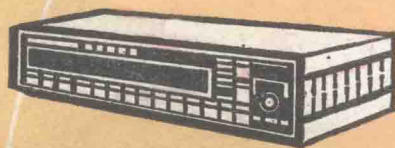


半导体材料 电磁参数的测量

[美] H.H.WIEDER 著 李达汉 译 褚一鸣 校



计 量 出 版 社

半导体材料电磁参数的测量

[美]H.H.WIEDER 著

李达汉 译

褚一鸣 校

计量出版社

内 容 提 要

本书是一本介绍半导体材料基本电磁特性测量技术的专著。主要叙述实验测量技术, 实验装置和仪器, 以及得到所需参数的计算过程, 包括均匀材料及各向异性材料电阻率和电导率测量、霍尔效应测量、磁阻测量、载流子传输参数测量、扩展电阻测量、温差电和热磁效应测量等, 内容丰富而新颖。本书既有常规的手动测量方法, 又包含计算机辅助自动测量及微电子测试图形应用等新技术; 既有测量装置、仪器的描述, 又有数据处理及误差分析的方法; 对采用计算机辅助自动测量技术也给出了一些典型的程序图。不少内容是其它同类书籍所没有的。此外, 书中还讨论了应用上述测量技术研究固体材料基本电子特性的方法。

本书适用于从事固体物理学应用研究的科技工作者和半导体材料、电子器件的制造、开发研究及应用的电子工程师, 对相应专业的大学生、研究生也是一本重要的参考书和实验手册。

H. H. WIEDER

LABORATORY NOTES ON ELECTRICAL AND
GALVANOMAGNETIC MEASUREMENTS

ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY, 1979

半导体材料电磁参数的测量

〔美〕H. H. WIEDER 著

李达汉 译

褚一鸣 校

责任编辑 王朋植

✻

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

✻

开本 787 × 1092 1/32 印张 11

字数 255千字 印数 1—6000

1986年10月第一版 1986年10月第一次印刷

统一书号 15210·540

定价 2.55 元



译者序

随着半导体集成电路集成度的不断提高,要求所使用的半导体材料硅、锗、砷化镓等的电磁特性也要不断改善,以保证它有足够高的合格率,从而取得较高的经济效益,因此半导体材料电磁特性及其测量技术、测量装置和仪器的研究越来越被人们所重视。美国科罗拉多大学和美国海军研究中心电子材料科学部的科学家H. H. Wieder 所著《半导体材料电磁参数的测量》一书是一部具有代表性的著作。美国国家标准局(NBS)所属国家工程研究所内设有电子器件部和半导体材料部,专门从事半导体器件和半导体材料测量技术的研究工作,他们负责研究制订标准测试方法;研制标准测试装置和仪器;开展测试服务工作并出版半导体测量技术特刊(NBS Spec. publ. 400 Semiconductor Measurement Technology)。北大西洋公约组织(NATO)的高等研究院,组织主要成员国的科学家编写五大类科学论文集的第四十六卷,也是“半导体材料的测量评价”专集。

我国在半导体材料科学及应用研究中,正借鉴和吸收国际先进技术,以求早日进入国际先进行列。如果本书能在这方面起到一点促进作用,译者将感到极大的欣慰!

本书作为美国《材料科学专论》的第二卷,对半导体材料及器件制造工艺过程中电磁参数的实验测量技术(包括方法和程序)、实验装置和仪器以及测量数据的采集、处理和误差分析等,做了较为全面而系统的论述。全书共分十章,包括半导体材料的电阻率、霍尔效应、磁阻效应、温差电和

热磁效应以及载流子传输参数等的测量；对高电阻率材料和非均匀各向异性材料测量中的一些特殊问题也分别成章进行了较为深入的讨论。在这些参数的测量中，引入了微电子测试图形工艺监控和计算机辅助自动测量等新技术，内容丰富而新颖，为从事半导体物理、半导体材料与器件的理论及应用研究的科技工作者的一本重要参考书；同时，对上述专业以及电气电子测量技术与仪器专业的研究生和大学生也是一本较好的专业参考书。

本书在翻译过程中，已对原书中某些物理量名词做了统一，较为明显的错误（包括内容叙述、符号、公式和图表等）译校时也做了修改。

于渤副研究员对本书大部分章节做了初校，并帮助翻译了第三、四章；李滨同志翻译了第十章；褚一鸣副研究员对全书做了详细审校。本书翻译过程中，得到袁隐、李淑麟同志的有益帮助。他们审阅了大部分译稿，并提出很好的建议，在此一并表示感谢！

“译事三难——信、达、雅”。限于译者英语水平和半导体知识，书中欠妥乃至错误在所难免，请读者批评指正。

译 者

1984年8月

致中国读者

任何一个作者都希望看到他的读者数量的增加和得到高度的赞扬，因为这在回顾写作时能证明他所取得的成果是有效的。我希望我的这一著作翻译成中文能对中国的、与电气和电磁测量有关的大学生及研究工作者有益；其次，希望它能促进实现我们共同的目标——增加对我们都将有利的、自然界的知识。



1985.2.19于圣地亚哥

序 言

本书主要讨论固体材料电磁参数测量技术以及用它们来研究固体材料基本电子特性的方法。读者对象是从事固体物理学应用研究的物理学家和从事固体电子元、器件开发、研究的电子工程师们，同时也可作为在固体物理方面有相当基础的物理及工程技术专业大学毕业生的工作指导和实验室的参考书。

在晶态固体载流子传输参数理论入门方面已可以找到许多很好的教科书和专题论文，但是，其中大多数对测量这些参数的实验测量技术和仪器的叙述都是非常粗略的。本文集讨论在固体物理的基础及应用研究的发展进程中起作用的电气、电磁、热电和热磁测量。新仪器和新技术的出现导致常规实验程序的改变，新器件的应用对测量精密度和准确度方面提出了更严格的要求。本书不是、也不企图在这个领域详尽的评述，它涉及到只要求用相当简单的工具和仪器的测量，但同时也提供给读者关于利用电子计算机进行实验室辅助测量方面的技术。本书的编写过程是自然而然形成的。从原来对科罗拉多州立大学毕业生在半导体实验研究方面所遇到的疑难问题进行讲课用的笔记开始，随着时间的推移以及根据教师和学生的反映，最后把它们变成系统的总结。也可以说是把大量笔记加以补充后条理化而成书的，这些或许对其它同行是有益的。

在承担本书编写工作中一个不可缺少的人是我的秘书 E. B. Davis 女士。在书稿的不同阶段，从零乱的草稿到最后

打字完成,由于她做了大量的工作,把原始的但又是庞多的草稿调整得很有秩序.我还要感谢我的同事和合作者 J.Sites、D.Lile、W.Y.Lum、A.R. Clawson 和 L. Meiners,他们阅读了我的初稿,指出了各种遗漏和错误,并提出了许多有用的建设性意见.书中还存在的错误,自然都应由我自己负责,同时我确信广大读者会把这些提出给我注意的.弗·培根说得好:“不怕错误,就怕混乱。”

H.H. Wieder

目 录

第一章 电阻率和电导率	(1)
1.0 引言	(1)
1.1 两探针法电阻率测量.....	(3)
1.2 共线四探针法电阻率测量.....	(7)
1.3 方形四探针法电阻率测量.....	(13)
1.4 探针和测量仪器.....	(20)
1.5 任意形状薄片样品的电阻率测量.....	(25)
1.6 电极尺寸、位置及几何形状引起的误差.....	(31)
1.7 无电极法电阻率测量.....	(39)
参考文献.....	(45)
第二章 霍尔效应	(49)
2.0 引言.....	(49)
2.1 测量步骤.....	(55)
2.2 系统误差.....	(62)
2.3 任意形状样品的霍尔效应.....	(66)
2.4 测量装置和测量技术.....	(73)
2.5 微波霍尔效应.....	(79)
2.6 螺旋波 (Helicon Waves)	(82)
参考文献.....	(85)
第三章 磁阻	(89)
3.0 引言.....	(89)
3.1 几何磁阻.....	(92)
3.2 干扰和不均匀性.....	(96)
3.3 物理磁阻.....	(102)
3.4 微波磁阻.....	(106)

参考文献	(114)
第四章 载流子传输参数	(117)
4.0 引言	(117)
4.1 本征导电和近本征导电	(119)
4.2 非本征和补偿材料	(126)
4.3 简并性	(130)
4.4 载流子在导带间和价带间的传输	(133)
4.5 载流子迁移率	(139)
参考文献	(145)
第五章 非均匀和各向异性材料	(148)
5.0 引言	(148)
5.1 扩散和离子注入	(149)
5.2 有序夹杂物和电导率条纹	(159)
5.3 多晶和多相材料	(168)
5.4 各向异性材料	(172)
参考文献	(175)
第六章 受表面空间电荷控制的测量	(179)
6.0 引言	(179)
6.1 平衡态和准静态特性	(185)
6.2 高频和非平衡的 $C-V$ 测量	(192)
6.3 复数导纳的测量	(195)
6.4 自由载流子浓度的分布	(200)
6.5 栅控电导率和霍尔系数测量	(205)
参考文献	(215)
第七章 电学特性的空间分布	(218)
7.0 引言	(218)
7.1 光学法和光伏扫描法	(219)
7.2 测定电导率梯度分布图的电子束法	(229)
7.3 探针位置分布和等电阻率图	(236)
7.4 保角变换和有限差分法	(241)
7.5 扩展电阻技术	(248)

参考文献	(251)
第八章 高电阻率材料的电学测量	(255)
8.0 引言	(255)
8.1 直流测量法	(255)
8.2 交流测量技术	(265)
8.3 绝缘体的电学测量	(269)
参考文献	(278)
第九章 温差电和热磁效应测量	(281)
9.0 引言	(281)
9.1 塞贝克测量	(287)
9.2 热磁效应测量	(298)
9.3 热传输参数	(301)
9.4 非均匀材料的热电磁特性	(304)
参考文献	(307)
第十章 自动测量和计算机辅助测量	(311)
10.0 引言	(311)
10.1 电阻率和霍尔系数的自动测量	(317)
10.2 分时计算机控制测量	(327)
10.3 烘箱、低温恒温器和温度控制器	(334)
10.4 数字化可编程序部件	(336)
参考文献	(338)

第一章 电阻率和电导率

1.0 引言

半导体材料的电阻率 ρ 和它的倒数——电导率 $\sigma = 1/\rho$ 是表征材料特性的参数，它们是电流密度矢量 $\mathbf{J}$ 和电场强度矢量 $\mathbf{E}$ 的比例系数。用欧姆定律表示为：

$$\mathbf{J} = \hat{\sigma} \mathbf{E} \quad \mathbf{E} = \hat{\rho} \mathbf{J} \quad (1.1)$$

通常 $\hat{\sigma}$ 和 $\hat{\rho}$ 是二阶张量。通过适当的坐标轴系的旋转变换，它们可以简化为对角化的形式。其结果使被测的三个主要的电导率或电阻率张量分量平行于主晶轴。切成平行六面体，各边与主晶轴夹角分别为 α_1 、 α_2 和 α_3 的单晶体的电阻率为：

$$\rho = \rho_1 \cos^2 \alpha_1 + \rho_2 \cos^2 \alpha_2 + \rho_3 \cos^2 \alpha_3 \quad (1.2)$$

从对称性考虑，要求立方晶体 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3$ ；对于四角晶系、六角晶系和三角晶系的晶体，具有一个多于二度对称性的轴，即 $\rho_1 = \rho_2 \neq \rho_3$ ；对于单斜、斜方和三斜晶系的晶体，它们的电阻率 ρ 有三个不同的张量分量。

在 ρ 和 σ 的测量中所涉及的载流子传输是一个不可逆的热力学过程。因此，如果在被测材料上没有外磁场作用，则 Onsager 原理能适用^[1]，并且张量是对称的，即 $\rho_{kl} = \rho_{lk}$ 和 $\sigma_{lk} = \sigma_{kl}$ 。加到样品上的电流密度不能任意增大，以其不在样品上产生焦耳热为限；如果由于被测样品吸热而使电阻率与温度有关，那么电场强度 $\mathbf{E}$ 就不再是 $\mathbf{J}$ 的线性函数。焦耳热的产生是电流密度和电场强度的标量积：

$$J_k E_k = \rho_{kl} J_k J_l = \rho J^2 \quad (1.3)$$

因此，单位时间、单位体积内所产生的热量是电流通过方向上电流密度的平方与电阻率的乘积。

如果焦耳热或由外部热源所吸收的热是不均匀分布时，则会存在热梯度而产生热流，它们与载流子传输有相互作用。这些因素如果不能消除或很好考虑，都可能在测量 ρ 和 σ 时产生明显的误差。这种相互作用可用塞贝克和珀尔帖热电现象表示。塞贝克效应是由温度梯度建立电场的现象，即：在不同材料的结的两侧，如果不同金属之间、金属和半导体之间有温度梯度 ∇T ，则产生的温差电动势将建立起一个电场。与此相反，珀尔帖效应是热流密度 J_h 由电流密度建立起来的，即在等温条件下，电流密度通过不同材料的结时，产生一个相应的热流密度：

$$\begin{aligned} E &= S \cdot \nabla T & J &= 0 \\ J_h &= P \cdot J & \nabla T &= 0 \end{aligned} \quad (1.4)$$

式中 S 和 P 分别为塞贝克系数和珀尔帖系数；同时，它们都是二阶张量，并且在绝对温度为 T 的情况下，由 Onsager 倒易关系的一个支系开尔文方程式联系起来，即 $P_{kl} = TS_{lk}$ 。

用实验的方法测定 S 系数比 P 系数更方便。 $S = -\Delta V / \Delta T$ ，用电位差 ΔV 和温度差 ΔT 测量起来比用热流密度表示的 P 更容易些。 S 的典型数值（单位为 $\mu V/K$ ）：金属材料为 $|1 \sim 10|$ 之间；半金属材料为 $|10 \sim 100|$ 之间；半导体材料为 $|10^2 \sim 5 \times 10^2|$ 之间。

在半导体材料电阻率和电导率测量中，可以在等温条件下进行。利用改变加到样品的电流极性、取所测电位差的代数平均值、用交流电流进行测量或者用小电流进行测量以尽量减少焦耳热等措施，可以减小或消除电流热效应和热电效应引起的误差。

1.1 两探针法电阻率测量

半导体材料的电阻率可以通过测量如图 1.1 所示的、平行六面体样品的电阻然后经过计算得出。为了确定这个电阻，需要进行电学测量。此电阻可用恒流源供给的电流和在探针接触点间产生的电位差表示。为了确定几何尺寸和电位探针间的距离，也需要进行机械量测量。

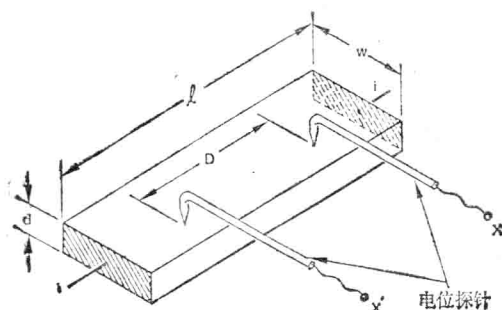


图 1.1 半导体材料电阻率测量的
样品示意图。其欧姆接触电极覆盖面积为 dw ，
电位探针近似位置如图

现在研究一个均匀一致，并且各向同性的平行六面体样品。如图 1.1 所示，电流 i 加到欧姆接触点上，其覆盖面积为 dw ，所以电流密度为 $J = i/dw$ 。两根淬过火的、用工具钢或碳化钨做成的探针在被测材料正面靠近中心的地方成弹性接触，作为电气接点。探针的排列沿着电流流过的方向，两针之间的距离为 D 。如果样品上的电位测试探针在任何方向上距离边界都不小于 $10D$ ，那么，用它们之间电位差 V 表示的电场为 $E = V/D$ 。因此，样品的电阻率可以简单地表示为：

$$\rho = \left(\frac{V}{i} \right) \cdot \left(\frac{wd}{D} \right) \quad (1.5)$$

图 1.2 是完成这一测量所需设备、仪器的示意图。恒流源给样品提供一个电流 i ，如图 1.1 所示。这个恒流源是一个电流发生器，它在预先设定的范围内能提供一个稳定的电流而不受其负载电阻变化的影响。所谓“调正度”是用来衡量

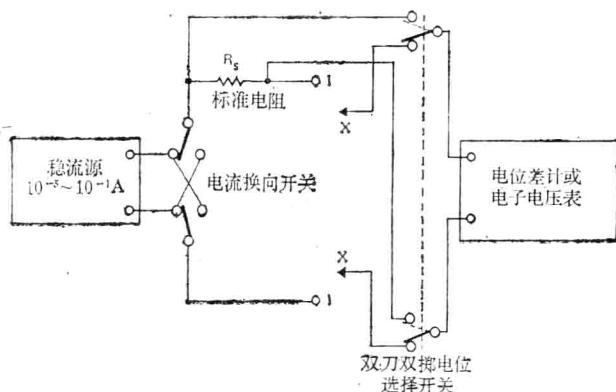


图 1.2 两探针法电阻率测量的电路图

电流稳定性的，并定义为：当恒流源的负载从短路变化到某一需要值时（此时恒流源能有满输出电压），输出电流发生的变化。一般来说，这个调正度应比要求的测量准确度高一个数量级；典型值为 $\pm 0.5\%$ 。图 1.2 中的电流换向开关是用来转换电流极性的；标准电阻的数值一般为被测样品的 10^3 倍；双刀双掷电位选择开关是用来选择跨接标准电阻上的电位差或跨接电位探针 X-X 上的电位差的；电位差计或电子电压表应能测量 $10^{-4} \sim 1\text{V}$ 范围内不同极性的电位差，并有 $\pm 0.5\%$ 的准确度，输入阻抗不低于被测电阻的 10^5 倍。测微

计或游标卡尺准确度要求 $\pm 0.5\%$ ，用它来测量样品的机械尺寸。校准显微镜用来测量具有允许误差为 $\pm 0.5\%$ 的探针间距。探针尖的标称半径为 $25\sim 50\mu\text{m}$ ，并应加上 $1.5\pm 0.5\text{N}$ 的负荷力。

为了完成上述测量，样品的电流导线连接到图 1.2 上的 $i-i$ 端。调节电流值的大小，直到样品上的电场强度约为 1V/cm 。首先测量在标准电阻 R_s 两端的电位差 V_1 ，然后测量电位探针 $X-X$ 上的电位差 V_p ，接着再次测量标准电阻上的电位差 V_2 。于是电阻率 ρ_1 可以由计算得出：

$$\rho_1 = \left(2R_s \frac{wd}{D} \right) \cdot \left[\frac{V_p}{(V_1 + V_2)} \right] \quad (1.6)$$

电流极性改变后，按上述相同步骤测定电阻率 ρ_2 。电阻率的平均值则为：

$$\rho_{av} = \frac{(\rho_1 + \rho_2)}{2} \quad (1.7)$$

按上述方法，九个不同实验室在 23°C 情况下对硅片和硅棒进行了测量，其典型精度估计为 $\pm 6\%$ 。除了前面所说的电流热效应和热电效应外，还有一些因素也可能引入 ρ 值的测量误差。这些因素包括：来自周围环境辐射的载流子的光注入；由附近的高频电源感应的电势，尤其是在电压探针回路中；样品的机械振动对探针接触电阻可能产生噪声调制等。克服这些缺点的办法，我们将在下一章叙述。

如图 1.1 所示测量电阻率的电位差计，Dauphinee⁽³⁾和 Dauphinee 与 Mooser⁽⁴⁾已经叙述过了。图 1.3 表示了这种电路的基本特征。利用一个双刀双掷、先通后断斩波器 M_3 把通过样品 R_s 和参考电阻器 R_w 的电流 i 转换成 35 Hz 的方波交变电流。另外两个斩波器 M_1 和 M_2 （先断后通）与 M_3 是

同步驱动, 当电流 i_f 正方向流过时, 使电容器 C_1 接向 R_w , C_2 接向 R_s ; 如果电流反向通过为 i_r 时, 电容器的连接也随

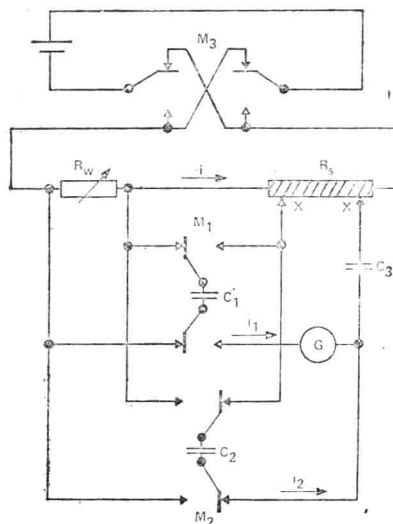


图 1.3 两探针法电阻率测量用的电位差计。M₁、M₂、M₃是同步的斩波器；R_w是可调精密电阻器；C₁、C₂、C₃是交流聚苯乙烯电容器（80μF）；R 是被测样品；G是差动微伏计或是检流计

之交换。电位差 $V_f(R_w)$ 和 $-V_r(R_s)$ 之差产生一个脉动直流 i_1 , 并流过检流计 G。用类似的方法, 由于 $V_r(R_w)$ 和 $-V_f(R_s)$ 之间的差产生另一个脉动直流 i_2 , 斩波器的周期可以调到使电流 i_1 和 i_2 之间相位差 180° , 形成一个交变电流 $(i_1 + i_2)$, 它能通过电容器 C_3 。

产生 i_1 、 i_2 的电位差 ΔV_1 、 ΔV_2 分别为:

$$\begin{aligned}\Delta V_1 &= V_f(R_w) + V_r(R_s) \\ \Delta V_2 &= V_r(R_w) + V_f(R_s)\end{aligned}\quad (1.8)$$