

铟镓锌氧薄膜晶体管的电学特性研究

孔祥岩 叶任圆 梁媛媛 吴鸿皓 袁少瑞 郑定山
长江大学 湖北荆州 434023

摘要: 本研究系统探讨了铟镓锌氧薄膜晶体管的电学特性, 聚焦材料组分优化、制备工艺参数调控及结构设计对性能的影响, 通过分析静态特性、动态特性、界面效应及环境稳定性等, 提出了涵盖添加剂钝化、界面工程与低温工艺等要素的优化策略, 研究成果为高稳定性铟镓锌氧薄膜晶体管的开发提供了理论参考与实验依据。

关键词: 铟镓锌氧薄膜晶体管 ((IGZO-TFT)); 制备方法; 电学特性; 工艺改进

引言

随着显示技术的快速迭代与柔性电子器件的兴起, 铟镓锌氧薄膜晶体管以其高迁移率、优异的光学透明性及良好的电学稳定性, 逐渐成为了新一代平板显示技术的核心器件, 但是考虑到其规模化应用仍面临制备工艺复杂^[1]、界面缺陷控制难、材料添加剂选择负责等限制性因素, 其高迁移率与低功耗的平衡应用仍存在现实难度。

一、铟镓锌氧薄膜晶体管的研究基础

(一) 铟镓锌氧 (IGZO) 材料介绍

IGZO作为一种非晶氧化物半导体材料, In、Ga、Zn的多组分特性赋予了其独特的电学性能^[2], 其中铟In的高迁移率特性与镓Ga的氧空位抑制作用、锌Zn的晶格稳定性调控等, 共同决定了薄膜的载流子传输效率与阈值电压稳定性, 而研究表明In、Ga和Zn的原子比例直接影响材料的能带结构及缺陷态密度, 需通过严格的元素配比优化实现高性能薄膜的制备。此外, Al、Sc等添加剂的也可引入可进一步钝化界面缺陷, 进一步提升器件的偏压稳定性。

(二) 铟镓锌氧薄膜晶体管 (IGZO-TFT) 的制备工艺介绍

1、制备方法概述

IGZO-TFT的制备工艺主要包括磁控溅射等物理气相沉积与溶液法两类^[3], 其中磁控溅射凭借高致密性薄膜与工业化兼容性占据主流地位, 而溶液法则因低成本、

大面积成膜潜力成为新兴研究方向。

2、关键工艺参数对薄膜质量的影响

氧分压控制工艺主要关注了溅射过程中氧分压的调节, 这一工艺也是平衡薄膜氧空位浓度与载流子迁移率的核心参数, 在实际应用中高氧分压虽可抑制氧空位, 但可能导致载流子浓度不足, 因此需通过梯度氧分压设计优化薄膜均匀性。

其次, 退火工艺的原理是紫外光辅助退火以有效激活薄膜中的金属-氧键合态, 其能够降低界面缺陷密度并钝化深层陷阱态, 最终改善器件的阈值电压漂移问题。

最后, 添加剂检测需在靶材制备过程中严格控制粘剂残留, 避免杂质引入导致的迁移率下降, 而溶液法的应用需关注前驱体溶液的金属离子浓度与配位稳定性, 以此确保成膜过程的化学计量比精确。

3、不同制备技术的比较分析

比较前述多类制备技术可见, 磁控溅射技术适用于高精度、高均匀性薄膜的批量生产, 但对靶材纯度及氧分压均匀性要求严苛; 溶液法虽成本低廉, 但还需配套使用多层涂覆与低温退火工艺, 以此解决薄膜致密性不足的问题^[4]。

(三) IGZO 薄膜晶体管的结构特性

1、薄膜晶体管的结构设计

从晶体管的结构设计来看, 主流结构包括顶栅与底栅两种形式, 其中顶栅结构通过优化Al₂O₃钝化层等栅绝缘层界面特性以抑制氧逃逸, 而底栅结构则更易实现低接触电阻与高迁移率的平衡; 而垂直沟道设计则可通过缩短沟道长度提升集成度, 刻蚀工艺的侧壁形貌控制也会直接影响器件的漏电流特性。

2、材料组成对晶体管性能的影响

除主成分In、Ga和Zn外, Sc₂O₃、TiO₂等掺杂元素作为钝化层可显著降低背沟道缺陷态密度并抑制外界水氧

基金项目: 湖北省级大学生创新训练计划项目《氮和氧元素掺杂对铟镓锌锡氧薄膜晶体管电学及光电性能的影响》(Yz2023293)

作者简介: 孔祥岩 (2004.09—), 男, 汉族, 河北沧州人, 本科, 研究方向: 微纳电子器件。

侵蚀,提升器件的长期稳定性,而 Al_2O_3 的高介电常数等绝缘层材料的介电常数也会直接影响器件的驱动电压与功耗。

3、表面形貌与界面特性分析

薄膜的粗糙度与晶界分布是影响载流子散射的关键因素,通过原子力显微镜AFM与透射电镜TEM表征发现纳米级晶粒的均匀分布可减少界面态密度,而梯度氧含量设计可优化沟道层与绝缘层的能带匹配,以此降低界面势垒。

二、铟镓锌氧薄膜晶体管的电学特性

(一) 基本电学特性

1、静态特性

(1) 转移特性曲线

在铟镓锌氧薄膜晶体管的静态特性分析中,阈值电压的确定需依据国际标准如IEC 62333-3对半导体器件参数的测试规范,检测过程中需通过使用Keithley 4200半导体参数分析仪并校准其电流分辨率至1 pA以下等方式,验证测试设备的精度并准确捕捉亚阈值区的微弱电流变化。在具体分析中,应通过线性外推法或恒定电流法提取 V_{th} 时需确保测试环境的温湿度符合GB/T 2423.1-2008《电工电子产品环境试验》的要求,排除外界因素对界面态电荷分布的干扰;也需关注亚阈值摆幅的计算,结合器件栅介质材料的介电常数,同步参照JIS C 7030《薄膜晶体管测试方法》中关于界面态密度的评估模型等,控制栅极偏压对漏电流的调制作用。

(2) 输出特性曲线

输出特性曲线也是铟镓锌氧薄膜晶体管静态电学特性的分析范式之一,其测试需遵循ASTM F1249《薄膜晶体管电学性能测试标准》,通过固定栅极电压并扫描漏极电压并获取线性区与饱和区的电流-电压关系,常见的饱和迁移率 μ_{sat} 的计算可以采用以下经典公式:

$$\mu_{sat} = \frac{2L}{W \cdot C_{ox}} \cdot \left(\frac{\partial \sqrt{I_D}}{\partial V_G} \right)^2$$

其中: L 为沟道长度, W 为沟道宽度, C_{ox} 为栅介质电容。

为确保数据可靠性,输出特性曲线的分析需多次重复实验并统计误差范围,参考ISO 17025《检测和校准实验室能力通用要求》对设备校准和操作流程进行规范化管理。此外,还需关注接触电阻对输出特性的影响,必要时采用传输线法修正迁移率计算结果

(3) 开关比统计分析

为分析铟镓锌氧薄膜晶体管的开关比,电学特性分析应结合显示驱动电路对高开关比($>10^6$)等器件的实

际应用场景,在测试时采用脉冲信号源模拟动态工作条件并依据JEDEC JESD22-A108《半导体器件可靠性测试标准》等,完成长时间稳定性验证。此后在具体的数据分析中,还建议引入韦伯分布模型以统计开关比的批次一致性,同时参考GB/T 18910.61《液晶显示器件》中 $I_{off} < 1 \text{ pA}/\mu\text{m}$ 等对漏电流的限值要求,对于异常低开关比样品做好能谱分析以排查材料成分偏差、界面污染等问题。

2、动态特性

在静态特性分析的基础上,动态特性研究需进一步揭示器件在交变信号下的响应机制,因此本节从频率响应、偏压应力稳定性等维度结合国际标准与检测方法,系统阐述了IGZO-TFT的动态行为及其与材料添加剂的关联性。

(1) 频率响应特性

频率响应是铟镓锌氧薄膜晶体管的动态电学特性主之一,其测试需依据IEC 61967-4《集成电路电磁发射测量》标准并采用Keysight E5061B等网络分析仪测量器件的截止频率、增益带宽积等指标。在测试中,还需注意寄生电容的补偿,并参照ISO 11452-11《汽车电子部件电磁兼容性测试规范》优化测试夹具设计;对于射频标签等高频应用场景,还需额外验证器件在GHz频段的相位噪声特性,对比JIS C 61000-4-6《抗扰度试验》中的做好限值分析。

(2) 偏压应力稳定性

从正/负偏压应力测试来看,还需参照JEDEC JESD22-A108标准等模拟器件在长期工作中的退化现象,通过施加 $\pm 20 \text{ V}$ 等恒定栅极偏压的方式通过持续1,000秒的策略监测阈值电压漂移和亚阈值摆幅变化;检测过程需严格控制环境温湿度,参照GB/T 2423.2《高温试验方法》等验证温度对退化速率的加速效应。数据分析可采用以下拉伸指数模型拟合退化曲线:

$$\Delta V_{th}(t) = \Delta V_0 \left(1 - e^{-t/\tau} \right)$$

其中: τ 为时间常数,反映界面陷阱的俘获/释放速率。

3、界面效应研究

界面效应与环境稳定性是影响IGZO-TFT可靠性的核心因素,本部分结合材料添加剂的作用机制,进一步从界面态密度、接触电阻、温湿度循环等角度研究了系统性检测机制与效应。

(1) 栅介质/IGZO界面态密度计算

界面态密度的评估一般采用电导法或深能级瞬态谱方法,多依据ASTM F1391《半导体界面态测试标准》测

量不同频率下的导纳-电压曲线,最终提取 D_{it} 分布。在具体应用中,对于 HfO_2 等高 k 栅介质需额外考虑固定电荷对 D_{it} 计算的影响,参照SEMI MF1528《高 k 材料表征指南》等修正模型参数;而检测中则需验证样品的批次一致性,通过X射线光电子能谱等分析界面化学键合状态。

(2) 接触电阻对器件性能的影响

为考察接触电阻对铟镓锌氧薄膜晶体管器件性能的影响,本类型测试需依据JIS C 7030标准等做好传输线分析,完成不同沟道长度的测试结构的制备,并通过线性回归提取单位接触电阻 R_c ;此外,还应对比ISO 16750-4《汽车电子部件环境条件》中关于金属-半导体接触可靠性的要求,对于异常高接触电阻的样品需通过聚焦离子束剖面分析电极或IGZO界面的微观形貌,以此排查合金化不足或氧化层残留问题。

4、环境稳定性

(1) 湿度/温度循环测试

铟镓锌氧薄膜晶体管的温度和适度稳定性测试需要将器件置于 -40°C 至 85°C 、湿度85% RH的环境中循环1,000次,监测电学参数的漂移;测试后需通过红外光谱分析IGZO薄膜的羟基吸附量并评估封装材料的阻隔性能。对于湿度敏感器件则建议采用ALD沉积 Al_2O_3 钝化层,以此提升稳定性。

(2) 光照敏感度实验

光照测试需依据ISO 4892-2《氙灯老化试验》,使用AM1.5G标准光源模拟太阳光谱,在排除紫外光对有机封装材料降解影响、优化光照强度与持续时间的基础上,通过测量光照前后阈值电压的偏移量评估光生载流子对界面态的填充效应。

(二) 电学性能的可优化特性

作为铟镓锌氧薄膜晶体管性能调控的核心环节,优化工程在改善载流子输运、抑制缺陷态密度等方面展现出独特优势,本部分从材料组分、界面工程与工艺改进三个维度展开了具体论述。

1、材料组分优化

在铟镓锌三元氧化物体系中, In 、 Ga 、 Zn 的原子配比调控直接影响氧空位浓度和载流子迁移率,一般可根据GB/T20234-2018《氧化物半导体薄膜成分分析方法》以完成X射线光电子能谱与卢瑟福背散射谱的联用分析,以此精确测定各元素占比偏差值。

实验结果显示,当 In 比例提升至60%时关键元素的迁移率可提高2-3个数量级,但需同步控制 Ga 含量以维持阈值电压稳定性;在稀土元素掺杂改性方面, Y 掺杂IGZO薄膜需依据JISH0601标准并通过二

次离子质谱SIMS监测掺杂浓度梯度,其检测限应达到 1×10^{17} atoms/ cm^3 量级。

2、界面工程

AlO_x/SiN_x 复合栅介质设计中,界面态密度检测需遵循IEC62374标准,通过高频C-V特性曲线提取的平带电压偏移量应小于50mV。一方面,可通过原子层沉积ALD工艺制备的 AlO_x 薄膜,其氧空位浓度需通过X射线反射技术控制膜层密度偏差在 $\pm 2\%$ 以内;另一方面,在自组装单分子层(SAM)修饰技术中可采用十八烷基三氯硅烷(OTS)等表面处理剂的覆盖率检测技术,通过接触角测试与原子力显微镜相结合的策略,确保单分子层缺陷密度低于5%。一般情况下,经SAM修饰的IGZO/介质层界面态密度可降低至 1×10^{11} $\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ 。

3、工艺改进

低温退火工艺改进需重点关注晶化度与氢钝化效果的平衡关系,一般可采用紫外拉曼光谱监测退火后IGZO薄膜的非晶态结构特征,确保成品的特征峰半高宽控制在 $15-18\text{cm}^{-1}$ 区间;此外,还需完成光刻胶残留物的检测,通过飞行时间二次离子质谱等分析表面有机污染物总量,以此确保碳氢化合物峰强度需低于基准值的5%等;而在反应离子刻蚀工艺中,还需关注 γ/CHF_3 混合气体比例,通过光学发射光谱实时监控以确保刻蚀速率偏差不得超过 $\pm 3\text{nm}/\text{min}$,同时确保侧壁粗糙度维持于 1.2nmRMS 以下。

总结

本文从材料设计、制备工艺及结构特性三方面对铟镓锌氧薄膜晶体管的电学特性进行分析,系统分析了器件静态特性、动态性能与环境稳定性等基本电学特性,探讨了材料优化、界面提升和工艺改进的三类电学性能优化方向,为氧化物半导体器件的性能提升提供了系统参考。

参考文献

- [1] 申正坤. 铟镓锌氧薄膜晶体管的制备与性能调控[D]. 燕山大学, 2020. DOI: 10.27440/d.cnki.gysdu.2020.001660.
- [2] 刘杰. 铟镓锌氧薄膜晶体管器件电学性能-光电应力稳定性协同提升研究[D]. 郑州大学, 2020. DOI: 10.27466/d.cnki.gzzdu.2020.004418.
- [3] 谷有豪. 基于铟镓锌氧垂直沟道结构薄膜晶体管的制备及性能研究[D]. 山东大学, 2022. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.2022.002434.
- [4] 史恺, 杨小天. 溶液法制备铟镓锌氧薄膜晶体管及其性能研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2019, 36(04): 78-82.