

半导体测试技术

孙以材 编著

冶金工业出版社

半 导 体 测 试 技 术

孙 以 材 编 著

冶 金 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书内容除包括半导体材料的导电型号、电阻率、少子寿命、晶体原生缺陷和二次缺陷以及外延片等的常规测试技术之外,还包括与霍尔效应、红外光吸收有关的测试方法和原理。对X射线形貌和电子衍射、衍衬像理论和应用以及近几年发展的C-V测试瞬态电容技术也作了阐述。最后扼要介绍了半导体超纯领域中应用的几种重要痕量分析方法。书中所用单位和公式一般为国际制单位和相应公式。本书可作硅、锗、砷化镓半导体材料与器件制造的工程技术人员、研究人员参考用书,也可作高等学校半导体材料专业试用教材。

半 导 体 测 试 技 术

孙 以 材 编 著

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 31 3/4 字数 761 千字

1984年10月第一版 1984年10月第一次印刷

印数00,001~7,000册

统一书号: 15062·4019 定价4.85元

前 言

本书所述内容基本上是目前半导体材料领域中比较广泛使用的方法和测试项目。除了介绍初始半导体材料的测试技术外，还介绍了半导体器件制作过程中与材料有关性质和参数的测试技术。本书所涉及的测试项目和方法，大多是参照我国国家标准编写的，但有时也涉及美国材料试验协会（ASTM）标准。因为各个测试标准都把重点放在测试技术上，理论解释甚为欠缺，为弥补这一不足，本书给予较多的基本原理阐述。

本书可供具有大专文化水平的工程技术人员和大专院校师生使用。具有中等文化水平的同志也能看懂常规测试部分。虽然个别地方涉及到较深的理论概念，但无碍于理解有关内容。

由于编者才识浅薄，且半导体测试技术涉及到固体物理学中衍射物理学、半导体光学、半导体统计学、晶体缺陷动力学、群论、晶格动力学等专门知识，所述内容难免有谬误之处，敬请半导体领域工作的同志们批评指正。

本书是在中国有色金属总公司的关怀下编写的。在半导体材料领域工作的许多同志也给予多方协助和鼓励，提供了宝贵的论文、图片、资料。这些同志，除在参考文献中所引论文的作者外，还有孙膺九、郭维廉、徐冬良、王殿儒、孙毅之、薛绍仁、李光平、张又立、蔡田海、孙伯康、张一心、蒋伯林、麦振洪、冯仪、张镜容、王立安等同志和河北工学院刘锡安、刘王嶺、鞠玉林等同志。

本书最后由中国有色金属总公司峨嵋半导体材料研究所审定，参加审定的同志有：袁俊（组长）、徐冬良（组长）、孙冰璽、王殿儒、曹玉润、轩振国、李常佑、夏铁军、裘春妹、刘伯生、温铎民。北京钢铁学院的蒋伯林以及中国科学院半导体所的孙伯康同志也参加了本书的部分审定工作。对上述支持本书编写、提供资料及参加本书审定的有关同志，在此一并表示感谢。

编 者

目 录

第一章 半导体材料导电型号、电阻率、少数载流子寿命的测量	1
第一节 导电型号的测量	1
第二节 电阻率的测量	7
第三节 非平衡少数载流子寿命的测量	29
第二章 化学腐蚀—光学方法检测晶体缺陷和晶向	51
第一节 半导体晶体的电化学腐蚀机理及常用腐蚀剂	51
第二节 半导体晶体中的缺陷	62
第三节 硅单晶中生长缺陷的检测	76
第四节 硅半导体器件制作过程中二次导生缺陷的检测	85
第五节 硅单晶中漩涡缺陷的检测	91
第六节 砷化镓及其它Ⅲ-V族化合物半导体单晶中的缺陷检测	99
第七节 晶体生长的固液界面的显示	103
第八节 硅单晶的光点定向、定向切割与划片参考面的标定	106
第九节 半导体测试技术中常用光学显微镜	120
第三章 霍尔系数、迁移率和杂质补偿度的测量	133
第一节 霍尔系数和迁移率的测量	133
第二节 霍尔效应和磁阻法测量硅中杂质补偿度	148
第三节 砷化镓中总杂质浓度的测定	165
第四节 晶棒重熔法测定硅的补偿度	170
第五节 霍尔因子和磁阻系数统计理论	179
第四章 外延片的物理测试	184
第一节 层错法检测外延层厚度	184
第二节 红外干涉法测外延层厚度	189
第三节 硅外延层缺陷检验和质量分析	195
第四节 外延片夹层的测试	199
第五节 三探针电压击穿法测外延层电阻率	200
第六节 电容—电压法测硅外延层纵向杂质分布	206
第七节 二次谐波法测外延层杂质浓度	214
第五章 红外吸收光谱在半导体测试技术中的应用	221
第一节 半导体红外吸收光谱基本原理	221
第二节 红外吸收法测定硅单晶中氧、碳含量	240
第三节 利用等离子共振极小点测定半导体多数载流子浓度	252
第四节 红外傅里叶变换光谱分析及其应用	261
第六章 扫描电子显微镜及其在半导体测试技术中的应用	279
第一节 扫描电子显微镜结构和工作原理	279
第二节 操作模式和工作条件	285
第三节 成像衬度机制	289
第四节 在半导体测试技术中的应用	291

第五节	电子束通道效应·····	296
第七章	透射电子显微镜晶体缺陷分析·····	300
第一节	电子衍射和成像基本理论·····	300
第二节	堆垛层错的电子显微像·····	319
第三节	位错的电子显微像·····	330
第四节	晶体中沉淀相的电子显微像·····	341
第五节	成像参数的测定·····	347
第八章	X射线在半导体测试技术中的应用·····	353
第一节	X射线的性质及其产生·····	353
第二节	X射线在晶体中的衍射现象·····	356
第三节	X射线衍射法测定半导体单晶的取向·····	361
第四节	X射线衍射动力学理论概述·····	365
第五节	晶体缺陷的X射线显微像衬度·····	381
第六节	主要摄像法和影响分辨本领的因素·····	388
第七节	X射线显微术的应用·····	399
第九章	结电容和C-V测试技术·····	405
第一节	MOS结构及其C-V特性·····	405
第二节	C-V法测量半导体特性·····	418
第三节	测定绝缘薄膜性质·····	429
第四节	测定界面态密度·····	434
第五节	热激电容法测定深能级杂质的浓度和发射参数·····	436
第六节	椭圆偏振法测定薄膜厚度·····	444
第十章	半导体中痕量杂质分析·····	448
第一节	固体质谱分析·····	449
第二节	俄歇电子能谱分析·····	461
第三节	离子探针及其在半导体测试技术中的应用·····	475
第四节	高纯硅的活化分析·····	485
第五节	利用硅单晶的热处理效应测定氧含量·····	491
附录	·····	498
一、半导体的主要物理常数	·····	498
二、单位换算表	·····	498
三、重要半导体的物理性质	·····	499

第一章 半导体材料导电型号、电阻率、少数载流子寿命的测量

第一节 导电型号的测量

半导体单晶的导电型号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是受主还是施主元素，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。

半导体器件厂用一定型号的单晶来生产所需要的半导体器件。通过一定的器件工艺生产出二极管（p-n）、三极管（n-p-n或p-n-p）和集成电路等等。测量半导体导电类型可以为制作半导体器件提供原始依据。

目前，国内外测量导电型号主要有三种方法：

- 1) 冷热探针法；
- 2) 单探针点接触整流法；
- 3) 三探针法。

现将以上几种方法的基本原理和适用场合介绍如下：

一、测试方法及基本原理^[1,3]

1. 冷热探针法

冷热探针法是利用温差电效应来测量半导体的导电型号的，其中又可分为利用温差电流方向和温差电势极性两种测量方法，如图1-1所示。在单晶样品上压上两根金属探针（即探笔），一根热探笔（以用钨材质为宜）用电阻丝加热，电阻丝采用无感绕法，其间用云母绝缘；另一根冷探笔用不锈钢制成。每一根探笔头部都应成为60°圆锥。热探笔上所用

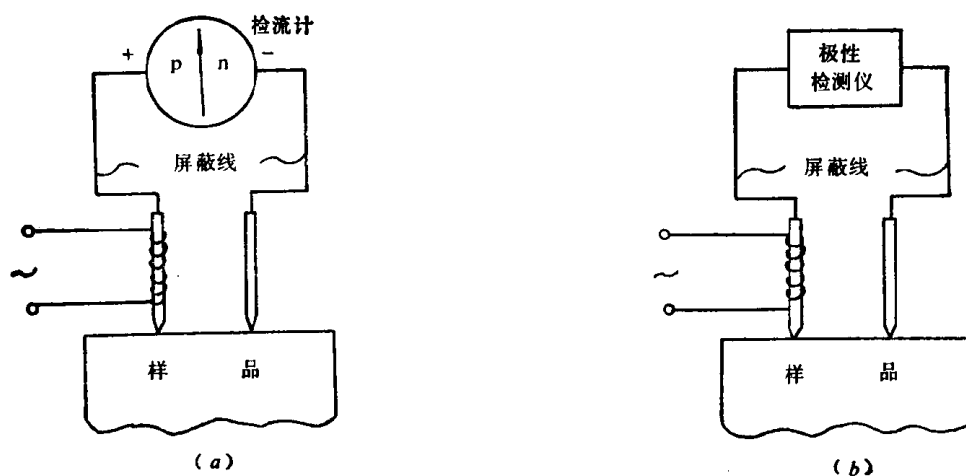


图 1-1 冷热探针法测导电类型
(a) 利用温差电流方法测量； (b) 利用温差电势极性测量

电阻丝的功率一般只需10~25瓦,使冷热探笔的温差保持30~40°C即可,而冷笔温度为室温。当冷热两根探针与半导体材料接触之后,两个接触点便产生了温差。如果将冷热探针接上检流计并使之构成一个闭合回路,就会发现检流计中的光点朝某一方向偏转,这表示回路中出现一定方向的电流,这一电流就是大家都熟知的温差电流。

半导体中温差电势和温差电流的产生,可以用能带理论解释。

假设样品为P型材料,冷热探针的温度分别为 T_1 、 T_2 ,并且设想不同温度的区域是相互隔离开的。每一个区域都可看成是热平衡的区域,这样便可以写出各自在热平衡时的费米能级:

$$\begin{aligned} E_{F_1} - E_V &= kT_1 \ln \frac{N_V}{N_A} \\ E_{F_2} - E_V &= kT_2 \ln \frac{N_V}{N_A} \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中, N_V 是价带有效状态密度, N_A 为P型材料的掺杂浓度。因为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,而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,这样产生了空穴的扩散流,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的浓度要低,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,热端缺乏空穴带负电,冷端积累了空穴带正电,于是冷热两端之间便产生了电势差,这种电势差称为温差电动势。由于冷热两端有了电势差,电势高的地方电子能量低;相反,电势低的地方电子能量高,这样半导体中的导带底和价带顶不再是两条水平线,而是两条平行的倾斜线,如图1-2所示。

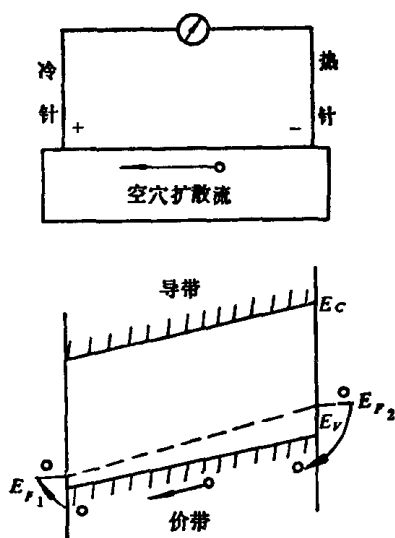


图 1-2 半导体中温度不同的两个区域能带发生倾斜及p型半导体中空穴的运动情况

因为费米能级的位置一方面与温度有关,另一方面与掺杂浓度有关,可以在图1-2所示的能带图中表示出半导体的费米能级。冷端的费米能级与 E_V 较接近一些,热端的费米能级与 E_V 则较远离一些。

冷热两端的费米能级的差别反映了空穴由热端扩散到冷端时,热源对空穴所作功的大小,从而提高了空穴的位能,表现在冷端的电势高于热端的电势,产生了温差电动势。

由理论可以推得P型样品的温差电动势 V_s 的大小与温度差成正比〔2〕:

$$V_s = \frac{k}{q} \left(\ln \frac{N_V}{N_A} + 2 \right) \Delta T \quad (1-2)$$

式中, k 为玻尔兹曼常数; q 为空穴的电荷量; N_V 为价带的有效状态密度; N_A 为P型样品掺杂浓度。以上是温差电动势大小的基本公式。对于n型样品则有以下式:

$$V_s = -\frac{k}{q} \left(\ln \frac{N_C}{N_D} + 2 \right) \Delta T \quad (1-3)$$

式中, N_C 为导带有效状态密度; N_D 为n型样品的施主杂质浓度。

图1-3示出了n型和p型样品中温差电动势产生的情形，由图可见，n型和p型半导体所产生的温差电动势的方向相反。p型样品，热端的空穴向冷端扩散，冷端带正电，热端带负电；而n型样品，电子为多数载流子，热端电子的热运动速度大，而冷端电子的热运动速度小，这样从冷热两端之间取某一截面来看，从热端到冷端的电子数比从冷端到热端的电子数多，出现从热端到冷端的电子扩散流。热端的电子比平衡电子浓度低，因此带正电，而冷端的电子比平衡电子浓度高，因此带负电。

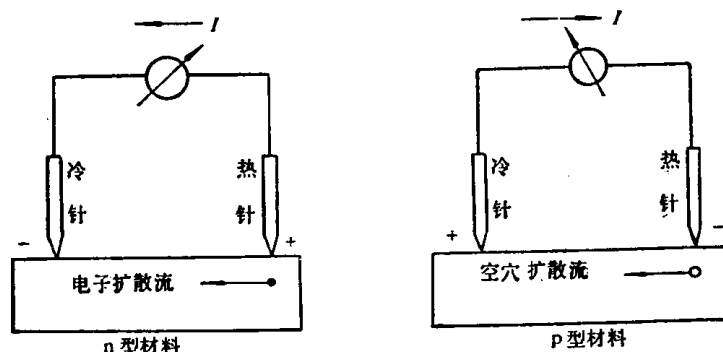


图 1-3 n型和p型材料产生不同极性的温差电动势的情况

由上可见，使用相同的冷热探笔，根据温差电势或温差电流的方向就可以判断半导体材料的导电型号。

2. 单探针点接触整流法

用点接触整流法测试单晶的导电型号所用的线路如图1-4所示。图1-4(a)所用方法只需一个检流计，依据检流计光点偏转的方向来判断单晶型号。图1-4(b)所示方法需要一个示波器，依据示波器所显示的图形来判断单晶导电型号。后一方法也可同时配合一个检流计，这样可以判断更正确些。

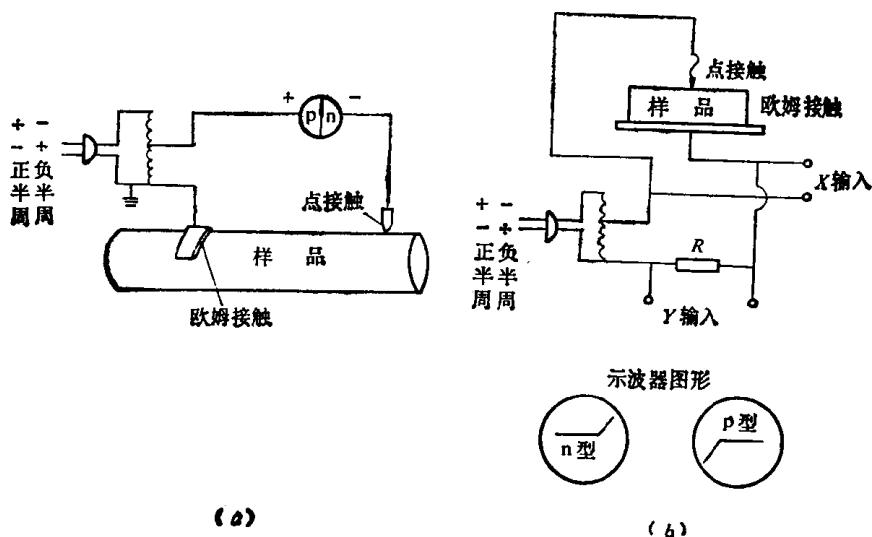


图 1-4 点接触整流法测导电类型

本测试方法的基本原理就在于利用金属与半导体接触时的整流特性。金属与半导体接触时，半导体的能带发生弯曲，构成多数载流子的势垒，形成阻挡层，此时就出现整流特性。如果势垒区很窄，载流子可依靠隧道效应从势垒底部通过，使整流特性破坏则为欧姆接触特性。

如用钨丝与P型半导体相接触，两者之间构成整流特性，称为肖特基结或肖特基二极管。在正向偏置时，空穴（多数载流子）就应该从P型半导体流入钨丝探针中。实际上，由于在半导体一边存在空穴的势垒，这时电流往往以电子从钨丝向P型半导体注入的方式出现，这叫少子注入。注入的少子（电子）往往在P型半导体边界上积累起来，使正向电流减少。通常将探针头制得很尖，以便增大少子的注入效应，因此称为点接触整流特性。与此相反，对于构成欧姆接触往往希望它是大面积高复合接触。

一般钨、金等均与半导体材料构成整流接触，而铅、镍等则与半导体材料构成欧姆接触。此外，n型硅与五价元素的合金（如Au-Sb、Au-As合金）和P型硅与三价元素的合金（如Au-Ga、In-Ga合金）均构成良好欧姆接触特性。

在图1-4(a)所示方法中，外加交流电源在正半周时，相当于探针接正，半导体接负。若所测样品为P型样品，则正半周无电流，而在负半周时，P型样品接正，探针接负，这是通流方向，检流计的光点向左偏转。正负半周电流平均的结果，检流计的光点仍向左偏转，从而确定所测样品是P型材料。若所测样品为n型样品，则正半周恰好是通流方向，而负半周无电流。正负半周平均的结果，检流计的光点向右偏转。

在图1-4(b)所示的方法中，在金属与半导体所构成的肖特基结两端取出电压信号，输入给示波器的水平X轴，因为所加信号是交流电，示波器上的光点沿着X轴扫描。若又在电阻R上取电流信号，输入给示波器的垂直Y轴，并假设所测半导体为n型样品，则正半

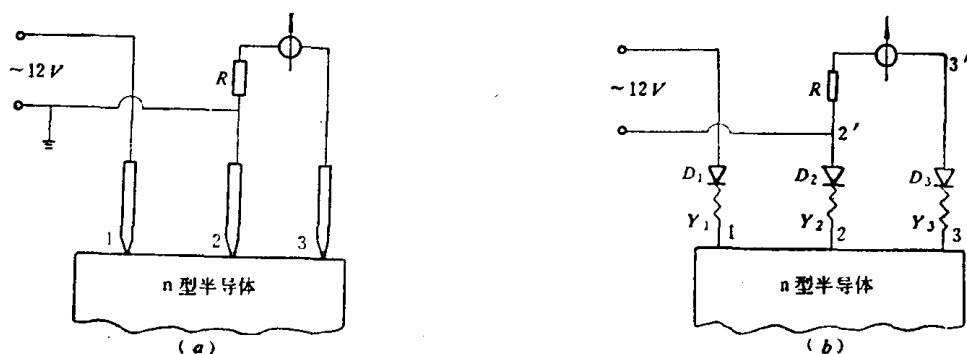


图 1-5 三探针法测量导电型号 (a) 及其等效电路 (b)

周（探针接正，样品接负）为通流方向，电阻R上有电流通过，示波器的光点应沿+Y轴扫描。而在负半周时，电阻R上无电流流过，示波器的光点不作-Y轴扫描。示波器的光点沿X轴和Y轴同步扫描的结果，合成后的扫描图形应呈“—”形状。同理，对于P型样品，正半周为阻流方向，而负半周为通流方向。示波器的光点沿X轴和Y轴同步扫描合成的图形应呈“—”形状。这样便可以依据示波器中所示的图形来确定被测样品的导电型号。

3. 三探针法

在一块样品上压上三个探针，针距约为1.5~5毫米，在1-2探针间接上12伏的交流电

源，在2-3探针上接检流计，如图1-5所示。根据检流计正向或负向偏转就可以判断样品是P型还是n型。

因为探针与半导体可以构成整流接触，故可用图1-5(b)来等效探针与半导体接触，该图是图1-5(a)的等效电路。接触电阻中包括势垒电阻和扩展电阻，前者可用二极管代替。

在探针与半导体之间点接触的情况下，由于电流截面在接触处附近最窄，所以体内电压降主要集中在接触点附近的区域，它的大小由接触的几何特性所决定。假定在欧姆定律成立的情况下，半导体体内的电压降 V 与由探针流入半导体的电流 I 之间具有如下关系：

$$V = I \cdot R$$

式中的 R 通常称为扩展电阻，由理论推得，当接触面是半径为 r_0 的半球面时，则扩展电阻

$$R = \rho_0 / 2\pi r_0$$

式中， ρ_0 为半导体的电阻率。

图1-5(b)中的 r_1 、 r_2 、 r_3 代表了探针与单晶接触时的扩展电阻， D_1 、 D_2 、 D_3 分别为探针1、2、3与n型单晶接触时的等效二极管。

现在先来分析1、2探针的整流电流和电压，把1、2探针单独拿出来分析，如图1-6所示。

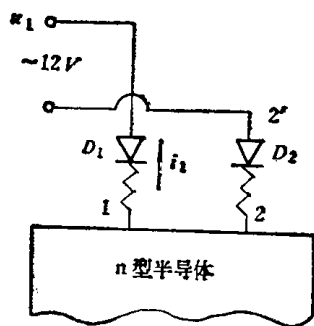


图 1-6 1、2探针等效电路分析

设外加电压 u_1 波形如图1-7(a)所示，因为电路属纯电阻电路，所以电流 i_1 波形与电压 u_1 波形同位相。当 u_1 为正半周时， D_2 中的电流方向为22'；当 u_1 为负半周时， D_2 中的电流方向为2'2。

当电流方向为22'时，在 D_2 上所产生的电压为

$$u_{22'} = i_1 (r_{D_2 \text{反向}} + r_2)$$

式中， $r_{D_2 \text{反向}}$ 为二极管 D_2 反向偏置时的电阻。

当电流方向为2'2时，在 D_2 上所产生的电压为

$$u_{2'2} = i_1 (r_{D_2 \text{正向}} + r_2)$$

式中， $r_{D_2 \text{正向}}$ 是二极管 D_2 正向偏置时的电阻。

由于 $r_{D_2 \text{反向}} \gg r_{D_2 \text{正向}}$ ，所以 $u_{22'} \gg u_{2'2}$ ，相叠加的结果如图1-7(b)所示。如果在电阻 R 上取出电压信号，那么就可在示波器上观察波形图。由上分析可知， $u_{22'}$ 的直流分量大于零。

把 $u_{22'}$ 用电池的电动势代替，再和3'、3支路合在一起画成等效电路图1-8。

从上图可以看出，检流计中电流的方向是由3'到2'，即光点向左偏转。

用同样道理分析P型材料， $u_{2'2}$ 具有负的直流分量，所以检流计中电流方向由2'到3'，

即光点向右偏转。从而可以根据检流计光点偏转的方向以及示波器的图形来确定所测样品的导电类型。

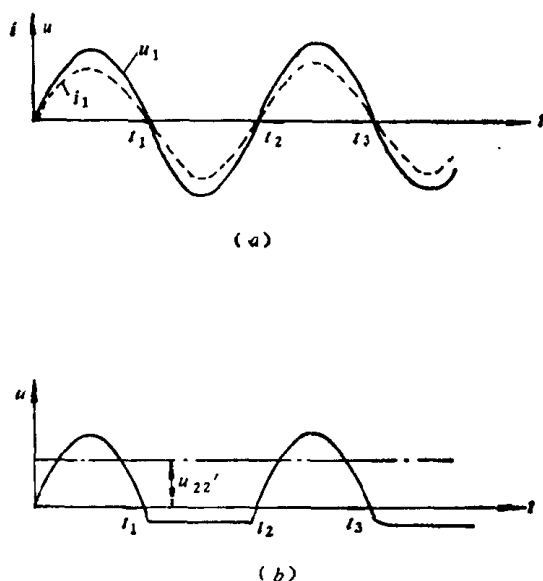


图 1-7 电压与电流的波形
(a) u_1 、 i_1 的波形；(b) $u_{22'}$ 的波形

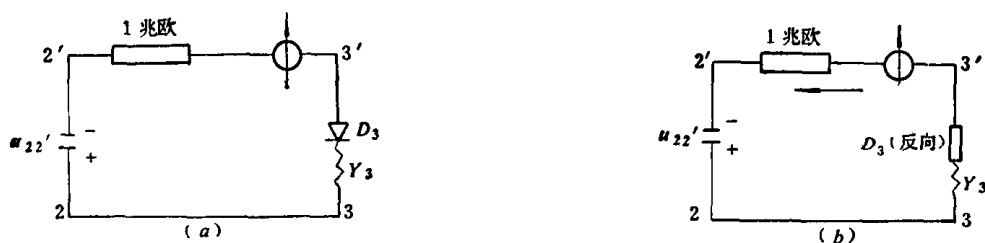


图 1-8 2、3 探针等效电路分析

二、几种方法的比较及其适用场合

冷热探针法应用温差电效应原理，由上面分析可知，温差电动势随掺杂浓度的增加而减小，即样品的电阻率越高，温差电动势越大。尽管电动势大，高阻样品的电阻也很大，所以温差电流是比较小的，检流计检测的是电流，由此可见，冷热探针法若检测的是温差电流则主要适用低阻样品，比较灵敏。一般认为只适用于室温电阻率为 1000 欧姆·厘米以下的硅单晶和 50 欧姆·厘米以下的锗单晶。但是如果检测的是温差电势的极性而不是温差电流，则可以提高电阻率检测上限。

利用点接触整流原理的测型号方法，往往不适用于低阻单晶，这是因为金属与低阻单晶接触时因隧道效应而破坏整流特性，并构成欧姆接触特性。这种方法一般认为只适用于 $1 \sim 10^3$ 欧姆·厘米的硅单晶，对锗单晶不推荐用这种方法。

以上测量半导体材料导电类型的方法对于直拉，区熔，外延片硅单晶及锗单晶（在测准条件下）均可适用。在测量材料的导电型号时不仅仅要测量出它是 n 型还是 p 型，而且还要检验材料均匀度，如单晶中是否存在 p - n 结及杂质浓度相差很大的 L - H 结（高-低结）

等等。

三、测准条件的分析

前面已经指出，怎样测准硅单晶的型号是一个很重要的问题，因为这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其一定的适用范围，离开这些范围来测量型号就有可能发生差错。首先应注意单晶电阻率大致范围，然后再选定一种测量型号的方法。

此外，测型号时要注意样品的表面效应，表面不能有反型层，因此通常需要粗磨样品表面，最好经过喷砂处理。半导体表面对外界环境十分敏感，譬如容易沾上油污，经过化学腐蚀处理的样品，表面上就沾上阴、阳离子，使半导体表面感应出反型层来，从而造成测量错误。因此测量半导体的导电型号不宜用抛光面或腐蚀面，应该经过喷砂处理。

用点接触整流测量半导体材料的导电型号时，要注意大面积欧姆接触，一定要用力压紧，使接触良好，使用薄的软铅皮或软化的金镓合金能得到良好的欧姆接触。构成整流特性的金属-半导体接触压力要小，一般几克力即可。因为探针尖很细，稍用力大一些就可以得到很大的压强，从而破坏了整流特性。

半导体表面对周围电磁场也很敏感，在周围电场的作用下甚至可出现表面反型层，因此在测量型号时最好加以电磁屏蔽，避免外界干扰。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，这种光生电流对型号测量也有干扰，对抛光面尤其要注意。

用冷热探针法测量导电型号时，热探笔的温度要适当，锗的禁带宽度比较窄，热笔温度宜为室温，冷笔要用液氮致冷（78°K）。硅的禁带宽度比较宽，热笔温度可以稍高一点（40~65°C）。但也不能过高，因为过高的温度会引起本征激发，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，半导体的导电类型就不明显。电子的扩散速度比空穴的大，当热笔温度过高时，电子向冷端扩散往往比空穴的多，这样就会造成热端缺乏电子而带正电，冷端积累电子而带负电，这就显示出n型半导体的特征。如果原来是一块P型高阻材料，这时就会误测为n型。由此可见，热笔的温度应以不出现本征激发为限。

此外，热探笔上的氧化物也能引起测量错误，在测量时应予去掉。测量时冷、热探笔都应紧压在样品上，否则也会引起测量错误。

测量单晶的型号时，如果发现局部区域出现反型或测不准型号，可以用化学腐蚀法显示不均匀情况。其具体做法是：在HF酸中加1%（1滴）HNO₃，将单晶放在其中，约经20分钟后取出，则P区呈黑色而n型呈白亮色。

第二节 电阻率的测量

电阻率是半导体材料的重要电学参数之一。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表示如下：

$$\rho = \frac{1}{(N_D - N_A) \mu_n q} \quad (1-4)$$

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

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、特性、制作工艺与技术条件对制造器件的半导体材料的电

阻率提出一定的要求。所以测量电阻率是半导体材料常规参数测量项目之一，应该重视测量的正确性。

一、电阻率测量的基本方法〔4〕

用接触法测量半导体材料的电阻率有如下几种方法：（1）两探针法；（2）四探针法；（3）单探针扩展电阻法；（4）范德堡法等。我国生产半导体材料的厂家广泛采用四探针法，因为这种方法比较简便可行，适于成批生产上使用。下面分别叙述前三种测量方法，范德堡法放在霍尔系数测量中叙述。

由电学基本知识可知，对于一般的金属电阻，可以通过测量流过电阻的电流 I 以及两端电压 V 的大小，然后根据样品的尺寸计算出样品的电阻率（参照图1-9）：

$$\rho = \frac{V}{I} \frac{A}{l} \quad (1-5)$$

式中， A 为样品的截面积； l 为样品的长度。

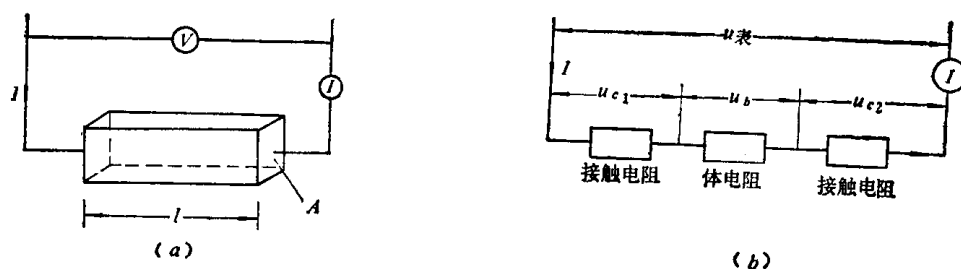


图 1-9 用测量金属导体电阻率的方法
(a) 测量半导体的电阻率；(b) 时出现接触电阻

将以上测量电阻率的方法应用到半导体样品上显然是不行的。这是因为用接触法测量半导体材料的电阻率时会遇到测电压的金属探针与半导体样品的接触问题：金属与半导体相接触的地方有很大的接触电阻。这种接触电阻可以达几千欧姆，甚至远远的超过半导体本身的体电阻。实际上电压表上所测出的电压 $u_{表}$ 是接触电阻的电压降 $u_c = u_{c1} + u_{c2}$ 和半导体体电阻上压降 u_b 之和，并且往往前者远远超过了后者，因此电压表上所测量出的电压不能代表真正的体内电压降。可以用图1-9 (b) 的等效电路来描述这种情况。

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

而

$$u_c \gg u_b$$

所以

$$u_{表} \gg u_b$$

在这种情况下，只有设法测出体电阻上的电压降 u_b ，在欧姆定律成立的条件下才能计算出半导体样品的电阻率。

金属与半导体之间的接触电阻主要来源于阻挡层电阻和细探针与半导体之间造成的扩展电阻。因为金属与半导体之间可以构成多数载流子势垒，使界面缺乏载流子，而产生很大的电阻，这种电阻称为阻挡层电阻。

由上面分析可知，不能直接用万能表或简单地像图1-9那样去测量半导体的电阻率，而应设法寻找能抵销或避免接触电阻的测量方法。因而人们提出了两探针和四探针等方法来

测量半导体样品的电阻率。

1. 两探针法^[5]

两探针法可以用图1-10来加以说明。试样两端接直流电源，引出线与试样之间应保持欧姆接触特性。试样为长条形或棒状，其电阻率应是均匀的。样品的电流回路上串一个标准电阻 R_s ，并用高输入阻抗的电压表或电位差计测量电阻上的电压降，从而计算出流过半

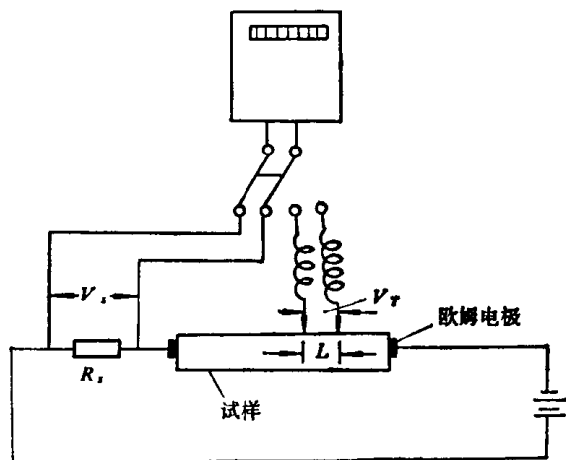


图 1-10 两探针法测量半导体样品的电阻率示意图

导体样品的电流

$$I = \frac{V_s}{R_s} \quad (\text{安}) \quad (1-6)$$

然后用两个靠弹簧压紧的探针在半导体样品的长度方向测量某两点的电压降 V_T (伏)，并且测量出该两点之间的距离 L (厘米)。那么样品的电阻率可以用下式表示

$$\rho = \frac{V_T \cdot A}{I \cdot L} \quad (\text{欧姆} \cdot \text{厘米}) \quad (1-7)$$

式中的 A 为样品的截面积 (厘米²) 由于电压探针上没有流过样品电流，因此测出的样品电阻率与金属和半导体之间的接触电阻无关。

为使测量准确起见，探针尖的几何半径一般为25~50微米，测量表面要经过喷砂处理。两探针法适用于测量电阻率为 $10^{-4} \sim 10^4$ 欧姆·厘米的硅单晶，99%置信水平上的精度约为 $\pm 6\%$ ^[5]①。

2. 直流四探针法^[5]

四探针法是用针距约为1毫米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个探针通以小电流，然后在中间两个探针上用高输入阻抗的静电计、电子毫伏计或数字电压表测量电压，最后根据理论公式计算出样品的电阻率

① 测量精度是指各次测量之间相互一致的程度。用 $\pm a$ 表示精度指标， a 越大测量过程越不精确。精度指标的基准是测量统计分布的标准偏差 σ ，如用百分数表示则为 σ/μ_R ， μ_R 是测量的标称值。精度指标 $\pm a$ 为 $\pm 2\sigma/\mu_R$ （或 $\pm 3\sigma/\mu_R$ ）时，约95%（或99%）的测量次数（一般称为置信水平）的测量值落在 $\pm 2\sigma$ （或 $\pm 3\sigma$ ）范围内（称为置信区间）。

$$\rho = C \frac{V_{23}}{I} \quad (1-8)$$

式中, C 为四探针的探针系数(厘米), C 的大小取决于四探针的排列方法和针距, 探针确定以后, 探针系数 C 就是一个常数, 与样品无关; V_{23} 为用四探针测量时二、三两探针之间的电压(伏); I 为通过样品的电流(安)。

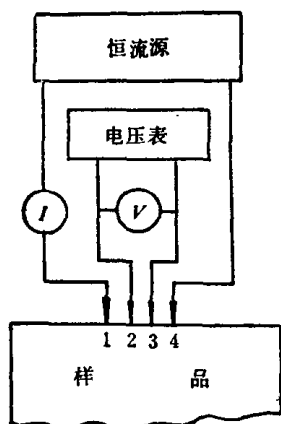


图 1-11 四探针法测样品电阻率装置示意图

四探针法的优点在于探针与半导体样品之间不要求制备合金结电极, 这样给测量带来方便。四探针法测电阻率精度略逊于两探针法, 对于电阻率为 $8 \times 10^{-4} \sim 120$ 、 $120 \sim 500$ 、 $500 \sim 2000$ 欧姆·厘米的 P 型和 $2000 \sim 6000$ 欧姆·厘米的 n 型硅单晶, 99% 置信水平的精度分别优于 $\pm 2\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 15\%$ 和 $\pm 15\%$ 。

3. 矩形四探针法^[4, 6]

实际用四探针法测量电阻率时, 四根探针不一定都得排成一条直线, 从原理上说, 可以排成任何几何图形。普通用得较多的是正方形或矩形四探针。采用这种四探针的优点是可以减小测量区域, 便于观察电阻率的不均匀性。矩形四探针法与直线四探针法没有很大差别, 只是由于探针排列方法改变了, 因此公式 (1-8) 中的探针系数不同。现列在表 1-1 中予以说明 (适用于半无限大样品)。

4. 单探针扩展电阻法

四探针法比两探针法好, 好在可以测量样品沿径向分布的断面电阻率, 从而可以观察

表 1-1 非线性四探针测量电阻率^[4]

名 称	图 形	电阻率计算公式
正方形四探针		$\rho = \frac{2\pi S}{2 - \sqrt{2}} \frac{V}{I} = 10.7 S \frac{V}{I}$
矩形四探针		$\rho = \frac{2\pi S}{2 - (2/\sqrt{1+n^2})} \frac{V}{I}$

到样品电阻率的不均匀情况。但是由于此法受到针距的限制, 很难发现距离小于 0.5 毫米两点上电阻率的变化, 因此人们又提出了一种新的测量微区电阻率的方法, 称为单探针扩展电阻法。此法可以确定体积为 10^{-10} 厘米³ 的区域的电阻率, 分辨率可以达到 1 微米。

这种方法是利用一根金属钨 (或钨钴合金) 尖的探针来探测样品表面的电阻率。要求探针材料具有硬度大和耐磨的性能。探针用夹头夹紧安装在由两个簧片构成的探针臂系统

上。簧片很薄，几乎不能承受加于探针上的砝码重量，当探针上加上砝码的固定重量时，簧片便自由下垂，因此簧片不会改变探针上的压力。簧片的作用在于使探针在任意情况下始终与样品面垂直，且不发生横向移动。探针系统应用绝缘材料使之与样品架绝缘。图1-12示出了探针臂系统的示意图。

用于单探针扩展电阻测量的半导体样品的正面要经过很好的机械抛光（或化学机械抛光），以获得镜状的光亮表面。样品背面要用大面积超声波焊接来制作欧姆接触，或者背面用粗砂研磨并涂以金-镓合金来达到欧姆接触。样品厚度一般为几个毫米，其厚度差不得大于10微米。下面对扩展电阻法作一简单介绍。

假设把探针尖看成是一个镶嵌在半无限大半导体中的半球（见图1-13），在样品内半径

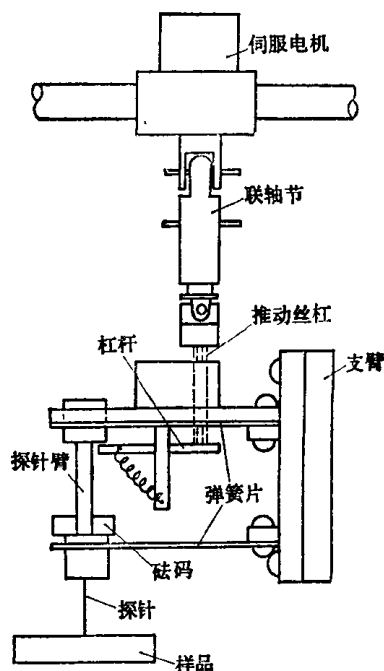


图 1-12 扩展电阻法单探针测量装置

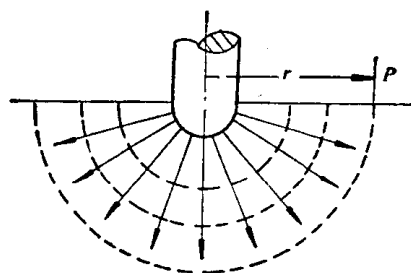


图 1-13 球面探针头（半径为 r_0 ）与样品接触

为 r 处的电流密度 j 为〔7〕

$$j = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (1-9)$$

径向电场 E 为

$$E = -\frac{\partial V}{\partial r} = \rho \cdot j = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (1-10)$$

积分后便可以得到体内电压降 $V = IR_s$ ：

$$V = \int_{r_0}^{\infty} \left(-\frac{\partial V}{\partial r} \right) dr = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r_0} \quad (1-11)$$

式中， I 为流过探针和样品的电流； $R_s = \frac{\rho}{2\pi r_0}$ ，称 R_s 为扩展电阻； r_0 为探针的球面半径。

实际上，对于脆性的半导体材料，探针尖与样品平面之间的接触面的真正几何形状是一个半径为 a 的圆， a 的大小由下式确定