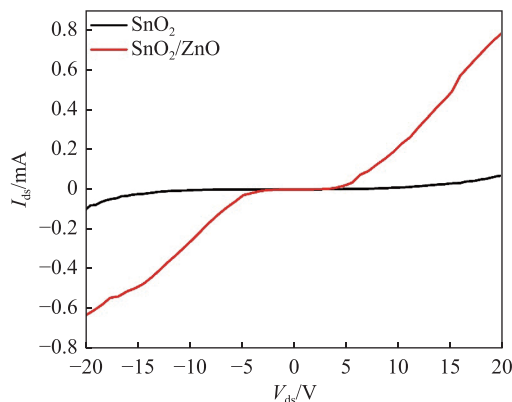
所致, 并且 ZnO 掺杂后复合材料的衍射峰出现宽化现象, 说明复合材料颗粒粒度变小。

3.2 单一材料与复合材料的 I-V 特性对比

将不同的金属氧化物进行复合形成异质结构是提高半导体气体传感器气敏性能的有效方法之一, 因此本文将 ZnO 与 SnO_2 材料复合作为复合敏感层。单一 SnO_2 和 SnO_2/ZnO 复合材料制备的气敏传感器在空气和 70×10^{-6} 乙醇蒸气中的气敏响应 I-V 特性曲线如图 6(a)和图 6(b)所示。从图中可以看出, 单一材料和复合材料对于空气和饱和乙醇蒸汽都有一定的响应, 且对于饱和乙醇蒸汽的响应电流明显增大。对比图 6(a)和图 6(b)可以看出, 在空气中, SnO_2/ZnO 复合材料器件的电流高于单一材料 SnO_2 器件的电流, 这可能归因于 SnO_2 对空气中的 CO_2 气体也存在敏感响应^[15]。前期研究发现, CO_2 可以吸附在 SnO_2 表面并且与表面的 O^- 离子反应生成 $(\text{CO}_3)^{2-}$, 进一步捕获 SnO_2 中的自由电子, 从而使 SnO_2 材料在吸附 CO_2 后电阻增大^[16]。然而当掺杂 ZnO 后, Sn^{4+} 被 Zn^{2+} 替换, 增加了氧空位浓度^[17], 因此, 在 SnO_2 中掺杂 ZnO 提高了材料的导电性, 进而使得器件气敏响应测试中器件的电流增加。 SnO_2 材料对于 CO_2 气敏响应的机理尚需要进一步研究。

如图 6(c)所示, 进一步对比单一 SnO_2 和 SnO_2/ZnO 复合材料对乙醇饱和蒸汽的响应, 发现 SnO_2/ZnO 复合材料的响应电流变化远远大于单一 SnO_2 材料, 表明 SnO_2/ZnO 复合材料比单一 SnO_2 材料对于乙醇气体具有更为优异的气敏性能, 这可能是由于复合材料内部会形成 SnO_2/ZnO n-n 型异质结的原因。 ZnO 和 SnO_2 均属于 n 型半导体, 但其功函数不同, 分别为 5.2 eV 和 4.9 eV, SnO_2 费米能级高于 ZnO , 当两者形成异质结后, 电子会从 SnO_2 导带向 ZnO 导带转移, 导致能带弯曲, SnO_2 失去电子会产生电子耗尽层, 而 ZnO 得到电子会产生电子积累层, 直至两者达到费米能级平衡状态^[18]。电子迁移导致 SnO_2 电子耗尽层变宽, 电子累积会使表面电子浓度增加, 材料表面吸附的氧增多, 大量氧分子捕获自由电子会变成吸附氧物种 O^{2-} 、 O^- 或 $\text{O}^{\cdot-}$ 并使电子积累层变小^[19], 界面处势垒高度增加, 复合材料的电阻阻值升高。当接触到具有还原性的气体如乙醇时, 气体会与材料表面的氧物种氧化, 发生氧化还原反应, 被氧分子捕获的电子释放回复合材料的导带

中,材料表面自由电子变多导致耗尽层厚度变小,界面势垒变小,进而使气体传感器的电阻阻值降低,相应的导致气体传感器的响应值升高。因此,选取复合材料来测试场效应管型气敏传感器的气敏响应性能^[20]。

(a) SnO₂材料的气敏特性(b) SnO₂/ZnO材料的气敏特性

(c) 两种材料气敏特性对比

图6 SnO₂和SnO₂/ZnO复合材料的气敏*I-V*特性对比图

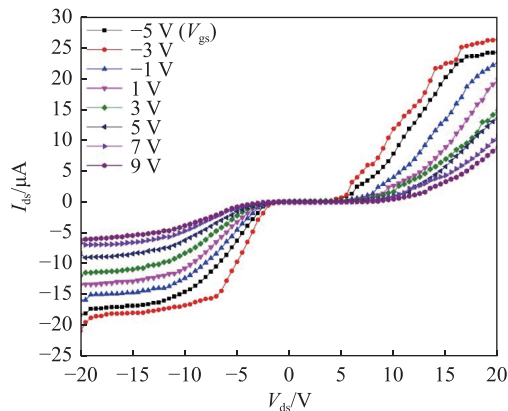
3.3 场效应管型气敏传感器的气敏性能

我们进一步测试了场效应管型基于SnO₂/ZnO复合材料的气敏传感器的气敏性能。气敏传感器在空气和70×10⁻⁶乙醇气体中,在不同栅压(-5~9 V)调控下的输出特性(*I_{ds}*-*V_{ds}*)曲线如

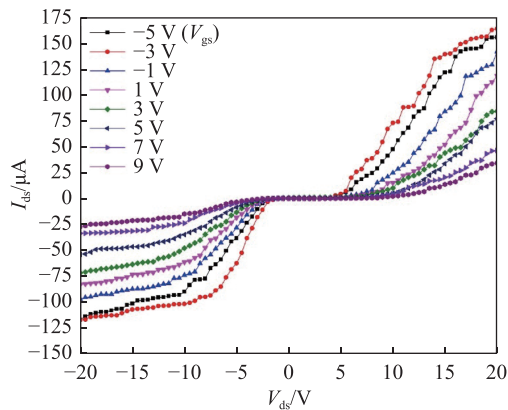
图7所示。测试是在自然光下温度20℃、相对湿度50%的室内环境中进行,调控栅压从-5 V到9 V,每隔2 V测试,源漏电压从-20 V到20 V测试传感器输出特性曲线。从图中可以看出,无论在空气中(图7(a))还是饱和乙醇蒸汽中(图7(b)),随着所施加栅极电压的增大,相同漏源电压*V_{ds}*下的漏电流*I_{ds}*也增大,说明栅压可以调控场效应管气敏传感器的气敏性能。*I_{ds}*-*V_{ds}*曲线在0 V附近出现平台可能是由于电极接触不好会形成肖特基势垒而非欧姆接触造成的。当栅极电压为5 V时,传感器在空气和乙醇中的输出特性曲线如图7(c)所示,我们可以看出当传感器置于含有乙醇气体的环境中时,*I_{ds}*电流比在空气中明显增大,这表明传感器对乙醇气体有较好的气敏响应。

为激发学生的科研兴趣,培养学生的科研思维和能力,可安排学生提前自主进行文献检索,对气敏传感器的研究背景和研究现状进行调研,根据个人兴趣确定实验方案,可以改变传感器电极的结构和微电子工艺制备流程。改变电极形状和类型或者改变敏感层材料来研究这些条件对器件气敏性能的影响,进而调控器件性能,可以提高学生的科研思维能力和实践能力。如一组学生采用如图8所示的叉指电极制备气敏传感器,叉指电极关于结构中心点呈中心对称,每个电极单侧都有20指,共计40指,相应每个器件都有20对叉指电极,叉指长度为1.5 mm,宽度均为30 μm,相邻叉指之间的间隙距离即沟道长度均为30 μm。两侧面积较大的矩形区域分别作为器件的源极和漏极,中间的叉指区域涂覆敏感材料,除电极形状不同外,其他器件制备流程保持不变,相同测试条件下所得到的器件气敏特性曲线如图9所示。从图中可以看出,随着栅极电压的增大,相同漏源电压下的漏电流*I_{ds}*也随之增大,说明栅压可以调控场效应管气敏传感器的气敏性能。使用叉指电极的场效应管型气敏传感器*I_{ds}*电流可以达到mA量级,比初始电极的传感器*I_{ds}*电流较大,表明阻抗更小。在漏源电压靠近0 V时,*I_{ds}*电流几乎为零,这可能也是由于电极接触不好形成肖特基势垒导致。固定栅极电压为5 V测量传感器在空气和乙醇中的输出特性曲线如图9(c)所示。从曲线可以看出当传感器置于乙醇气体中时,与在空气中相比,*I_{ds}*电流明显变大,这表明

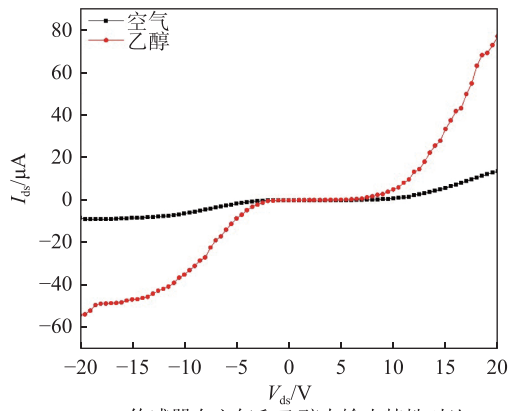
基于叉指电极的场效应管行气敏传感器对乙醇气体也有比较好的气敏响应。



(a) 传感器在空气中的输出特性



(b) 传感器在乙醇中的输出特性



(c) 传感器在空气和乙醇中输出特性对比

图 7 栅极电压调控下场效应管型气敏传感器在空气和乙醇中的输出特性曲线, 以及固定栅压为 $V_{gs}=5\text{ V}$ 时, 传感器分别在乙醇和空气中特性曲线

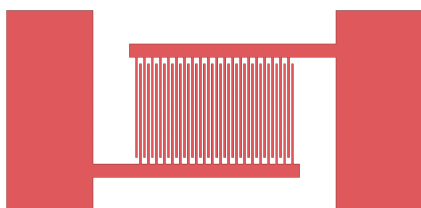
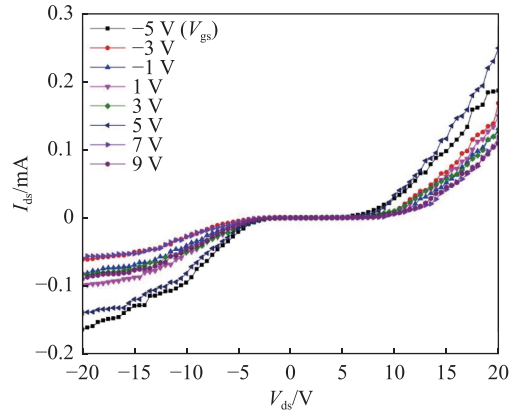
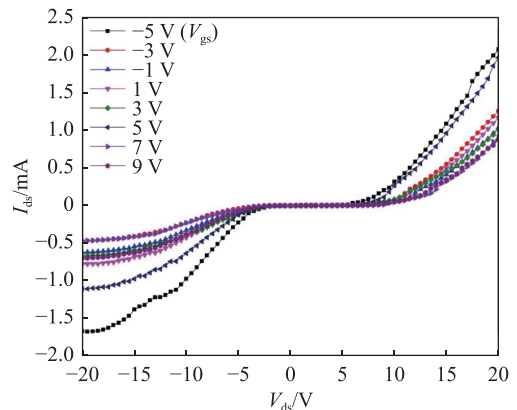


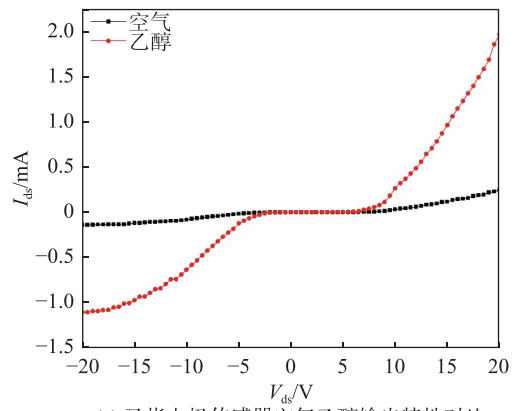
图 8 叉指电极结构示意图



(a) 叉指电极传感器空气输出特性



(b) 叉指电极传感器乙醇输出特性



(c) 叉指电极传感器空气乙醇输出特性对比

图 9 栅极电压调控下基于叉指电极的场效应管型气敏传感器在空气和乙醇中的输出特性曲线, 以及固定栅压为 $V_{gs}=5\text{ V}$ 时, 传感器分别在乙醇和空气中特性曲线

进一步对两种电极制备的场效应管型气敏传感器的响应时间进行测试, 测试保持 V_{ds} 漏源电压恒定为 20 V , V_{gs} 栅源电压为 10 V 时测量 I_{ds} 电流随时间的变化曲线如图 10 所示。从图中可以得到, 初始电极和叉指电极所制备的传感器在乙醇气体下响应时间和上升时间分别约为 10.8 s 和 15.0 s , 下降时间为 13.7 s 和 20.4 s , 说明当电极改变为叉指电极后制备的传感器其

响应时间也会改变。叉指电极响应时间的增加可能是由于叉指电极与电极之间间距较大导致

载流子的渡跃时间较大, 进而使器件的响应时间增加^[21]。

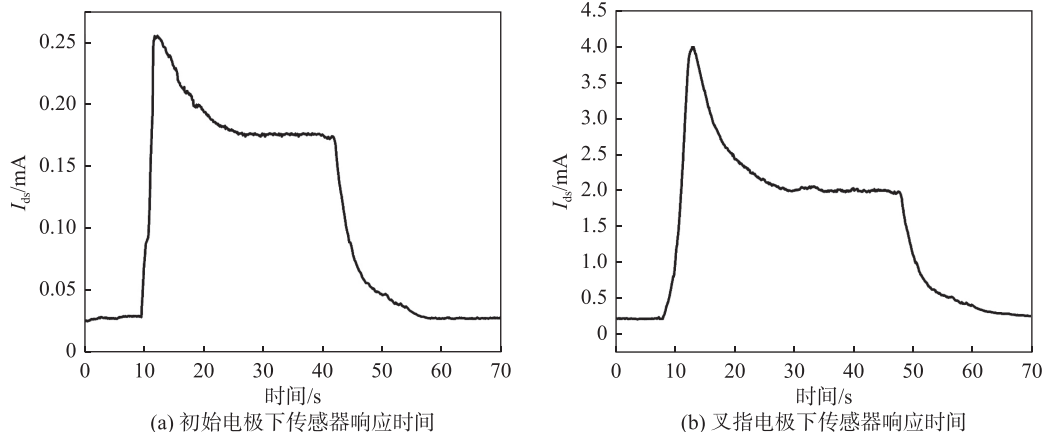


图 10 初始电极和叉指电极下场效应管型气敏传感器的响应时间测试

除改变电极设计外, 还可以让学生根据专业方向自主设计其他具有专业特色的类型器件, 如存储器、其他传感器等, 让学生自主设计器件结构和制备器件的微电子工艺流程, 完成版图设计, 并独立完成器件制备过程, 进而培养学生的独立科研能力和创新实践能力。

4 结束语

本文设计了基于场效应管型气敏传感器的微电子工艺实验, 采用微电子工艺手段包括光刻、刻蚀、镀膜等不同手段制备不同类型的硅基电极, 采取水相法制备半导体氧化物 SnO_2/ZnO 复合材料作为敏感材料, 进而组装得到场效应管型气敏传感器。X 射线衍射用来表征敏感层材料的物相和晶体结构, 并对传感器的气敏性能进行测试。该实验涵盖了半导体氧化物材料制备、微电子工艺制备器件方法及气敏特性测试等内容, 涉及材料学、微电子及集成电路多类学科, 实现了学科交叉的学生培养模式。实验结合科研内容, 极大地激发了学生的科研兴趣, 进而培养学生的科研思维和创新实践能力。

参考文献

- [1] 刘醒梅. 如何破解我国集成电路人才短缺问题[J]. 中国人才, 2023(9): 32-34.
- [2] 国家集成电路产业发展推进纲要[EB/OL]. [2014-6-26](2024-02-01). http://www.cac.gov.cn/2014-06/26/c_1111325916.htm.
- [3] 黄展云, 陈晖, 谢德英, 等. 微电子工艺教学实验室建设的探索与实践[J]. 实验室科学, 2021, 24(6): 126-129.
- [4] 王刚, 陈达. 新形势下微电子工艺实验教学改革研究[J]. 中国多媒体与网络教学学报(上旬刊), 2021(5): 82-84.
- [5] 蒋苓利, 刘欢, 于洪宇. 集成电路工艺课程实践教学设计[J]. 实验科学与技术, 2022, 20(2): 112-116.
- [6] 李劲, 吕辉, 耿亮, 等. 集成电路创新创业人才的培养模式实践[J]. 集成电路应用, 2021, 38(6): 74-75.
- [7] 沈忠悦, 商亮节, 潘小青, 等. 精心设计综合性实验, 培养学生的创新能力[J]. 实验室研究与探索, 2012(5): 92-94.
- [8] 教育部. 关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量的意见(教高〔2019〕6号)[EB/OL]. [2019-10-8](2024-02-01). http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201910/t20191011_402759.html.
- [9] 杨俊超, 潘勇, 秦墨林, 等. 金属氧化物半导体气敏传感器研究进展[J]. 化学传感器, 2022, 42(2): 10-18.
- [10] WANG B R, LI H B, TAN H T, et al. Gate-modulated high-response field-effect transistor-type gas sensor based on the MoS_2 /metal-organic framework heterostructure[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(37): 42356-42364.
- [11] 刘继芝, 廖昌俊, 任敏, 等. 小班教学在“微电子器件”课程中的探索与实践[J]. 实验科学与技术, 2019, 17(3): 87-90.
- [12] HONG S, WU M L, HONG Y, et al. FET-type gas sensors: A review[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2021, 330: 129240.
- [13] LI Y, SHAN L X, WANG R C, et al. Enhanced n-butanol sensing performance of SnO_2/ZnO nanoflowers fabricated via a facile solvothermal method[J]. Ceramics International, 2022, 48(15): 22426-22434.
- [14] LI R, JIANG K, CHEN S, et al. $\text{SnO}_2/\text{SnS}_2$ nanotubes

- for flexible room-temperature NH_3 gas sensors[J]. RSC Advances, 2017, 83(7): 52503–52509.
- [15] 毕道广, 罗兵, 张福增, 等. Pd 掺杂 SnO_2 厚膜 CO_2 气体传感器的制备及其气敏特性研究[J]. 电子元件与材料, 2021, 40(1): 11–18.
- [16] TAMAKI J, AKIYAMA M, XU C N, et al. Conductivity change of SnO_2 with CO_2 adsorption[J]. Chemistry Letters, 1990, 19(7): 1243–1246.
- [17] 余龙, 刘天模, 王中长. 纳米 CuO-SnO_2 气敏材料制备及对 CO_2 的气敏性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2005, 13(5): 521–523.
- [18] XU X H, MA S Y, XU X L, et al. Ultra-sensitive glycol sensing performance with rapid-recovery based on heterostructured ZnO-SnO_2 hollow nanotube[J]. Materials Letters, 2020, 273: 127967.
- [19] MASUDA Y. Recent advances in SnO_2 nanostructure based gas sensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2022, 364: 131876.
- [20] DING P, XU D S, DONG N, et al. A high-sensitivity H_2S gas sensor based on optimized ZnO-ZnS nano-heterojunction sensing material[J]. Chinese Chemical Letters, 2020, 31(8): 2050–2054.
- [21] 王姗. 基于叉指电极的气体传感器的特性及加工研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.

编辑 钟晓

(上接第 26 页)

内, 平台夹持超声刀 3 轴运动的刀头偏移在 3 mm 以内, 平台推杆推力控制误差范围在 0.5 N 以内, 平台单次试验切割次数可达 10 万次以上, 可以满足一般超声刀耐久性能试验的要求。此外使用该平台进行了超声刀的耐久性能测试, 成功完成了 HARMONIC HD 1000i 超声手术刀的 10 万次切割试验, 测试中成功验证了该型号超声手术刀的性能衰减, 对超声刀的耐久性能评价具有重要意义。

参考文献

- [1] 邬苗, 冯庆敏, 刘胜林, 等. 微创外科多自由度柔性超声手术刀研究进展[J]. 中国医疗设备, 2024, 39(1): 156–160.
- [2] 贺洋洋. 超声手术刀在临床上的应用[J]. 医疗装备, 2019, 32(6): 192–193.
- [3] FENU N G, LI X, LUCAS M, et al. Evaluation of PIC 181 and Mn: PIN-PMN-PT thickness extensional rings for use in power ultrasonic devices for minimally invasive surgery[C]//2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). Las Vegas: IEEE, 2020: 1–4.
- [4] SADIQ M R, KUANG Y, COCHRAN S, et al. High-performance planar ultrasonic tool based on d31-mode piezocrystal[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2015, 62(3): 428–438.
- [5] 张东博. 超声手术刀疲劳试验系统研制及实验[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [6] 国家食品药品监督管理局. 超声外科手术系统基本输出特性的测量和公布: YY/T 0644—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [7] 成都水木医疗科技有限公司, 电子科技大学. 一种超声刀疲劳测试的多功能自动化工装: CN202211735053.9[P]. 2023-04-04.
- [8] 刘惟信. 机械可靠性设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [9] PATRICK D T, ANDRE K. Practical reliability engineering[M]. United Kingdom: A John Wiley & Sons, Ltd, Publication, 2012.
- [10] 王颖, 郭丽伟, 于正同, 等. 基于 CAN 总线的深入研究及实现[J]. 现代车用动力, 2023(1): 31–34.
- [11] 黎炜天. 基于滑模控制的龙门式高精运动平台的同步控制系统设计[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- [12] 陈祖霖, 黄峰, 吴靖, 等. 步进电机 S 曲线调速控制研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 640–645.
- [13] 李净, 张旭, 李源, 等. 超声手术刀振动频率优化选择方法研究[J]. 中国医疗设备, 2018, 33(5): 53–56.
- [14] 吴立敏, 文怀兴, 隆志力. 纵振超声刀柄优化设计研究[J]. 压电与声光, 2019, 41(1): 85–88.
- [15] 国家药品监督管理局. 超声软组织切割止血手术设备: YY/T 1750—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

编辑 葛晋