



基于传输线模型法 ITO/p-Si 接触性能 研究实验设计

李金泽, 许 杰

(南京邮电大学 集成电路科学与工程学院, 南京 210023)

摘要: 针对传统透明氧化物薄膜电学性能测试实验内容单一的问题, 结合教师教学与科研项目, 设计了“基于传输线模型法 ITO/p-Si 接触性能研究”的探究性实验和相应考核体系。实验通过测量不同条件下制备的 ITO/p-Si 接触的电学性能, 分析 ITO/p-Si 的比接触电阻和势垒高度变化规律和原因。考核体系涵盖了包括文献查阅、产品制备、性能测试、数据分析和扩展实验等环节。实验综合性较强, 有递进性, 能够巩固专业理论知识, 激发学生的学习兴趣, 增强学生的创新能力。

关键词: 接触性能; 传输线模型; 实验设计; 透明导电氧化物

中图分类号: O472.4

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230103

Experimental Design for ITO/p-Si Contact Properties Based on Transmission Line Model

LI Jinze, XU Jie

(College of Integrated Circuit Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: In response to the problem of single content in traditional transparent oxide thin film electrical performance testing experiments, combined with teachers' lectures and research project, an exploratory experiment “ITO/p-Si contact properties based on transmission line model” and the corresponding assessment system were designed. The variety law and reason of contact resistivity and barrier height of ITO/p-Si contacts under different preparation conditions were analyzed by testing their electrical properties. The experiment assessment system covers literature review, sample preparation, performance measurement, data analysis and extension experiment. The experiment is comprehensive and progressive, which can consolidate professional theoretical knowledge, stimulate students' interest in learning, and increase students' innovative ability.

Key words: contact property; transmission line model; experimental design; transparent conductive oxide

透明导电氧化物薄膜因其高透过、高迁移率和低电阻率等特性, 被广泛应用于作为平板显示、太阳能电池和透明电子器件的电极^[1-3], 其电学性能的测量分析被越来越多的高校纳入理工科实验教学中。传统的透明导电氧化物薄膜电学性能测试实验教学, 普遍利用四探针仪对其方阻进行测量, 并要求学生分析方阻修正原理或制备条件对于薄膜阻值的影响规律^[4]。实验过程中涉及的物理原理不多, 内容单一, 缺少探索性和实用性, 实验教学容易沦为照搬的机械学习, 也不满足如今新工科专业的培养目标。

在实际应用中, 透明导电氧化物薄膜能与下

层材料之间形成良好的接触, 这是好的电极材料应该具备的特征。笔者在教学过程中, 虽也有少部分勇于探索的学生想对透明导电氧化物薄膜的接触性能进行深入地学习与分析, 但一方面缺少对原理的深入理解, 另一方面缺少能立即进行定量测试的样品, 学习效果不佳。

1 实验设计依据

1.1 接触和势垒高度的概念

透明导电氧化物薄膜沉积在一定的半导体材料上, 就会与该材料形成接触。根据肖特基-莫特模型, 接触一般可分为两种, 即欧姆接触和肖特

收稿日期: 2023-03-01; 修回日期: 2023-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(61904088)。

作者简介: 李金泽(1989-), 男, 博士, 讲师, 主要从事微电子材料与器件相关研究。E-mail: lijinze@njupt.edu.cn

基接触。其区别主要在于接触后透明导电氧化物薄膜与半导体材料之间形成的势垒高度的大小, 若没有势垒或势垒高度小, 则形成欧姆接触; 若势垒高度很大, 则形成肖特基接触^[5]。形成欧姆接触时, 更多的载流子可以通过透明导电氧化物薄膜和半导体的界面处, 形成电流, 对于器件性能是有利的。因此作为电极材料, 我们希望透明导电氧化物薄膜能与下层材料之间形成欧姆接触, 其宏观表现为电极和半导体的接触具有线性的电流-电压(I - V)特性。

不考虑半导体表面态时, 势垒高度的大小和电极与半导体的功函数有关。对于 p 型半导体的接触, 当电极的功函数大于半导体的功函数时, 接触后在半导体界面处形成向上弯曲的能带, 此区域高导电, 可认为没有势垒, 直接形成欧姆接触; 当电极的功函数小于半导体的功函数时, 接触后在半导体界面处形成向下弯曲的能带, 此时存在势垒, 电极材料的功函数越大, 势垒高度越小, 越有利于形成欧姆接触。其具体的大小, 可通过将 I - V 曲线中的电流 I 转换成电流密度 J 并进行对数化处理, 势垒高度可计算为^[6]:

$$\varphi_B = \frac{KT}{q} \ln \frac{A^* T^2}{J_s} \quad (1)$$

式中: φ_B 为势垒高度, 单位 eV; K 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度, 单位 K; q 为电子电量, 单位 c; J_s 为 $\ln(J)$ 的线性部分与 $V=0$ 的交点, A^* 为理查逊常数。

1.2 比接触电阻的测量

接触性能的定量分析需要通过测量比接触电阻来判断, 它的大小对于器件性能有着显著的影响^[7-9], 且能反映出界面处的物理特性^[10-12]。欧姆接触性能越好则其对应的比接触电阻值就越小。

常用的测量比接触电阻的方法包括线性传输线模型法、圆点传输线模型法、圆环传输线模型法和四探针法等^[13]。由于线性传输线模型法计算原理较为简单、样品制备便捷^[14], 本探究性实验便利用线性传输线模型法对比接触电阻进行测量。它的原理是将电极做成一定的形状, 通过测量相邻电极间的 I - V 曲线, 经数学变换, 可得出比接触电阻的数值。线性传输线模型法测量时要求的电极图形如图 1 所示, 灰色部分为电极, 白色部分为半导体衬底。两两电极之间以不断增大的间距从左到右排列, 两个相邻电极之间的总电阻

由电极电阻、衬底电阻和接触电阻 3 部分组成。其中, 电极电阻很小, 可以忽略, 因此两个电极之间的总电阻有如下关系^[15]:

$$R_{\text{total}} = R_s \frac{L}{W} + 2R_c \quad (2)$$

式中: R_{total} 为总电阻, R_c 为接触电阻, 单位均为 Ω ; R_s 为衬底的薄层电阻, 单位 Ω/sq ; L 和 W 分别为电极间距和电极宽度, 单位均为 μm 。采用数字源表分别测量相邻电极间的 I - V 曲线, 其斜率即为两电极间的总电阻。随后将不同电极间距和总电阻拟合成如图 2 所示的一条直线, 直线斜率即为衬底薄层电阻 R_s , 而直线与 X 轴和 Y 轴的截距分别为 $-2L_T$ 和 $2R_c$ 。则有比接触电阻:

$$\rho_c = R_c \cdot L_T \cdot W \quad (3)$$

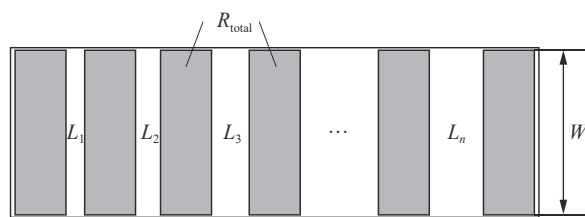


图 1 线性传输线模型法的测试图形

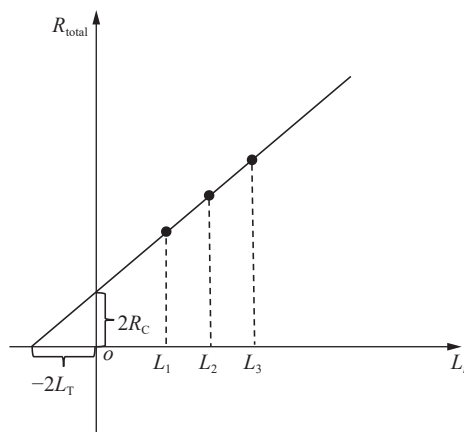


图 2 线性传输线模型法测试比接触电阻的拟合曲线

2 实验设计

通过项目探究式实验教学过程, 布置学生课前自学比接触电阻的测量原理, 总结其影响因素, 再按现有实验设备和指导书中的实验步骤开展实验。

2.1 实验材料的选择

结合实验室的现有条件和制备的便利程度, 我们选择了氧化铟锡 (ITO) 薄膜这一代表性的透明导电氧化物薄膜作为实验主体材料。ITO 薄膜

在研究与实际生产中通常采用磁控溅射法制备。此过程中, 电场强度、衬底温度和溅射后退火处理均会对 ITO 薄膜的功函数产生影响, 方便我们制备具有不同势垒高度及比接触电阻大小的样品。

考虑到实际应用中的广泛性, 接触的半导体材料选择了 p-Si(电阻率 $2 \Omega \cdot \text{cm}$), 而且 ITO 与 p-Si 的接触性能研究目前也没有很完善。

2.2 实验内容

具体实验过程如下。

1) ITO 薄膜的制备

在 p-Si 衬底上沉积 ITO 电极之前先采用标准硅片清洗方法对其进行洗净。随后在 p-Si 衬底表面先刻蚀出一个 $220 \mu\text{m} \times 2000 \mu\text{m}$ 的平台以减少边缘漏电流, 再在平台上旋涂一层光刻胶, 在光刻胶内刻蚀出如图 1 所示的图形, 电极大小为 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$, 电极之间间距分别为 10、20、30、50、80 μm 。采用磁控溅射法向光刻胶图形内填入 200 nm 厚的 ITO 薄膜, 制备时施加在 ITO 靶材上的电场强度和类型固定为射频 30 W, Ar 流量为 30.0 sccm, O_2 流量为 0.2 sccm。最后去除光刻胶即完成样品制备。

为制备不同接触性能的样品, 我们设计了两组对比实验。一组为不同衬底温度对比接触电阻的影响实验, ITO 沉积时调节衬底温度分别为室温、100 $^{\circ}\text{C}$ 、200 $^{\circ}\text{C}$ 。另一组为不同退火温度对比接触电阻的影响实验, ITO 沉积时衬底温度固定为室温, 沉积后将样品转移至真空退火炉中分别进行 20 min 不同温度 200、300、400 $^{\circ}\text{C}$ 的真空退火。

2) 接触性能的测量

采用数字源表分别对两相邻 ITO 电极之间的 $I-V$ 曲线进行测试, 电压范围为 $-4 \sim 4 \text{ V}$ 。按实验设计依据内的式(2)和式(3)绘图并计算比接触电阻和势垒高度。

3 结果与讨论

3.1 衬底温度对比接触电阻的影响

不同衬底温度下制备的 ITO 薄膜中, 只有室温衬底温度条件制备的 ITO 薄膜能与 p-Si 形成欧姆接触, $I-V$ 曲线呈线性, 如图 3 所示。其余加热条件下制备的 ITO 薄膜与 p-Si 接触性能较差, $I-V$ 曲线测试时抖动或呈非对称线型。这可能是由于 p-Si 衬底受热时原子运动较为剧烈, 易与到达衬

底的溅射原子发生碰撞, 形成较大的衬底损伤, 因此接触性能较差。

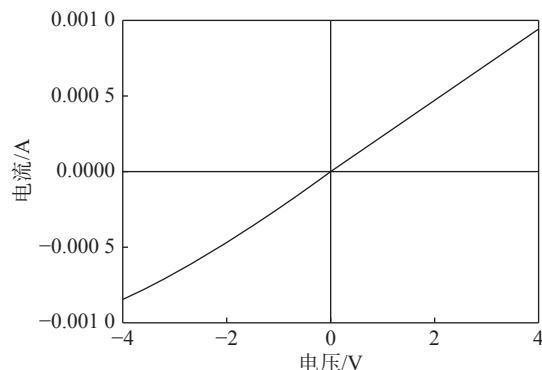


图 3 室温衬底条件下制备的 ITO 与 p-Si 接触的 $I-V$ 曲线

3.2 退火温度对比接触电阻的影响

经测试, 4 个样品中的 ITO 薄膜均可与 p-Si 形成欧姆接触。不同退火温度处理后的 ITO/p-Si 的比接触电阻拟合曲线如图 4 所示, 由此计算得出的比接触电阻的大小如图 5 所示。未退火的 ITO 与 p-Si 之间形成的比接触电阻较大, 为 $5.53 \times 10^{-2} (\Omega \cdot \text{cm}^2)$, 总电阻也是 4 个样品中最大的。退火可显著改善 ITO/p-Si 的接触性能, 随着退火温度的上升, 此接触电阻不断下降。400 $^{\circ}\text{C}$ 退火后 ITO/p-Si 的比接触电阻仅为 $2.76 \times 10^{-3} (\Omega \cdot \text{cm}^2)$, 有数量级上的改观。

3.3 比接触电阻阻值变化分析

一般来说, ITO 的功函数是小于 p-Si 的功函数的, 与 p-Si 接触后能带向下弯曲, 形成势垒。而随着退火温度的上升, ITO 的功函数不断增大^[16-17], ITO/p-Si 间的势垒高度不断降低, 接触性能越来越好, 比接触电阻随之下降。根据式(1)计算得出不同退火温度处理后的 ITO/p-Si 接触的势垒高度, 如图 6 所示。400 $^{\circ}\text{C}$ 退火后的 ITO 与 p-Si 形成的势垒仅为 0.453 eV, 小于室温下的 0.513 eV, 符合实验原理。

3.4 误差分析

测量 $I-V$ 曲线接线时需要将探针扎到 ITO 电极上, 由此可能引起电极的损伤, 或者探针不小心划到底下的 p-Si, 形成划痕, 均会对测出的阻值产生影响。如若发生阻值偏离规律的情况, 可优先排除此项干扰因素。同时, 若确认是因此造成的数据点偏离, 也可以当作问题向学生提出, 让他们分析其中的原因。

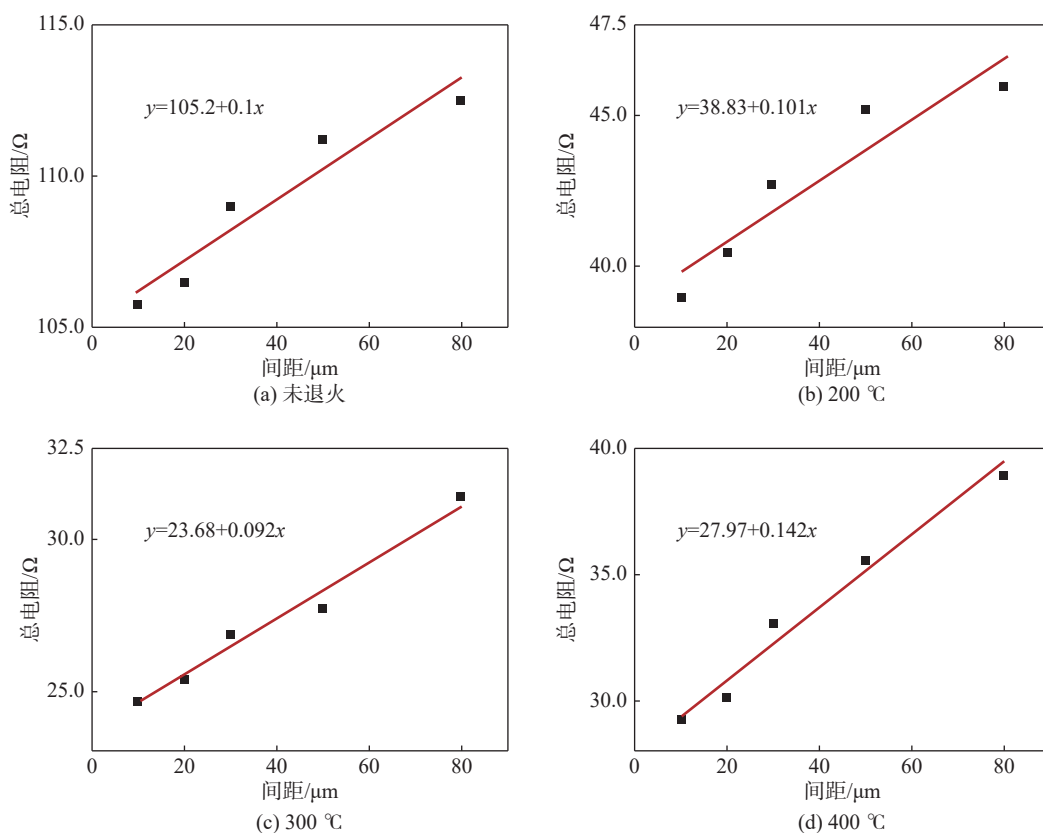


图 4 不同温度退火后 ITO/p-Si 接触的比接触电阻拟合曲线

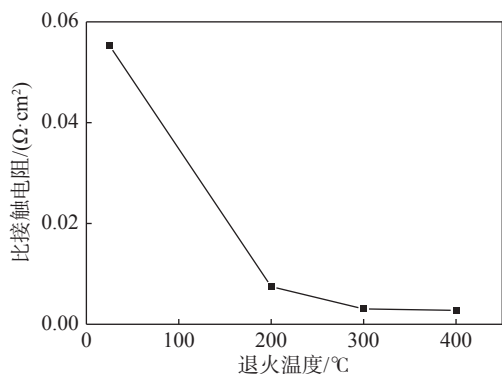


图 5 不同温度退火后 ITO/p-Si 接触的比接触电阻

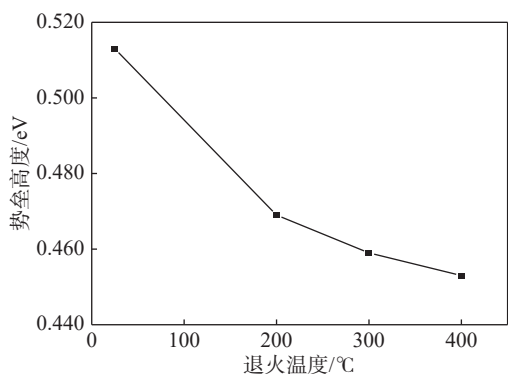


图 6 不同温度退火后 ITO/p-Si 接触的势垒高度

4 实验教学情况

本接触性能研究实验主要包括文献查阅、ITO/p-Si 样品制备、电学性能表征、比接触电阻计算与分析 and 能力拓展等内容。在实际教学过程中, 笔者积累了一点经验, 供读者分享。

1) 考虑到实验仪器台数与实验时间的问题, ITO 薄膜的制备部分可做演示性实验, 主要考查学生实验观摩的情况。

2) 由于每块样品测试时间较长, 为保证学生都能有动手操作和独立分析的机会, 可将学生分成若干小组, 每个小组 2~4 人, 每组一块样品, 组与组之间的样品制备条件不同。各组完成后数据共享, 由此分析接触变化趋势。

3) 针对科研有兴趣或已有一定科研能力的学生, 教师可以指导他们查阅相关文献, 探究不同退火温度下 ITO/p-Si 界面处载流子的隧穿概率, 进一步完善比接触电阻减小的原因分析。此外, 若前期有 ITO 薄膜的光电学性能测试实验, 可指导学生分析制备条件对薄膜光学带隙和透过率的影响规律。此部分可作为拓展实验, 完成这部分内容的学生, 可给予一定的实验加分。

结合目前过程性评价的教学趋势和新工科专业的教学要求,本实验的考核体系如表 1 所示,包含实验预习、实验过程、实验报告和拓展实验 4 个部分,并对每个考核模块进行了细分。此考核体系更注重学生的过程性考核(实验过程 40%)与分析解决问题的能力(实验报告 40%),具有一定

的区分度,且与本学院现行实验考核体系相容。

本实验具有一定的综合性与递进性,能锻炼学生的动手操作能力,以此增加学生的学习兴趣,激发学习热情。本实验同时考查学生综合运用理论知识解决复杂问题的能力,教学情况良好,受到学生好评。

表 1 实验考核体系

考核模块	考核内容	考核目标	评分依据	权重
实验预习	预习报告	实验预习情况	预习报告完成情况、查阅相关文献情况	0.1
实验过程	实验室安全、纪律	实验观摩情况	是否遵守实验室规章制度	0.1
	实验操作	探针台、数字源表的操作	实验操作是否规范	0.2
实验报告	原始数据记录	完整、专业、清晰的原始数据	数据记录是否详实、准确	0.1
		报告撰写情况		
	书写规范性	利用Origin软件对数据进行处理,数值计算	是否符合报告格式要求	0.1
	数据处理	比接触电阻拟合曲线、势垒高度结果	数据处理是否正确,计算是否正确	0.1
拓展实验	图谱绘制	比接触电阻变化因素的总结	图表是否规范、正确	0.1
	实验结论		结论是否言之成理,是否回答问题	0.1
拓展实验	查阅文献能力	查阅较新中英文文献解决问题	查阅所得原理是否适用	0.05
	数据分析能力	隧穿概率的计算	是否形成合理结论	0.05

5 结束语

本实验利用传输线模型法对于不同制备条件下 ITO/p-Si 的接触性能进行深入研究,设计了一套完整的实验和考核体系。实验内容具有层次性,学生通过进行磁控溅射制样观摩、接线、 $I-V$ 曲线测量,提高了对于透明导电氧化物薄膜及其接触性能的认识,能综合运用大学物理、半导体物理等专业课程知识对数据进行处理与分析,锻炼了学生创新与解决复杂工程问题的能力。

参考文献

- [1] SUGIURA T, NAKANO N. Transparent conductive oxide materials for bifacial heterojunction back contact solar cells[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(7): 3748–3752.
- [2] 张磊,刘文龙,段宇星. ITO薄膜的制备、光刻及性能测试实验设计[J]. *实验科学与技术*, 2013, 11(6): 237–239.
- [3] 薛凯豪,刘欢,潘永强,等. 银纳米线宽光谱透明导电薄膜研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(13): 224–230.
- [4] 郭子兰,STRYDON A M. 四探针原理新设计的低温电阻率测量装置[J]. *实验室研究与探索*, 2010, 29(11): 34–37.
- [5] 刘恩科,朱秉升,罗晋生. 半导体物理学[M]. 北京:电子工业出版社, 2011.
- [6] KING P J, ARAC E, GANTI S, et al. Improving metal/semiconductor conductivity using AlO_x interlayers on n-type and p-type Si[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(5): 052101.

- [7] SLADE P G. *Electrical contacts: Principles and applications* [M]. New York: Marcel Dekker, 1999.
- [8] MURAKAMI M, KOIDE Y. Ohmic contacts for compound semiconductors[J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Science*, 1998, 23(1): 1–60.
- [9] 杨凯,刁华彬,赵超,等. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 欧姆接触的研究进展[J]. *微纳电子技术*, 2019, 56(9): 681–690.
- [10] 黄玲琴,朱靖,马跃,等. SiC 电力电子器件金属接触研究现状与进展[J]. *物理学报*, 2021, 70(20): 263–270.
- [11] 李博,李辉,李晓雪,等. 具有 Cr 阻挡层的 GaAs 欧姆接触工艺研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(11): 43–52.
- [12] 卫新发,梁国松,张育民,等. 氧化铟锡与掺 Fe 半绝缘 GaN 的接触特性[J]. *半导体技术*, 2021, 46(6): 474–478.
- [13] YU H, SCHAEKERS M, SCHRAM T, et al. A simplified method for (circular) transmission line model simulation and ultralow contact resistivity extraction[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2014, 35(9): 957–959.
- [14] FLOYD L P, SSCHEUERMANN T, HERBERT P A F, et al. An improved transmission line structure for contact resistivity measurements[J]. *Solid-State Electronics*, 1994, 37(9): 1579–1584.
- [15] BERGER H H. Model for contacts to planar devices[J]. *Solid-State Electronics*, 1972, 15(2): 145–158.
- [16] PARK Y, CHOONG V, GAO Y, et al. Work function of indium tin oxide transparent conductor measured by photoelectron spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 68(19): 2699–2701.
- [17] DU H J, WANG T Q, ZENG Y H, et al. Improved contact quality for silver-free silicon heterojunction solar cells by phosphoric acid treatment[J]. *Solar Energy*, 2023, 252: 1–7.