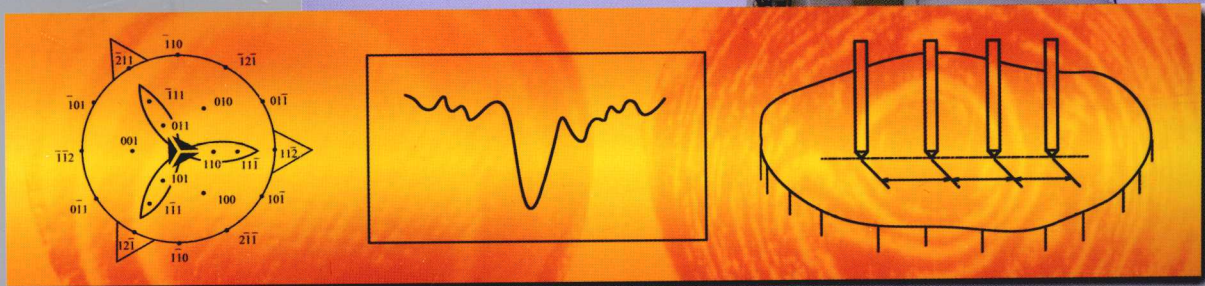


太阳能光伏产业——硅材料系列教材

硅材料检测技术

康伟超 王丽 主编



化学工业出版社

太阳能光伏产业——硅材料系列教材

硅材料检测技术

康伟超 王 丽 主编
张 怡 巫显会 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要介绍了半导体硅材料常规电学参数的物理测试方法、检测晶体缺陷的化学腐蚀法、半导体晶体定向法、硅单晶中氧和碳含量的测定方法。本书还介绍了多晶硅中基硼、基磷含量的检验方法、纯水的制备及高纯分析方法。

为了确保测试数据的准确性，对硅材料常规物理参数测试的测准条件作了详细的分析介绍。对先进的测试技术作了一般的介绍。本书是硅材料技术专业的核心教材。

本书可作为高职高专太阳能光伏产业硅材料技术专业的教材，同时也可作为中专、技校和从事单晶硅生产的企业员工的培训教材，还可供相关专业工程技术人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

硅材料检测技术/康伟超, 王丽主编. —北京: 化学工业出版社, 2009.7
太阳能光伏产业——硅材料系列教材
ISBN 978-7-122-05568-2

I. 硅… II. ①康…②王… III. 半导体材料-硅-检测-教材 IV. TN304.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 069932 号

责任编辑: 张建茹

文字编辑: 廉 静

责任校对: 宋 玮

装帧设计: 郑小红

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 9½ 字数 213 千字 2009 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 27.00 元

版权所有 违者必究

太阳能光伏产业——硅材料系列教材 编审委员会

主任：陈元进

副主任：周应胜

委员：（按汉语拼音排序）

陈元进 邓 丰 邓永智 何 燕 黄刚娅

黄 玫 黄有志 康伟超 乐栋贤 李志伟

刘 斌 刘秀琼 潘家平 唐正林 王 丽

王晓忠 巫显会 徐筱跃 杨 岍 易正义

尹建华 张和平 张 怡 周应胜

前 言

目前世界光伏产业以 31.2% 的年平均增长率高速发展, 位于全球能源发电市场增长率的首位, 预计到 2030 年光伏发电将占世界发电总量的 30% 以上, 到 2050 年光伏发电将成为全球重要的能源支柱产业。各国根据这一趋势, 纷纷出台有力政策或制订发展计划, 使光伏市场呈现出蓬勃发展的格局。目前, 中国已经有各种光伏企业超过 1000 家, 中国已成为继日本、欧洲之后的太阳能电池生产大国。2008 年, 可以说是中国光伏材料产业里程碑式的一年。由光伏产业热潮催生了上游原料企业的遍地开花。一批新兴光伏企业不断扩产, 各地多晶硅、单晶硅项目纷纷上马, 使得中国光伏产业呈现出繁华景象。

发展太阳能光伏产业, 人才是实现产业可持续发展的关键。硅材料和光伏产业的快速发展与人才培养相对滞后的矛盾, 造成了越来越多的硅材料及光伏生产企业人力资源的紧张; 人才培养的基础是课程, 而教材对支撑课程质量举足轻重。作为新开设的专业, 没有现成的配套教材可资借鉴和参考, 编委会根据硅技术专业岗位群的需要, 依托多家硅材料企业, 聘请企业的工程技术专家开发和编写出了硅材料和光伏行业的系列教材。

本系列教材以光伏材料的主产业链为主线, 涉及硅材料基础、硅材料的检测、多晶硅的生产、晶体硅的制取、硅片的加工与检测、光伏材料的生产设备、太阳能电池的生产技术、太阳能组件的生产技术等。

本系列教材在编写中, 理论知识方面以够用实用为原则, 浅显易懂, 侧重实践技能的操作。

本书主要讲述了半导体硅材料各项性能参数的测试原理和方法, 对具体仪器的操作及步骤作了详细介绍。本书集编者从事半导体物理测试数十年的工作经验, 并参照了有关文献资料编写了此书。在编写过程中, 编者对某些内容作了适当的调整和补充, 以使本书更适合作为半导体硅物理测试的教材。

本书可作为高职高专太阳能光伏产业硅材料技术专业学生的教材, 同时可作为企业对员工的岗位培训教材, 也可作为相关专业的工程技术人员参考学习。

本书由康伟超、王丽主编; 参加编写的人员还有杨妍、邓丰、唐正林; 本书由张怡、巫显会主审。参加审稿的老师提出了许多宝贵意见和建议, 在此表示衷心的感谢。

教材的开发是一个循序渐进的过程, 本系列教材只是一个起步, 在编写过程中可能存在不足之处, 诚请社会各界批评指正, 编委们将在今后的工作中不断修改和完善。我们相信, 本系列教材的出版发行, 将促进我国硅材料及光伏事业的进一步发展。

教材编写编委会

2009 年 3 月

目 录

第 1 章 硅单晶常规电学参数的物理测试	1
1.1 半导体硅单晶导电类型的测量	1
1.2 半导体硅单晶电阻率的测量	7
1.3 非平衡少数载流子寿命的测量	19
本章小结	37
习题	37
第 2 章 化学腐蚀法检测晶体缺陷	38
2.1 半导体晶体的电化学腐蚀机理及常用腐蚀剂	38
2.2 半导体单晶中的缺陷	42
2.3 硅单晶中位错的检测	49
2.4 硅单晶中漩涡缺陷的检测	55
2.5 化学工艺中的安全知识	61
2.6 金相显微镜简介	62
本章小结	63
习题	64
第 3 章 半导体晶体定向	65
3.1 晶体取向的表示方法	65
3.2 光图定向	72
3.3 X 射线定向	76
本章小结	88
习题	88
第 4 章 红外吸收法测定硅单晶中的氧和碳的含量、多晶硅中基硼、基磷含量的 检验	89
4.1 测量原理	89
4.2 测试工艺和方法	93
4.3 测准条件分析	95
4.4 多晶硅中基硼、基磷含量的检验	97
本章小结	99
习题	100
第 5 章 纯水的检测	101
5.1 纯水在半导体生产中的应用	101
5.2 离子交换法制备纯水的原理	102
5.3 离子交换法制备纯水	105
5.4 纯水制备系统主要设备及工作原理	107

5.5 纯水制备系统运行控制	115
5.6 纯水制备系统的清洗	116
5.7 高纯水的检测	119
本章小结	121
习题	121
第6章 高纯分析方法	122
6.1 三氯氢硅中痕量杂质的化学光谱测定	122
6.2 三氯氢硅(四氯化硅)中硼的分析	124
6.3 三氯氢硅(四氯化硅)中痕量磷的气相色谱测定	126
6.4 工业硅中铁、铝含量的测定	128
6.5 露点法测定气体中的水分	131
6.6 气相色谱法测定干法 H ₂ 的组分	133
6.7 氯化氢中水分的测定	136
6.8 液氯中水分的测定	137
本章小结	138
习题	138
第7章 其他物理检测仪器简介	139
7.1 X射线形貌技术	139
7.2 质谱分析	140
7.3 中子活化分析	141
7.4 电子显微镜	142
参考文献	144

..... 第 1 章 硅单晶常规电学 参数的物理测试

学习 目标

1. 掌握：冷热探笔法测试硅单晶导电类型以及测试原理和操作步骤；四探针法测试硅单晶电阻率的原理及操作步骤；高频光电导衰退法测试硅单晶的非平衡少数寿命的测试原理及操作步骤。
2. 理解：硅单晶导电类型、多数载流子、少数载流子、非平衡少数载流子寿命等参数的概念。
3. 了解：其他测试硅单晶电学参数的方法；影响测试硅单晶导电类型、电阻率、非平衡少数寿命准确度的因素及误差分析。

1.1 半导体硅单晶导电类型的测量

硅单晶的导电类型是一个重要的基本电学参数。根据单晶制备时所掺杂的元素，它们是三价的还是五价的，可以将单晶划分为 P 型和 N 型两大类。P 型单晶中多数载流子是空穴，它主要依靠空穴来导电；N 型单晶中多数载流子是电子，它主要依靠电子来导电；因此 P 型半导体又可称为空穴半导体；N 型半导体又可称为电子半导体。

半导体器件厂就是用一定型号的单晶来生产出所需要的半导体元件。通过一定的器件工艺可以生产出二极管 (P-N)、三极管 (N-P-N 或 P-N-P)、可控硅 (P-N-P-N) 和集成电路等。因此硅单晶导电类型的测量为制作半导体器件提供原始依据，并且是关系到器件效能的重要参数。

目前国内外导电类型的测量有两个类别：

- ① 温差电动势法；
- ② 整流效应法。

具体的方法有以下几种：

- ① 冷热探笔法；
- ② 三探针法；

- ③ 单探针点接触整流法；
- ④ 冷探笔法；
- ⑤ 四探针法。

本书主要介绍冷热探笔法和三探针法。现将这两种方法的基本原理和适用场合介绍于下。

1.1.1 测试方法及其基本原理

(1) 冷热探笔法

如图 1-1 所示，在一块单晶样品上压上两根金属探笔，一根探笔的温度是室温（冷探笔），另一个是热探笔，用电阻丝加热。探笔的材料用一般的不锈钢即可。探笔头部应成为大约 60° 的圆锥形。热探笔上所用的电阻丝的功率一般只需 $10\sim 15\text{W}$ ，电热丝和热探笔本体之间要有良好的电绝缘。热探笔的温度保持在 $40\sim 60^\circ\text{C}$ 。当两根探笔与半导体材料相接触之后，半导体的两个接触点之间产生温度差。如果两根探笔之间接上检流计构成闭合回路，就会发现检流计的指示光点会朝某一个方向偏转，表示回路中出现一定方向的电流，这一电流就是温差电流。下面定性解释半导体中温差电流的产生。

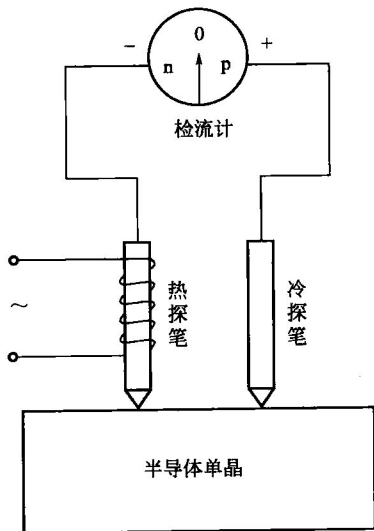


图 1-1 冷热探笔法测导电类型

导电类型的测量都是在室温下进行的，在讨论导电类型时，只需考虑常温范围内的温差电现象。根据半导体的基本性质，在包括室温在内的常温范围内，一般半导体属于杂质导电，这时，杂质能级

可以认为全部是电离的，多数载流子的浓度基本上与掺杂杂质的浓度相等，少数载流子的浓度远远小于多数载流子的浓度。所以，在与室温探笔和热探笔相接触的两部分半导体体内载流子的浓度是相同的。但其热运动速度不相同。假设样品为 P 型材料，冷探笔（室温探笔）的温度为 T_1 ，热探笔的温度为 T_2 ，如图 1-2 所示。载流子的热运动速度与温度有关，热区的空穴热运动速度大，冷区的空穴热运动速度小。因此，热端向冷端运动的空穴将比相反方向运动的空穴多，这样产生了空穴热运动的扩散流。热运动扩散流把一部分空穴从热端带到冷端，于是热端空穴比平衡浓度低，而冷端则出现多余的空穴。其结果形成了冷热两端电荷的积累，热端缺乏电荷带负电，冷端积累了电荷带正电。于是，在冷热两端之间建立起电场，电场的方向从冷端指向热端。随着热运动扩散流的进行，电荷积

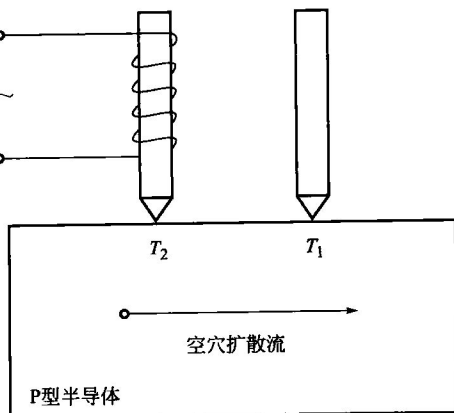


图 1-2 P 型半导体中空穴在温度不同的两个区域间的扩散流的方向

累越来越多，于是，电场越来越强。而电场的作用又阻止热运动扩散流的进行。最后当电场大到一定的程度后，空穴的扩散与电场作用下的漂移趋于平衡，这时在冷端和热端之间就得到一个稳定的电势差，称之为温差电动势。

如果在图 1-2 的冷探笔和热探笔之间接上一个检流计，就成了图 1-3 的情况。由于温差电动势的存在，检流计的指示就会向某个方向偏转。P 型半导体和 N 型半导体中产生的温差电动势的方向是相反的，对于 P 型半导体，从上面的讨论可以知道，空穴扩散流的方向是从热端到冷端，电场的方向是从冷端指向热端，冷端带正电，热端带负电。检流计中电流的方向是从冷端流向热端的。而对于 N 型半导体，电子是多数载流子。用同样的分析可以得知，电子热运动扩散流的方向也是从热端到冷端，但由于电子带负电，电荷积累的结果是热端带正电，冷端带负电，电场的方向从热端指向冷端，检流计中电流的方向是从热端流向冷端的，与 P 型半导体的情况相反。可见，使用冷热探笔法，根据温差电动势和温差电流在两种不同导电类型的半导体材料中不同的方向，可以判断出它的导电类型。

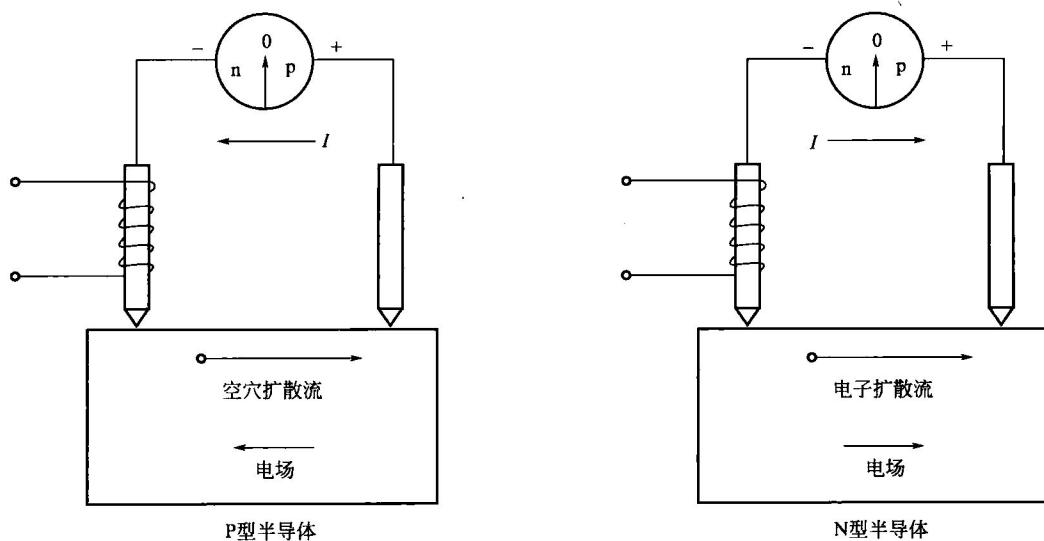


图 1-3 P 型和 N 型材料产生不同的温差电流

(2) 三探针法

三探针法测半导体导电类型的方法原理图如图 1-4，在样品上压上三个探针，针距在 0.15~1.5mm 的范围内。在探针 1 和探针 2 之间通过限流电阻 R_1 、 R_2 接上 6~24V（典型为 12V）的交流电源，在探针 2 和探针 3 之间接检流计。根据检流计指示偏转的方向就可以判断半导体样品是 P 型还是 N 型。

假定样品为 N 型半导体。探针与半导体构成整流接触，可用图 1-5 来等效，其中每一个整流接触都用一个二极管和一个接触电阻（扩展电阻）的串联电路来等效； VD_1 、 VD_2 和 VD_3 分别是探针 1、探针 2 和探针 3 与 N 型半导体接触时的等效二极管， r_1 、 r_2 和 r_3 分别是探针 1、探针 2 和探针 3 与半导体的接触电阻。

首先分析探针 1 和探针 2 回路的电流、电压波形。把探针 1 和探针 2 部分单独拿出来，如图 1-6(a) 所示。

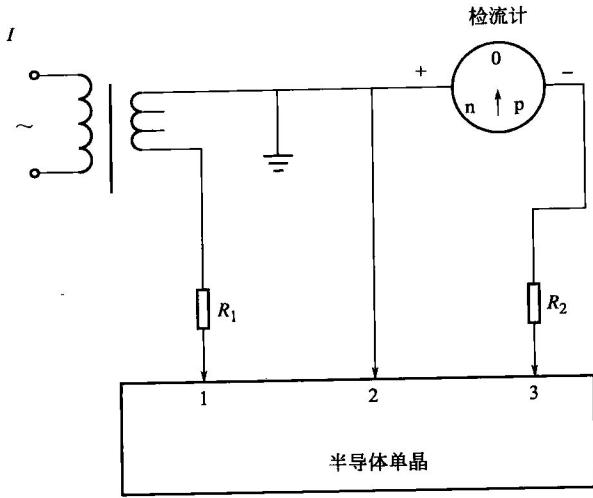


图 1-4 三探针法测导电类型

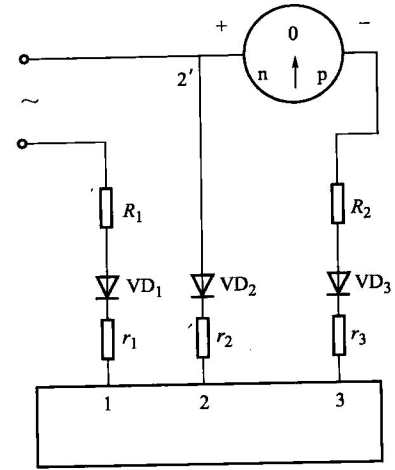
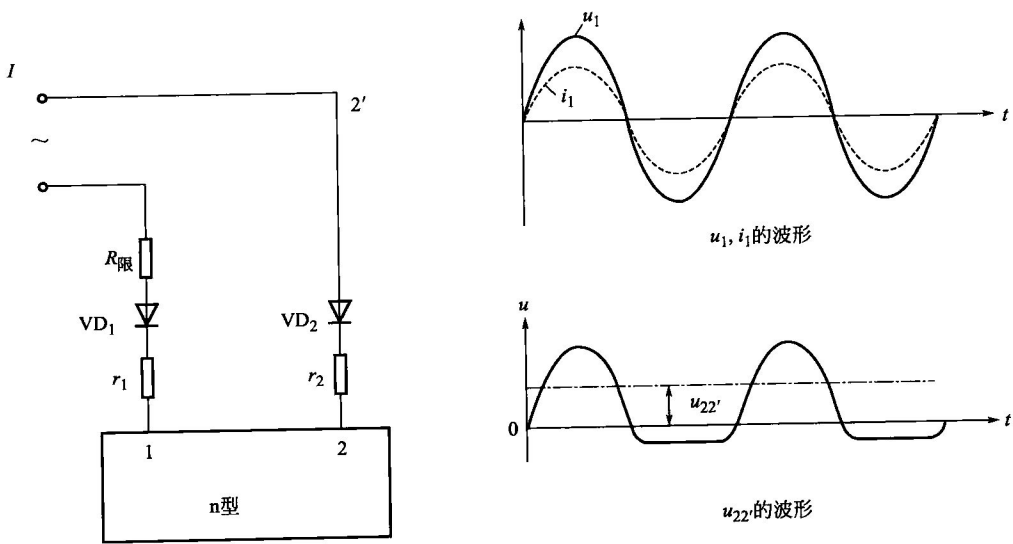


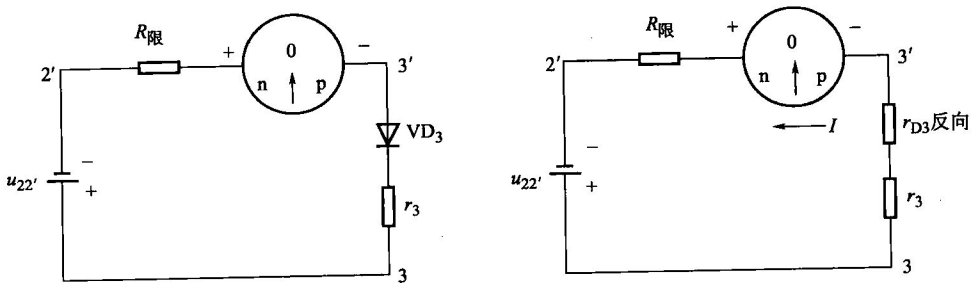
图 1-5 三探针法的等效电路



(a)

 $u_{22'}$ 的波形

(b)



(c)

图 1-6 三探针等效电路

假设外加电压 u_1 的波形如图 1-6(b) 所示, 因为电路是纯电阻电路, 所以电流 I_1 的波形与电压 u_1 的波形同相。当 u_1 为正半周时, VD_2 中的电流方向为 $2 \rightarrow 2'$; 当 u_1 为负半周时, VD_2 中的电流方向为 $2' \rightarrow 2$ 。

当电流方向为 $2 \rightarrow 2'$ 时, 在 VD_2 上所产生的电压为 $u_{22'} = I_1 (r_{VD_2 \text{ 反向}}) \times r_2$, 式中 $r_{VD_2 \text{ 反向}}$ 为二极管 VD_2 反向偏置时的电阻。当电流方向为 $2' \rightarrow 2$ 时, 在 VD_2 上所产生的电压为 $u_{2'2} = I_1 (r_{VD_2 \text{ 正向}} + r_2)$, 式中 $r_{VD_2 \text{ 正向}}$ 是二极管 VD_2 的正向偏置时的电阻。由于 $r_{VD_2 \text{ 反向}} \gg r_{VD_2 \text{ 正向}}$, 所以 $u_{22'} \gg u_{2'2}$ 。结果波形如图 1-6(b) 所示, 它的直流分量 $u_{22'} > 0$ 。把 $u_{22'}$ 用电池的电动势代替, 再和 $2'$ 、 3 支路合在一起画成等效电路如图 1-6(c) 所示。从图上可以看出检流计中电流的方向是由 $3' \rightarrow 2'$, 检流计指示向 N 型偏转。

对于 P 型材料, 用同样道理分析, 可以得出电压的直流分量 $u_{2'2} < 0$, 检流计中的电流是从 $2' \rightarrow 3'$, 指示向 P 型偏转, 从而可以根据检流计中指示偏转的方向来确定所测样品的导电类型。

1.1.2 两种方法的比较及其适用场合

从上面所述的两种方法中, 冷热探笔法属于利用半导体的温差电效应来测量导电类型的方法, 三探针法属于利用整流效应的方法。

冷热探笔法是目前国内最常用的判断半导体导电类型的方法。理论计算说明温差电动势的大小随着掺杂浓度的减小而增大, 即样品的电阻率越高, 温差电动势越大。但另一方面, 高阻样品的电阻很大, 尽管电动势大了, 温差电流却随着电阻率的增高而减小。所以, 冷热探笔法主要适用电阻率不太高的样品, 对低阻样品很灵敏, 一般认为适用于室温电阻率在 $1000 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下的单晶。但是有的厂家将样品进行喷砂处理也可以测量几千 $\Omega \cdot \text{cm}$ 的硅单晶。

利用金属与半导体的点接触整流原理来测量导电类型的方法, 对于低阻单晶往往是不适合的, 这是因为金属与低阻单晶常常构成欧姆接触。一般认为这种方法适用于室温电阻率在 $1 \sim 1000 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间的硅单晶。

1.1.3 测准条件的分析

前面已经讲到, 怎样测准硅单晶的型号是一个很重要的问题, 它是制作半导体器件的原始依据。每一种测量导电类型的方法都有自己一定的适用范围, 离开这些范围测量型号就有可能发生差错。因此首先应注意单晶电阻率的大致范围, 然后再选定一种测量型号的方法。

无论用哪种方法, 都要注意单晶样品的表面效应, 特别是利用整流效应的方法, 因为在这种方法中, 主要测出的就是点接触处表面的导电类型。要求表面无反型层、无氧化层、清洁无油污。通常要对表面进行喷砂处理或进行研磨处理, 不要用经过腐蚀、抛光处理或未经处理的原始表面。半导体表面对外界十分敏感, 经过化学腐蚀处理的样品容易沾上正、负离子, 使半导体表面感应出反型层, 从而造成测量的错误。用冷热探笔法测量导电类型时, 热探笔的温度要适当, 以 $40 \sim 60^\circ\text{C}$ 为宜。热探笔温度不能过高, 否则对某些高阻硅材料在热探笔附近会造成本征激发。当本征激发产生的载流子接近或超过杂质电离产生的载流子时, 由于电子的扩散速度比空穴的大, 电子比空穴向冷端扩

散的多,造成热端缺乏电子带正电,冷端积累电子带负电,于是显示出N型半导体的特征。如果本是一块P型高阻材料,这时就误判成N型材料了。另外为了保证测量的准确性,在测量时要不断交换冷热探笔的位置进行测量。

在采用整流效应的三探针法时,构成整流特性的金属-半导体接触压力要小,一般用几克力就足够了。因为探针尖端很细,接触半径一般不大于 $50\mu\text{m}$,用力稍大一点就引起很大的压强,从而破坏了其整流特性,样品的导电类型就测不出来。还要注意在测量时,不用手或别的东西接触晶体,避免由于干扰信号的作用造成错判。在三探针法中,要注意使交流电源对晶体的加热作用足够小,因为加热作用产生的温差电动势引起检流计指示偏转的方向与整流作用引起检流计指示偏转方向相反,起抵消作用。如果加热作用过大,可能会引起错判。

半导体表面对周围电磁场很敏感,在周围电场的作用下,甚至出现表面反型层,应进行电磁屏蔽,避免外界电磁辐射的干扰。探针附近的光照,能引起光生电动势,从而在检流计中通过光生电流,这种光生电流对导电类型的测量也有干扰,因此要注意避免用强光照射。

1.1.4 硅单晶导电类型作业指导书

(1) 冷热探笔法

① 方法原理 温差电动势、温差电流法。

② 仪器设备 GXS单晶型号测试仪、冷热探笔、P型单晶样品、N型单晶样品。

③ 操作步骤

• 接通GXS单晶型号鉴别仪电源,指示灯亮。

• 接通热探笔加热器电源,热探笔温度升高到 60°C 时,停止加热。

• 将“0”检查按钮按下,并转动“调零旋钮”,使电表指示在中间零的位置。

• 将“零检查”按钮释放,处于测量位置。

• 根据被测材料电阻率范围选择测量方法:

电阻率在 $1000\Omega\cdot\text{cm}$ 以下时,选用冷热探笔法;

电阻率在 $1\sim 1000\Omega\cdot\text{cm}$ 时,选用整流法(也可用冷热探笔法)。

• 检查被测表面是否符合干燥、无油污、砂粒、喷砂均匀等要求,若不符合要求,表面应重新处理。

• 测量前用已知N型或P型的样块检查测量系统是否处于正常状态。

• 用冷热探笔法测量时,将测量选择置于“温差法”挡,两手分别拿冷探笔和热探笔,并将探笔紧压在已喷砂的被测面上,观看P、N型号的指示灯来判断型号,测量时必须逐段交换冷热探笔位置,以避免两探笔下两点之间有不同的导电型号。

• 操作完毕,应立即关闭热探笔加热器电源和型号测试仪器电源。

(2) 三探针法

① 方法原理 整流效应原理。

② 仪器设备 GXS单晶型号测试仪、探针、P型单晶样品、N型单晶样品。

③ 操作步骤

• 接通GXS单晶型号鉴别仪电源,指示灯亮。

- 将“0”检查按钮按下，并转动“调零旋钮”，使电表指示在中间零的位置。
- 将“零检查”按钮释放，处于测量位置。
- 根据被测材料电阻率范围选择测量方法：
 - 电阻率在 $1000\Omega \cdot \text{cm}$ 以下时，选用冷热探笔法；
 - 电阻率在 $1 \sim 1000\Omega \cdot \text{cm}$ 时，用整流法（也可用冷热探笔法）。
- 检查被测表面是否符合干燥、无油污、砂粒、喷砂均匀等要求，若不符合要求，表面应重新处理。
 - 将测量位置选择置于“整流法”挡，将三探针轻压在已喷砂的被测面上，观察P、N型号指示灯，即可确定材料的导电型号。三探针应同时接触材料，压力不可过大。
 - 将测量结果清晰、准确地标注在被测晶体上。
 - 在报告单上正确填写导电型号、测量方法和测量者，并画上晶体图形，当晶体长度超过报告单尺寸时，应画示意图表示。
 - 操作完毕，应立即关闭型号测试仪器电源。

1.2 半导体硅单晶电阻率的测量

硅单晶的电阻率与半导体器件有密切的关系，例如晶体管的击穿电压就直接与单晶的电阻率有关。根据器件的种类、制作工艺与技术的不同，对制造器件的硅单晶电阻率提出了一定的要求。电阻率测量是硅单晶常规物理参数测量项目之一。

1.2.1 电阻率测量的基本方法

电阻率是半导体单晶重要电学参数之一，它反映了补偿后的杂质浓度，与半导体中的载流子浓度有直接关系。例如，N型材料的室温电阻率可以表示如下

$$\rho = \frac{1}{(N_D - N_A) \mu_n q} \quad (1-1)$$

式中 N_D ——施主杂质浓度；
 N_A ——受主杂质浓度；
 μ_n ——电子迁移率；
 q ——电子电荷量。

半导体单晶电阻率的测量，按照测量仪器的测试探头与被测半导体单晶接触性质来分，可以分为接触法和无接触法两大类。对于半导体单晶电阻率的测量，主要用接触法。用接触法测量电阻率的方法主要有如下几种：

- ① 两探针法；
- ② 四探针法；
- ③ 扩展电阻法；
- ④ 范德堡法。

本节只讨论前两种方法。在这两种方法中，目前国内外广泛采用四探针法，因为它简便易行，适用性强，又有足够的测试精度，适用于成批生产中的测量。

由电学知识可知，对于一般的金属材料电阻，可以通过测量流过电阻的电流 I 以及

两端的电压 U 的大小, 然后根据样品的尺寸计算出样品的电阻率, 如图 1-7 所示。

$$\rho = \frac{US}{IL} \quad (1-2)$$

式中 S ——样品的截面积;
 L ——样品的长度。

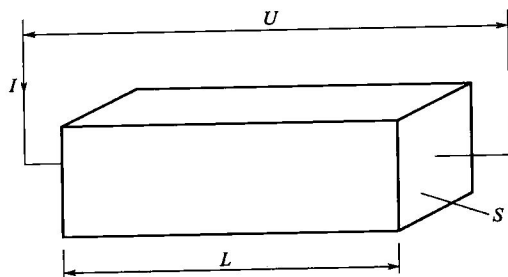


图 1-7 测量导体电阻率的方法

上面测量金属电阻率的方法应用到半导体样品上是不适用的, 因为金属与半导体相接触的地方有很大的接触电阻。用接触法测量半导体单晶的电阻率时, 会遇到测电压的金属探针与半导体接触的问题。实际上用电压表测出的电压 $u_{表}$ 是接触电阻上的电压降 u_c 和半导体体电阻上电压降 u_b 之和, 前者往往远远的超过后者, 因此电压表所测量出的电压不能代表真正的体内压降。可以用图 1-8 来等效这种情况。

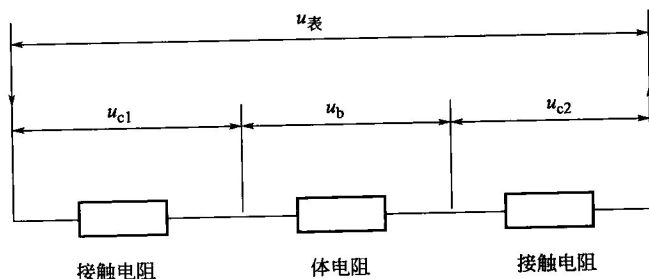


图 1-8 用图 1-7 的方法测半导体电阻率时出现接触电阻

从图 1-8 可得

$$u_{表} = u_{c1} + u_{c2} + u_b = u_c + u_b$$

因为 $u_c \gg u_b$

所以 $u_{表} \gg u_b$

只能用体电阻上的压降 u_b 才能计算出半导体样品的电阻率, 如果用 $u_{表}$ 来计算样品的电阻率, 结果就要偏高很多。所以不能用图 1-8 所示的办法直接测量半导体的电阻率, 在测量中必须抵消或避免接触电阻引起的困难。两探针和四探针法就是基于以上的考虑而提出的测量半导体样品电阻率的方法。

(1) 两探针法

两探针法可以用图 1-9 来说明。样品两端接直流电源, 要求引出线与样品之间保持欧姆接触特性。样品要求是长条形的或棒状的, 横截面积能精确计算。把两根间距为 L

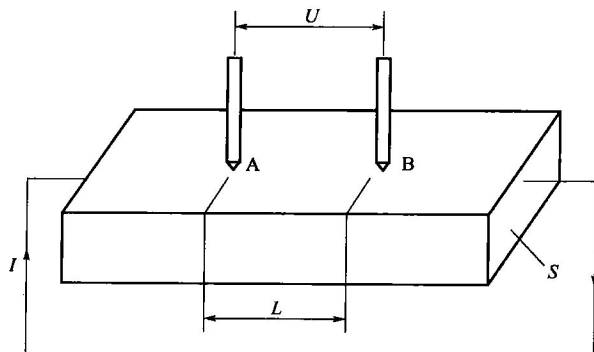


图 1-9 两探针法测量半导体样品电阻率

的金属探针紧压在样品表面上，探针排列的方向与通过样品的电流方向平行。探针接电位差计或高输入阻抗的电压表。假设被测样品的截面积为 S (cm^2)， L 的单位为 cm ，流过样品的电流为 I (mA)，如果电位差计测出两探针之间的电压降为 U (mV)，那么样品的电阻率可以用下式表示

$$\rho = \frac{US}{IL} \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (1-3)$$

式(1-3)和式(1-2)完全相同，原理也相同，都利用电学中的欧姆定律的基本关系导出。图1-8中的两端引线有两个作用，既作为接电流的引线，又可接电压表测电压。在图1-9中，把两个作用分开，两端引线只作为接通电流之用，另用一对探针压在样品表面上测量电压降。现在测出的电压降不是整个样品两端的电压降，而是这两根探针所在的两垂直于电流方向的横截面之间的电压降。这时两根探针与半导体样品之间的接触电阻仍然存在，但由于应用了电位差计，避免了接触电阻引起的问题。下面说明这一点。

在图1-10(a)中，设流过样品的电流为 I ，探针A和探针B压在样品上，探针接电位差计。设电位差计测出的电压降为 U ，另外还设探针A和探针B所在的两个截面之间的体电阻为 R_b ，探针A和探针B与样品的接触电阻分别为 r_1 和 r_2 ，电位差计的输入电阻为 r 。于是可以得到等效电路如图1-10(b)。由于外电路的分流作用，样品中的电流在流过探针A所在的截面后，分别为 I_1 和 I_2 ， I_1 继续通过样品， I_2 分流到外电

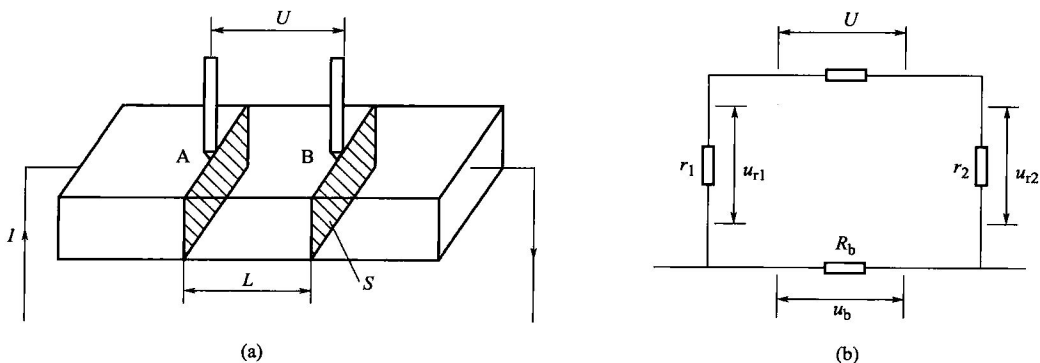


图 1-10 两探针法测量原理及其等效电路

路中，并且

$$I = I_1 + I_2 \quad (1-4)$$

从图 1-10 可以得到：

$$u_{r1} + U + u_{r2} = u_b \quad (1-5)$$

电位差计测出的电压 U 为

$$U = u_b - (u_{r1} + u_{r2}) = u_b - I_2(r_1 + r_2)$$

用电位差计测电压降的特点是：当电位差计处于平衡的时候，流经电位差计被测电路接线端的电流为零，即

$$I_2 = 0 \quad (1-6)$$

所以

$$U = u_b \quad (1-7)$$

不管探针与半导体之间的接触电阻有多大，用电位差计测出的仍是降落在真实电阻上的电压降，与接触电阻无关。由于这一特点，在早期的测半导体材料电阻率的仪器中，普遍采用电位差计。现在电位差计已被其他各种高输入阻抗的电压表代替，如静电计和高输入阻抗的数字电压表，特别是后者。静电计的输入阻抗非常高，例如振簧式静电计的输入阻抗可达 $10^{12} \Omega$ 。而数字电压表输入阻抗达到 $100 M\Omega$ 甚至 $1000 M\Omega$ 在目前已成问题。

为了使测量准确起见，探针头的接触半径应保持在 $25 \mu\text{m}$ 左右；样品表面要经过喷砂或研磨处理；通电流的两个端面接触应为欧姆接触，为此可镀镍、镀铜或用超声焊接；样品电流不宜太大，应保证样品中电场强度不大于 1V/cm ，测低阻单晶时，更应注意用尽量小的电流，避免电流的热效应。

两探针法测量电阻率是很精确的，多半用在研究工作中。此种方法适用于电阻率在 $10^{-4} \sim 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间的半导体单晶材料。

(2) 四探针法

四探针法用针距约为 1mm 的四根探针同时压在样品的平整表面上，如图 1-11 所示，利用恒流源给外面的两根探针通以电流，然后在中间两根探针上用电位差计或其他高输入阻抗的电压表测量电压降，再根据下面的公式计算出样品的电阻率

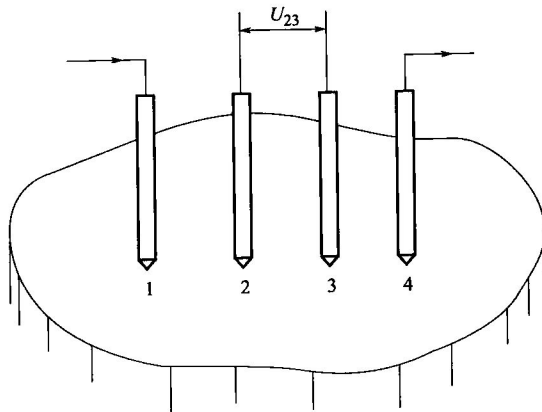


图 1-11 四探针法测量半导体样品电阻率