

电子材料与器件实验

兰 伟 盛英卓 韩卫华 编著



兰州大学出版社
LANZHOU UNIVERSITY PRESS

中央高校教育教学改革教材建设专项经费资助

电子材料 与器件实验

兰 伟 盛英卓 韩卫华 编著



兰州大学出版社
LANZHOU UNIVERSITY PRESS

图书在版编目 (C I P) 数据

电子材料与器件实验 / 兰伟, 盛英卓, 韩卫华编著

. -- 兰州 : 兰州大学出版社, 2019. 2

ISBN 978-7-311-05581-3

I. ①电… II. ①兰… ②盛… ③韩… III. ①电子材料—实验—研究生—教材②电子器件—实验—研究生—教材 IV. ①TN04-33②TN103-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第024131号

策划编辑 濮丽霞

责任编辑 佟玉梅 濮丽霞

封面设计 陈 文

书 名 电子材料与器件实验

作 者 兰 伟 盛英卓 韩卫华 编著

出版发行 兰州大学出版社 (地址:兰州市天水南路222号 730000)

电 话 0931-8912613(总编办公室) 0931-8617156(营销中心)
0931-8914298(读者服务部)

网 址 <http://press.lzu.edu.cn>

电子信箱 press@lzu.edu.cn

印 刷 北京虎彩文化传播有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 9.75(插页2)

字 数 20.2千

版 次 2019年2月第1版

印 次 2019年2月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-311-05581-3

定 价 30.00元

(图书若有破损、缺页、掉页可随时与本社联系)

前 言

基于国家发展战略需要，培养适合社会发展需求的复合型人才是高等学校义不容辞的责任和义务。电子材料与器件方面的理论和实验技能是很多产业领域从业人员需要掌握的基础知识，所以有必要在大学阶段开设相关课程，加强相关知识与技能的培训。

编者所在的兰州大学物理科学与技术学院电子材料与器件工程专业（早期是半导体物理专业）成立于1958年10月，至今已经过了60年的发展历程。本书是在过去的《半导体物理实验》基础上发展而来。值此兰州大学建校110周年校庆之际，我们组织本专业的青年教师对原有实验讲义进行了修改补充，并增加了与半导体物理相关的创新类实验题目，以适应新时代发展的需求。

《电子材料与器件实验》分为“三个层次”的实验教学内容，即基础性实验、提高性实验和创新性实验。实验内容既涵盖了经典的半导体物理基础实验，又增加了多个应用性和创新性实验，例如太阳能电池、锂离子电池、超级电容器、气敏探测器、太阳能光催化等。增加实验后，本书既丰富了实验内容，同时又体现了物理基本原理与知识应用的重要性，目的在于紧跟科学发展前沿，提高学生的学习兴趣，拓宽学生的视野，最终达到培养和提高学生科研素质和创新能力的目的。

实验教学是一项集体性工作，电子材料与器件工程专业的全体教师及教辅人员为此付出了多年的努力，特别是张仿清、陈光华、张南屏、王印月等老一辈教授们都曾先后参与了本实验的教学工作，贺德衍和谢二庆教授也对本实验教学做出了很大贡献。这些老师对实验内容和书稿的成形有着突出贡献，在此一并表示感谢。

参加编写本书的人员有：蔡让岐、兰伟、彭尚龙、周金元、韩卫华、潘孝军、

王琦、苏庆、张振兴、刘德全、盛英卓和付玉军等老师。本书由兰伟统稿，韩卫华对部分内容进行了修订，盛英卓对图片和文字进行了整理和校对。

在本书出版过程中，学校给予了经费支持，学院领导对本教材的编写给予了极大的鼓励和帮助，在此向他们表示衷心的感谢。

限于编者的水平和经验，书中难免会存在不足之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2018年9月于兰州大学

目 录

第一部分 基础性实验	001
实验一 四探针法测量半导体电阻率	003
实验二 椭圆偏振法测量薄膜厚度和折射率	010
实验三 激光测定单晶硅的晶向	018
实验四 荧光分光光度计测试半导体光致发光	022
实验五 紫外-可见分光光度计测试光谱	030
实验六 MOS结构的高频电容-电压特性测试	035
实验七 半导体材料的霍尔系数和电阻率	042
实验八 半导体材料的塞贝克系数测定	049
实验九 光刻工艺	055
第二部分 提高性实验	061
实验十 肖特基二极管的伏安特性测量	063
实验十一 电感耦合等离子体化学气相沉积法制备硅基薄膜	067
实验十二 射频溅射法沉积氧化物薄膜	071
实验十三 热丝化学气相沉积制备非晶碳基薄膜	080
实验十四 场效应晶体管的性能测定	085

实验十五 太阳能电池参数测定	093
----------------------	-----

第三部分 创新性实验	099
------------------	-----

实验十六 静电纺丝制备半导体纳米材料	101
--------------------------	-----

实验十七 微弱电能信号的测量与收集	104
-------------------------	-----

实验十八 光化学电池型自供能紫外探测器	110
---------------------------	-----

实验十九 锂离子电池的组装与性能	117
------------------------	-----

实验二十 超级电容器的性能测量	126
-----------------------	-----

实验二十一 纳米氧化物半导体材料 TiO_2 光催化性能	136
---	-----

实验二十二 气敏传感器的组装与性能	142
-------------------------	-----

实验一 四探针法测量半导体电阻率

第一部分

基础性实验

四探针法测量半导体电阻率实验，是半导体物理实验课程中的一项重要实验。通过该实验，可以使学生了解四探针法的原理、实验装置、实验步骤及数据处理方法，并掌握半导体电阻率的测量方法。

一、实验目的

1. 了解四探针法测量半导体电阻率的原理及实验装置。
2. 掌握四探针法测量半导体电阻率的实验步骤及数据处理方法。
3. 学会使用四探针法测量半导体电阻率的实验装置及数据处理软件。
4. 通过实验结果分析，了解半导体电阻率与掺杂浓度的关系。

二、实验原理

1. 四探针法测量原理

四探针法测量电阻率的基本原理是：将四根探针（探针1、2、3、4）垂直地压在待测样品表面，如图1所示。探针1和2施加电流，探针3和4测量电压。通过测量电流和电压，可以计算出样品的电阻率。该方法的优点是：不需要知道样品的几何尺寸，且测量精度高。



图1. 四探针法测量原理示意图

实验一 四探针法测量半导体电阻率

电阻率是反映半导体材料导电性能的重要参数，有多种方法可以测量电阻率，其中四探针法具有操作方便、测量精确度高、对样品形状无严格要求等特点，可用来测量块材、薄片、薄膜等各类材料的电阻率，已经广泛应用于科学研究和企业生产中。

一、【实验目的】

1. 掌握四探针法测量半导体电阻率和方块电阻的基本原理和测试方法。
2. 学会单电测量法和双电测量法测试单晶硅片电阻率。
3. 学会单电测量法和双电测量法测试ITO透明导电薄膜方块电阻。
4. 了解四探针法测试电阻率及方块电阻的影响因素和改进办法。

二、【实验原理】

1. 常规单电测量法原理

常规四探针单电测量法是将四根金属探针排成一条直线，如图1所示。探针之间的距离 s 通常为1 mm。其中外侧探针1、4与恒流源连通，样品中通有恒定电流 I ，此时在内侧探针2、3之间会产生电压降 U 。下面将讨论不同情况下单电测量法的数据处理过程。

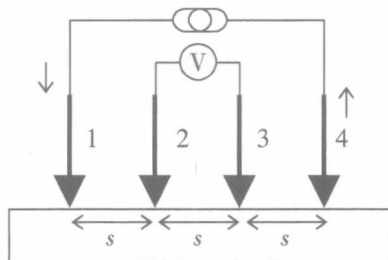


图1 常规单电测量法原理图

(1) 半无穷大样品

当四根探针同时压在半导体平整表面上, 样品尺寸相对于探针间距 s 可视为半无穷大。假如材料表面均匀, 并忽略电流在探针处的少数注入, 由探针流入样品的电流 I 可视为点电流源, 此时所产生的电力线具有球面对称性, 即等势面为一系列以点电流源为中心的半球面。样品中距离点电源 r 处的电流密度 j 和电场强度 E 分别为

$$j = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (1)$$

$$E = \frac{j}{\sigma} = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (2)$$

其中 σ 和 ρ 分别是样品的电导率和电阻率。以无穷远处的电势为零, 若电流 I 由探针1流入样品, 探针4流出样品, 则有

$$U = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (3)$$

根据电势叠加原理, 在探针2处的电势 U_2 是探针1处点电流源 $+I$ 和探针4处点电流源 $-I$ 贡献之和

$$U_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{S_1} - \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{S_2 + S_3} \quad (4)$$

同理, 探针3处的电势为

$$U_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{S_3} \quad (5)$$

式中的 S_1 是探针1和2之间的距离, S_2 是探针2和3之间的距离, S_3 是探针3和4之间的距离。所以探针2、3之间的电势差为

$$U_{23} = U_2 - U_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} + \frac{1}{S_3} \right) \quad (6)$$

当 $S_1 = S_2 = S_3 = s$ 时, (6)式简化为

$$U_{23} = U_2 - U_3 = \frac{I\rho}{2\pi s} \quad (7)$$

由此可求出样品的电阻率为

$$\rho = 2\pi s \frac{U_{23}}{I} \quad (8)$$

公式(8)就是常规四探针单电测量法的电阻率计算公式, 可见只要测出流过探针1、4的电流 I , 探针2、3之间的电势差 U_{23} 以及探针间距 s , 就可以求出样品的电阻率。

上述这些公式是在半无穷大样品的基础上导出的。实际上只要样品的厚度、边缘与探针之间的最近距离大于4倍探针间距 s 时, (8)式就具有足够的精确度。若这些条件不能满足, 由探针流入样品的电流就会被样品的边界表面反射(非导电边界)或吸收(导电边界), 结果会使探针2、3处的电势升高或降低。因此, 在这种情况下测得的电阻率值会高于或低于样品电阻率的真实值, 需要对测量结果进行一定的修正。修正后的

计算公式为

$$\rho = 2\pi s \frac{U_{23}}{I} \cdot \frac{1}{B_0} \quad (9)$$

式中 B_0 为修正因子。

(2) 薄膜样品 (例如 ITO 薄膜)

相对于探针间距 s , 如果薄膜样品的厚度 t 可视为无穷小, 而面积可视为无穷大时, 薄膜可看成是二维平面。此时, 从探针 1 流入、探针 4 流出的电流 I , 其等势面可近似为圆柱面, 薄膜样品的电阻率为

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} t \frac{U_{23}}{I} = 4.532 t \frac{U_{23}}{I} \quad (10)$$

可知, 对于薄膜样品而言, 在等间距探针情况下, 探针间距 s 与测量结果无关, 但是电阻率与样品厚度 t 成正比。

薄膜样品的方块电阻为

$$R_{\square} = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{U_{23}}{I} = 4.532 \frac{U_{23}}{I} \quad (11)$$

$R_{\square}$ 的单位为欧姆/ $\square$ 或 $\Omega/\square$ 表示, 代表一个正方形薄层的电阻。值得注意的是它与正方形边长的大小无关, 所以取名为方块电阻。

实际上无限薄的薄膜是不存在的, 只要薄膜样品 (如 ITO) 的厚度 $t \ll s/2$ 时, 可视为无限薄的薄膜。例如 ITO 薄膜厚度 t 只有几个微米或更小, 而探针间距 s 一般为 1 mm, 所以无限薄层的条件是能够满足的。

如果薄膜的表面不能视为无穷大, 就要对 (11) 式进行修正。此时薄膜的方块电阻公式就变为

$$R_{\square} = C_0 \frac{U_{23}}{I} \quad (12)$$

式中 C_0 为修正系数。

在使用四探针法测量半导体电阻率时, 要求探头边缘到样品边缘的距离远大于探针间距, 一般要求在 10 倍以上。在无振动条件下进行测量时, 根据被测对象给予探针一定的压力, 否则探针振动会引起接触电阻变化。

注意: 本实验所用 RTS-9 型双电测四探针测试仪, 可使用 RTS-8 控制软件对样品进行常规单电法测量。

2. 双电测量法原理

双电测量法是将直线四探针法的两种测量模式进行如下组合 (如图 2 所示)。

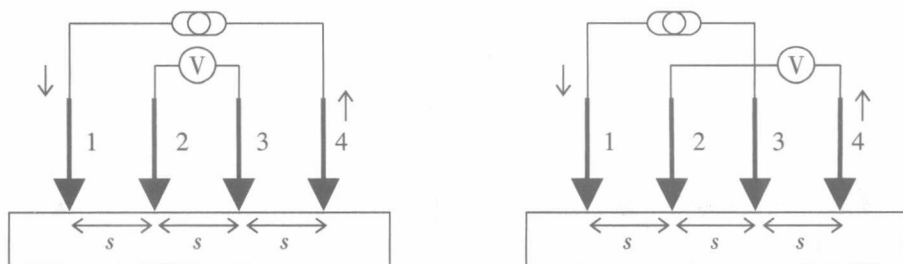


图2 双电测量法原理图

将探针垂直压在被测样品表面上分别进行 $I_{14}U_{23}$ 和 $I_{13}U_{24}$ 两种模式测量, 测量过程如下:

(1) 进行 $I_{14}U_{23}$ 组合测量:

电流 I 从探针 1 → 探针 4, 在探针 2、3 上测得电压 U_{23+} 。

电流换向, I 从探针 4 → 探针 1, 在探针 2、3 上测得电压 U_{23-} 。

计算正反向测量平均值: $U_{23} = (U_{23+} + U_{23-})/2$ 。

(2) 进行 $I_{13}U_{24}$ 组合测量:

电流 I 从探针 1 → 探针 3, 在探针 2、4 上测得电压 U_{24+} 。

电流换向, I 从探针 3 → 探针 1, 在探针 2、4 上测得电压 U_{24-} 。

计算正反向测量平均值: $U_{24} = (U_{24+} + U_{24-})/2$ 。

(3) 计算 (U_{23}/U_{24}) 值 (以上 U_{23} 、 U_{24} 均以 mV 为单位)。

(4) 按以下两公式计算几何修正因子 C_0 。

若 $1.18 < (U_{23}/U_{24}) \leq 1.38$ 时,

$$C_0 = -14.696 + 25.173 \left(\frac{U_{23}}{U_{24}} \right) - 7.872 \left(\frac{U_{23}}{U_{24}} \right)^2 \quad (13)$$

若 $1.10 \leq (U_{23}/U_{24}) \leq 1.18$ 时;

$$C_0 = -15.85 + 26.15 \left(\frac{U_{23}}{U_{24}} \right) - 7.872 \left(\frac{U_{23}}{U_{24}} \right)^2 \quad (14)$$

(5) 使用公式 (12) 计算方块电阻 $R_{\square}$ (单位: $\Omega/\square$):

$$R_{\square} = C_0 \frac{\bar{U}_{23}}{I} \quad (15)$$

其中: I 为测试电流, 单位: mA, $\bar{U}_{23}$ 为从探针 2、3 上测得电压 U_{23+} 和 U_{23-} 的平均值, 单位: mV。

(6) 若已知样品厚度 t , 可按下式计算样品电阻率 ρ :

$$\rho = \frac{R_{\square} \cdot t}{10} F \left(\frac{t}{s} \right) \quad (16)$$

其中: $R_{\square}$ 为方块电阻值, 单位为 $\Omega/\square$; t 为样品厚度, 单位为 cm ($t \leq 0.3$ cm); s 为探针平均间距, 单位为 cm; $F(t/s)$ 为厚度修正系数。

(7) 计算百分变化率 (以测试样品电阻率 ρ 为例):

$$S_{\max} = \frac{\rho_M - \rho_m}{\rho_m} \times 100\% \quad (17)$$

$$S_{\text{average}} = \frac{|\rho_a - \rho_c|}{\rho_c} \times 100\% \quad (18)$$

$$E = \frac{2(\rho_M - \rho_m)}{\rho_M + \rho_m} \times 100\% \quad (19)$$

上式中: $S_{\max}$ 是最大百分变化; S_{average} 是平均百分变化; ρ_M 、 ρ_m 分别为测量所得电阻率的最大值和最小值, 单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$; ρ_c 为第 1、2 点 (圆片中心测量点) 的测量平均值, 单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$; ρ_a 为除第 1、2 点外其余各点的测量平均值, 单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$ 。若测量样品的方块电阻值, 则将 (17)、(18)、(19) 式中的 ρ_M 、 ρ_m 、 ρ_a 、 ρ_c 分别改成 R_M 、 R_m 、 R_a 和 R_c , 其公式意义与 ρ_M 、 ρ_m 、 ρ_a 、 ρ_c 相似。

三、【实验仪器】

本实验使用 RTS-9 型双电测四探针测试仪。该仪器主要由四探针测试仪主机 (包括恒流源和数字电压表)、探针测试台、四探针探头、计算机等部分组成。测量原理为: 通过采用四探针双位组合测量技术, 将范德堡测量方法推广应用到直线四探针上。利用电流探针和电压探针的组合变换, 进行两次电测量, 最后计算结果能自动消除由样品几何尺寸、边界效应、探针不等距和机械游移等因素所引起的误差, 显著降低对测量结果的不利影响, 从而提高测量结果的准确度。因此双电测模式比单电测模式 (常规四探针测量方法) 更加准确可靠。该仪器也可采用单电测量模式。

RTS-9 型双电测四探针测试仪的具体技术指标如下:

1. 测量范围

电阻率: $10^{-5} \sim 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$; 方块电阻: $10^{-4} \sim 10^6 \Omega/\square$;
电导率: $10^{-5} \sim 10^5 \text{ S/cm}$; 适合样品厚度: $\leq 3.00 \text{ mm}$ 。

2. 恒流源

电流量程分为 $1 \mu\text{A}$ 、 $10 \mu\text{A}$ 、 $100 \mu\text{A}$ 、 1 mA 、 10 mA 、 100 mA 六挡, 各挡电流连续可调。

3. 数字电压表

量程: $000.00 \sim 199.99 \text{ mV}$; 分辨率: $10 \mu\text{V}$;
输入阻抗: $> 1000 \text{ M}\Omega$; 精度: $\pm 0.1\%$ 。

4. 四探针探头基本指标

间距: $1 \pm 0.01 \text{ mm}$ 。
针间绝缘电阻: $\geq 1000 \text{ M}\Omega$ 。

机械游移率： $\leq 0.3\%$ 。

探针：碳化钨或高速钢材质，探针直径 $\Phi=0.5\text{ mm}$ 。

探针压力：5~16 N（总力）。

四、【实验内容】

- 1. 测量单晶硅片的电阻率。
- 2. 测量 ITO 透明导电薄膜的方块电阻。

五、【实验步骤】

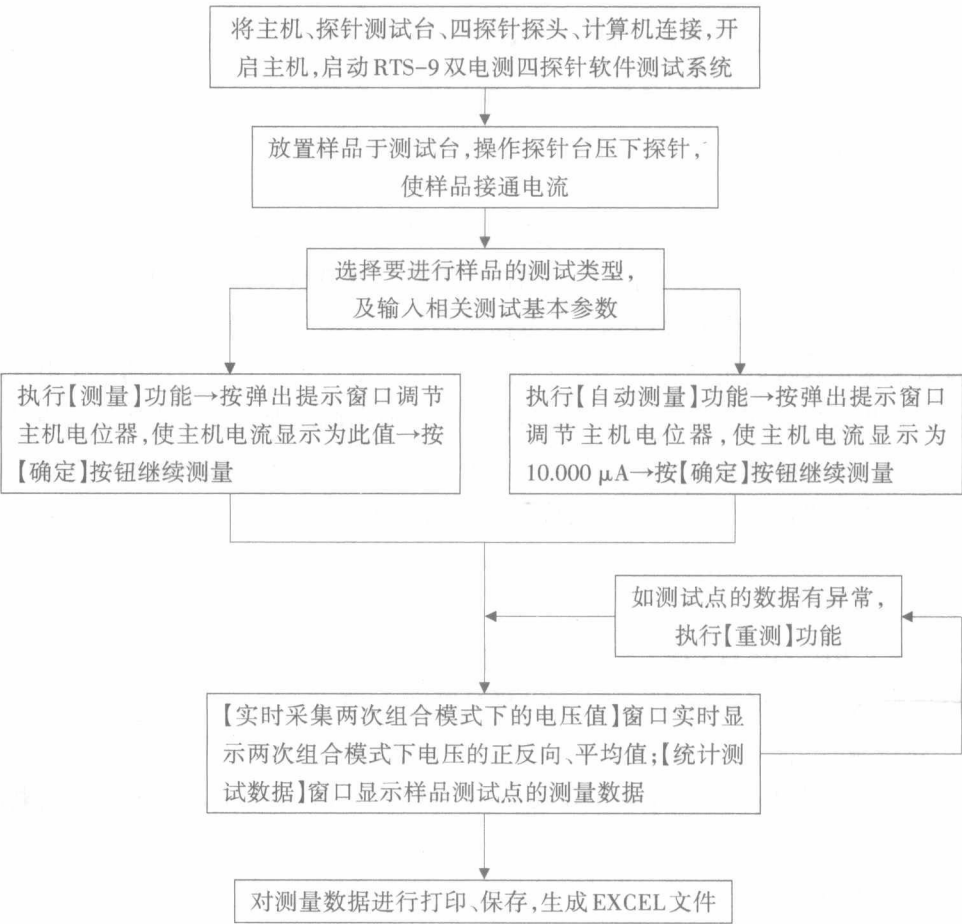


图3 实验基本操作流程图

六、【注意事项】

- 1. 四探针测试仪主机开机后请预热 10 min 以上, 再进行测试。

2. 在调整样品测试位置时, 请将探针头抬起来再移动, 以免破坏样品和探针。

七、【思考题】

1. 比较单电测模式和双电测模式的优缺点。
2. 在什么情况下需要对所得电阻率和方块电阻的测量结果进行修正?

【参考文献】

- [1] 刘诺. 半导体物理与器件实验教程 [M], 北京: 科学出版社, 2017.

实验二 椭圆偏振法测量薄膜厚度和折射率

椭圆偏振法是一种通过测量光在样品表面反射后偏振状态的变化而测定薄膜性质的方法。由于此法具有非接触性、非破坏性、灵敏度高和精度高等优点,已被广泛用于测量薄膜厚度和光学常数。由于椭圆偏振法数据采集速度快,也可用于薄膜生长和器件工艺过程的实时监测。

一、【实验目的】

1. 掌握椭圆偏振法测量的基本原理和实验方法。
2. 了解反射型椭偏仪的基本构造。
3. 学会测量几种常见薄膜的折射率和厚度,以及金属厚膜的复折射率。

二、【实验原理】

椭偏仪的基本原理如下:用一束椭圆偏振光照射到样品表面,入射光中平行于入射面的电场分量(以下简称 P 分量)和垂直于入射面的电场分量(以下简称 S 分量)在样品表面有不同的反射系数、透射系数,即入射光经反射后,其偏振状态会发生改变。依据入射光在反射前后偏振状态的变化(包括振幅和相位的变化),可以计算得到反射系数比,进而确定样品的厚度和折射率,或金属厚膜的复折射率。

下面根据光学相关理论,具体分析单层介质薄膜的厚度和折射率,金属厚膜复折射率的测量原理。

1. 单层介质薄膜的厚度和折射率的测量原理

(1) 光在介质薄膜上下表面的反射与折射

如图1所示,当一束光线通过空气射入介质薄膜,就会在空气与薄膜界面以及薄膜与衬底界面处发生反射和折射。其中:介质1为空气,折射率为 n_1 ;介质2为待测薄膜,折射率为 n_2 ;介质3为衬底,折射率为 n_3 。 φ_1 为入射角, φ_2 、 φ_3 分别为光在空气与薄膜界面处和薄膜与衬底界面处的折射角。这三个角度的关系符合折射定律: