

电力半导体器件 中间测试技术

王益成 苏文成 编著



机械工业出版社

电 力 半 导 体 器 件 中 间 测 试 技 术

王益成 苏文成 编著



机 械 工 业 出 版 社

本书系统地介绍了电力半导体器件中间测试的基本原理、测试方法及其对电力半导体器件特性的影响。全书共分十章，包括半导体材料的检测，电力半导体器件电流放大系数的测量，少子寿命的测量，杂质浓度分布的测量，表面电场和空间电荷区的测量，晶闸管扩展速度的观测，热特性的测量，二次击穿的检测，伏安特性测试和显微技术及其在半导体技术中的应用等。

本书可供从事电力电子技术研究、制造和测试的技术人员阅读，也可供大专院校有关专业的师生参考。

电力半导体器件中间测试技术

王益成 苏文成 编著

责任编辑：陈瑞藻 责任校对：姜仲选

封面设计：田淑文 版式设计：胡金璩

责任印制：张俊民

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $13^{1/4}$ · 字数 292 千字

1990年5月北京第一版·1990年5月北京第一次印刷

印数 0,001—2,135 · 定价：11.00元

ISBN 7-111-01745-5/TN·35

前 言

中间测试是对产品进行质量控制，提高产品合格率及其可靠性与稳定性的重要手段。对科研、试制来说，中间测试有利于选择合理结构、改进参数设计、减少盲目性、及时发现设计中存在的问题。许多新的测试理论及测试方法的不断出现，必然使电力半导体器件的理论更加完善、充实，使产品的成品率提高，为国家节约大量资金。

本书系统地叙述了电力半导体器件中间测试的基本原理、测试方法及其对电力半导体器件特性的影响。它是在综合大量资料的基础上结合作者的一些研究工作编写而成的。全书共分十章，其中第一章半导体材料的检测及第十章显微技术及其在半导体技术中的应用比较通用，国内外有很多参考文献，为节省篇幅，这两章所列的参考文献较少。其余各章，主要是针对电力半导体器件的，因此，每章后均列举了较多参考文献，以供读者查阅。另外，参考文献仅在某一章内出现，而其它章内所引用部分均未重复列出。

本书的初稿是作为我校半导体物理与器件专业的教材而编写的，并经过本专业几届学生及电力电子技术短训班的多次试用，并征求了广大制造人员的意见后进行反复修改完成的。陕西机械学院张永生教授对修改后的草稿进行了细致审阅。西安电力整流器研究所张为佐、徐璠、李学敏等同

志对本书进行了认真审阅，并提出了宝贵意见，在此一并表示深切的谢意。

由于本书涉及的内容较广，而作者水平有限，难免有疏漏和缺点，希望广大读者批评指正。

编著者

1986年5月于西安

目 录

第一章 半导体材料的检测	1
§ 1.1 半导体晶体缺陷的检测	1
§ 1.2 导电类型的测量	2
§ 1.3 硅单晶杂质补偿度的测量	7
§ 1.4 硅单晶材料体内少子寿命的测量	22
§ 1.5 半导体材料电阻率的测量	26
参考文献	43
第二章 电力半导体器件电流放大系数的测量	44
§ 2.1 功率晶体管电流放大系数的测量	44
§ 2.2 电流放大系数在晶闸管中的作用	46
§ 2.3 用音频法测量晶闸管的电流放大系数	53
§ 2.4 用测量晶闸管 $V-I$ 的方法测量电流放大系数	64
参考文献	66
第三章 电力半导体器件少子寿命的测量	68
§ 3.1 概述	68
§ 3.2 用频率法测量晶闸管长基区少子有效寿命	70
§ 3.3 开路电压衰减法测量电力半导体器件的少子寿命	72
§ 3.4 贮存电荷法测量硅整流元件的少子寿命	79
§ 3.5 正弦半波反向恢复法测量电力半导体器件少子寿命	82
§ 3.6 线性电流反向恢复法测量电力半导体器件少子寿命	84
§ 3.7 光学法测量电力半导体器件少子寿命	89
§ 3.8 大注入下的硅整流元件和晶闸管少子寿命的测量	90
参考文献	95
第四章 杂质浓度分布的测量	97

§ 4.1	PN结结深的测量	97
§ 4.2	用探针法测量半导体扩散层的薄层电阻	101
§ 4.3	用薄层电阻法测量表面杂质浓度	104
§ 4.4	阳极氧化剥层法测量杂质浓度分布	107
§ 4.5	用C-V水银探针法测量杂质浓度分布	110
§ 4.6	用C-V法测量晶闸管的杂质浓度分布	127
§ 4.7	扩展电阻法测量杂质浓度分布	134
§ 4.8	光学法测量晶闸管导通下载流子浓度分布	142
§ 4.9	电力半导体器件中深能级杂质的测量	144
参考文献		157
第五章 PN结及硅元件表面电场和空间电荷区的测量		
§ 5.1 表面电场和空间电荷区的测量		159
§ 5.2 “金属探针法”测量PN结表面电场的分布		160
§ 5.3 “激光探针法”测量表面空间电荷区宽度		166
§ 5.4 容-压法测量体内空间电荷区展宽		172
参考文献		178
第六章 晶闸管扩展速度的观测		
§ 6.1 概述		180
§ 6.2 扩展理论		181
§ 6.3 用瞬态导通正向压降法测量扩展速度		192
§ 6.4 用探针法测量晶闸管的扩展速度		204
§ 6.5 用红外法观测硅晶闸管瞬态导通扩展		206
§ 6.6 晶闸管瞬态导通扩展的观测		222
参考文献		236
第七章 电力半导体器件热特性的测量		
§ 7.1 热阻		239
§ 7.2 功率晶体管稳态热阻的测量		244
§ 7.3 功率晶体管瞬态热阻的测量		255

§ 7.4 晶闸管瞬态热阻测试	266
§ 7.5 电力半导体器件热分布的测量	285
参考文献	296
第八章 电力半导体器件二次击穿的检测	298
§ 8.1 大功率晶体管的安全工作区和二次击穿	298
§ 8.2 大功率晶体管的二次击穿	300
§ 8.3 大功率晶体管二次击穿的检测方法	312
§ 8.4 大功率晶体管正偏二次击穿测试线路	317
参考文献	330
第九章 电力半导体器件的中间测试——伏安特性测试	332
§ 9.1 晶闸管的伏安特性及其伏安特性中间检测的必要性	332
§ 9.2 晶闸管伏安特性测试线路原理	338
§ 9.3 光点跟迹法测伏安特性	344
§ 9.4 晶闸管门极伏安特性及其测试线路原理	350
§ 9.5 半自动停表法测门极参数	357
参考文献	360
第十章 显微技术及其在半导体技术中的应用	362
§ 10.1 透射电子显微镜	362
§ 10.2 扫描电子显微镜	366
§ 10.3 质谱仪	389
§ 10.4 离子微探针技术	393
§ 10.5 俄歇电子能谱分析	401
§ 10.6 红外电视显微镜	410
参考文献	414

第一章 半导体材料的检测

半导体材料的质量是元件性能好坏的基础条件，而且是影响元件可靠性与稳定性的潜在因素，也是提高经济效益的基本环节。

晶体中的缺陷、半导体的导电类型、补偿度以及对材料的电阻率、少子寿命、扩散长度、杂质浓度、含氧、含碳量等物理指标的检测，是选择材料、设计和生产元件的依据。

§ 1.1 半导体晶体缺陷的检测

晶体中的缺陷直接关系到器件制造的质量和成品率，所以检查晶体缺陷是半导体检测的一项重要内容。

硅单晶属金刚石结构。若硅原子完全按这种晶格排列生长为单晶，则该晶体称为完整晶体。如果某局部区域点阵排列的规律性被破坏，则该区域称为晶体缺陷。

单晶材料的晶体缺陷按其大小形状通常可分为点缺陷、线缺陷、面缺陷和微缺陷四类。它们是在单晶生长、晶体加工、器件制造、高温热处理、离子注入和放射性辐射时产生的。通过检测缺陷及其数量和分布，分析缺陷形成的机理，找出它和工艺的关系，就能采取措施，改进设计与工艺，提高器件质量和成品率。

晶体缺陷的检测主要有化学腐蚀金相显微观察法、透射电镜法、扫描电镜法、缀饰红外显微观察法、离子探针法、X射线相衬法等。化学腐蚀法要求的设备最简单，这是

材料缺陷和工艺过程中二次缺陷的检测中最常用的方法。

化学腐蚀法的具体步骤是：将样品表面用细金钢砂研磨，然后用水冲洗。把研磨冲洗后的样品进行表面化学抛光，一般采用 $\text{HF}:\text{HNO}_3=1:3$ 的抛光液，时间通常控制在 $2\sim 4\text{min}$ 。将抛光后的样品放到 HF 中漂洗，除去残存的表面氧化层，再用冷、热去离子水反复冲洗。最后进行化学腐蚀，一般可采用 $\text{CrO}_3 33\%$ 水溶液： $\text{HF}=1:1$ 或 $2:1$ 的腐蚀液，此腐蚀液具有择优性，且显示可靠。

§ 1.2 导电类型的测量

半导体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，它主要靠空穴导电，因此P型半导体又称为空穴半导体。N型单晶中多数载流子是电子，它主要靠电子导电，因此N型半导体又称为电子半导体。

半导体器件厂用一定类型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、三极管、晶闸管和集成电路等。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。

半导体导电类型的测量是常规测量，测量方法主要有冷热探针法、整流法、三探针法以及霍尔效应法、染色法、光电压效应法和容压法(C-V)等^[1]。

一、冷热探针法^[2]

冷热探针法是利用温差电效应来测量半导体的导电类型的，其中又可分为利用温差电流方向（见图1-1a）和利用温差电动势极性（见图1-1b）两种测量方法。

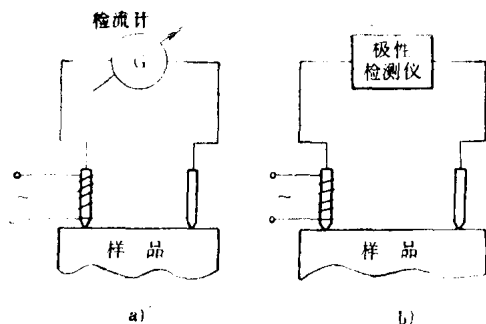


图1-1 冷热探针法测导电类型

a) 利用温差电流方向测量法 b) 利用温差电动势极性测量法

1. 利用温差电流方向测量法

用两根金属探针（即探针）同时与样品接触，一根为热探针，一般用钨丝制成，测量前用酒精灯或通电进行加热，另一根为冷探针，最好用不锈钢制成。采用通电方式的热探针，其电阻丝的功率通常约为20W左右，使冷和热探针的温差保持在30~50℃。当冷热两根探针同时与样品接触后，两个接触点间便产生温差。如果在冷热探针之间串接一个检流计使之构成闭合回路，就会发现检流计中的光点朝某一个方向偏转，这表示回路中有电流流过，这个电流就是温差电流。

2. 利用温差电动势极性测量法

图1-2示出了N型和P型样品中温差电动势产生的

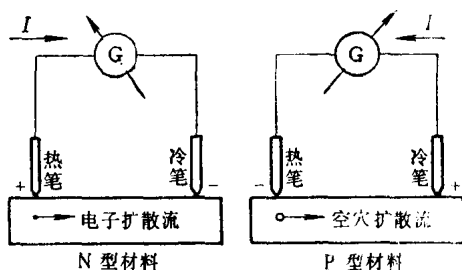


图1-2 N型和P型半导体产生不同极性的温差电动势

情况。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。

由于热探针和硅片接触时，在硅片和探针的接触点附近热激发产生了多余的电子和空穴。对于N型样品，热端激发了产生了多余的电子，在半导体内出现从热端到冷端的电子扩散流，在外回路产生了如图1-2所示方向的电流。而对于P型样品，热端的空穴向冷端扩散，冷端带正电，热端带负电。

由上所述，使用相同的冷热探针，根据温差电流的方向或温差电动势的极性就可以判断半导体材料的导电类型。

二、整流法

对于高电阻率的P型单晶材料，由于P型杂质浓度低，而电子的迁移率又比空穴的大，因此检流计往往指示出相反的方向，而误认为是N型材料。当发生这种情况时可以用整流法进行检测。

图1-3是用三探针整流法检测导电类型的示意图及其等效电路图。

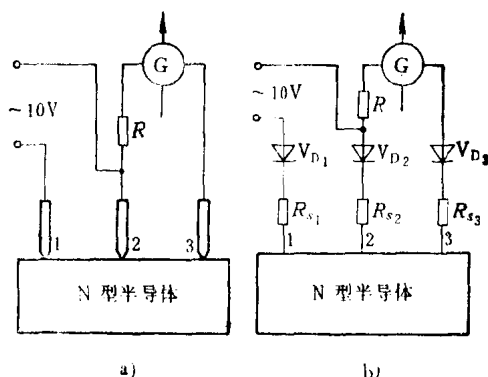


图1-3 三探针法测量导电类型

a) 示意图 b) 等效电路图

三根探针与样品接触，探针间距约为1.5~5mm，在1、2探针间接上10V左右的交流电，在2、3探针间接检流计。根据检流计的偏转方向就可以判断样品的型号。

图1-3b所示的等效电路图中，势垒电阻用二极管代替， R_s 是探针与样品接触的扩展电阻 $\ominus$ 。假定欧姆定律成立的情况下，半导体内的电压降 V 与由探针流入半导体的电流 I 之间具有如下关系：

$$V = IR_s \quad (1-1)$$

由理论推得，当探针与样品的接触半径为 r_0 的半球面时，则扩展电阻为

$$R_s = \rho / 2\pi r_0 \quad (1-2)$$

式中 ρ ——半导体的电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$)。

图1-3b中的 R_{s1} 、 R_{s2} 、 R_{s3} 代表探针与样品接触时的扩展电阻， V_{D1} 、 V_{D2} 、 V_{D3} 分别为探针1、2、3与N型半导体接触时的等效二极管。

首先分析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1-4所示。

设外加电压 u_1 波形如图1-5所示，因为电路属纯电阻电

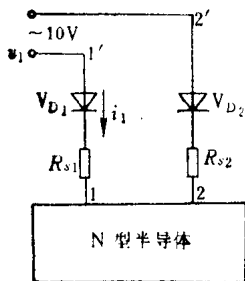


图1-4 1、2探针等效电路

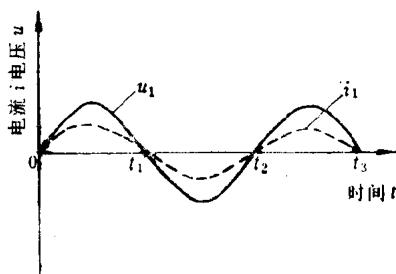


图1-5 u_1 与 i_1 的波形

$\ominus$ 扩展电阻的原理将在§4.7节中讨论。

路, 所以电流 i_1 波形与电压 u_1 波形同相位。当 u_1 为正半周时, V_{D2} 中的电流方向为 $2'2$; 当 u_1 为负半周时, V_{D2} 中的电流方向为 $2'2$ 。

当电流方向为 $2'2$ 时, 在 V_{D2} 上所产生的电压为

$$u_{22'} = i_1 (r_{D2反} + R_{s2}) \quad (1-3)$$

式中 $r_{D2反}$ —— 二极管 V_{D2} 反向偏置时的电阻。

当电流方向为 $2'2$ 时, 在 V_{D2} 上所产生的电压为

$$u_{2,2} = i_1 (r_{D2正} + R_{s2}) \quad (1-4)$$

式中 $r_{D2正}$ —— 二极管 V_{D2} 正向偏置时的电阻。

由于 $r_{D2反} \gg r_{D2正}$, 所以 $u_{22'} \gg u_{2,2}$, 相叠加的结果如图1-6所示。

把 $u_{22'}$ 看作电源与 $33'$ 支路合在一起, 画成等效电路如图1-7所示。

从图1-7中看出, 检流计中电流的方向是由 $3'$ 到 $2'$, 即光点向左偏转。

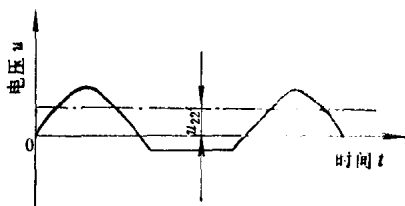


图1-6 $u_{22'}$ 的波形

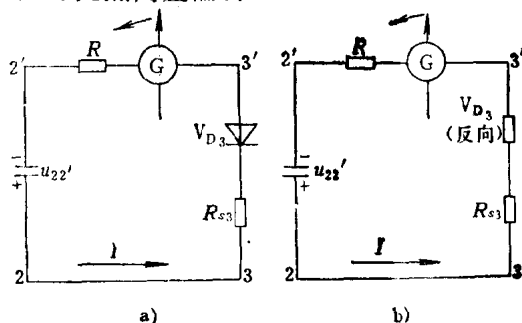


图1-7 2、3探针等效电路

a) 等效电路 b) V_{D3} 反向时用电阻代替的等效电路

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来确定所测样品的导电类型。

§ 1.3 硅单晶杂质补偿度的测量⁽²⁾

电阻率是用来描述单晶中导电杂质含量的参数, 它只能表示非补偿的导电杂质的含量或表示补偿后不同类型导电杂质含量之差, 而不能反映材料中所含的施主杂质浓度和受主杂质浓度。多晶中的基磷、基硼和拉晶过程中的沾污等, 都会使单晶同时存在施主和受主杂质, 造成补偿。施主和受主杂质相互补偿的程度越大, 电阻率数据对应补偿后杂质浓度之差同晶体实际的杂质浓度之和偏离也越大, 因此电阻率测量值便不能真实地反映单晶中的掺杂情况。

补偿大的单晶, 因为磷、硼在晶体生长过程中分凝效果不同, 因此轴向和径向电阻率的不均匀度增大, 单晶热处理后电阻率变化也大。用补偿度大的材料制造的器件难以达到设计指标, 参数分散, 反向电流增大, 反向耐压降低。对于电力半导体器件, 由于硅片直径很大, 硅单晶的非均匀补偿使器件的导通扩展不均匀, 影响器件的 di/dt 耐量, 它是器件失效的潜在因素之一。

材料中的补偿度一般用下式表示:

$$\text{对于P型材料 } C = \frac{N_D}{N_A} \text{ 或 } \frac{N_A + N_D}{N_A - N_D} \quad (1-5)$$

$$\text{对于N型材料 } C = \frac{N_A}{N_D} \text{ 或 } \frac{N_D + N_A}{N_D - N_A} \quad (1-6)$$

式中 C ——补偿度;

N_D ——施主浓度;

N_A ——受主浓度。

目前测定半导体材料补偿度的方法可以分为两大类：

第一类是使晶棒熔化后再生长成单晶，利用磷、硼挥发或分凝效应的差别，通过测定重熔前后的电阻率来得到补偿度。

另一类是利用霍尔效应和磁阻效应测定补偿度。根据材料导电类型不同，这类方法又可以分为以下几种方法。

测量P型硅的补偿度可以采用两种方法：用低温霍尔效应测量杂质补偿度（其中包括55K载流子浓度法）和用磁阻法测量杂质补偿度。

测量N型硅的补偿度可以采用两种方法：用低温霍尔效应测量杂质补偿度和用低温（55K或77K）霍尔迁移率测量杂质补偿度。

这里只讨论用载流子浓度法和磁阻法测量P型硅的杂质补偿度。

一、霍尔效应和磁阻效应

1. 霍尔效应

把长度为 l 、宽度为 b 、厚度为 d 的矩形半导体样品放在沿 z 方向磁感应强度为 B_z 的均匀磁场中，有外加电场时，在 x 方向通以电流，设磁场方向和电场垂直，那么样品中载流子由于受到洛伦兹力作用而偏转，如同附加一个横向电流，因而在样品 y 方向两端引起电荷积累，产生一个横向电场 E_y ，这

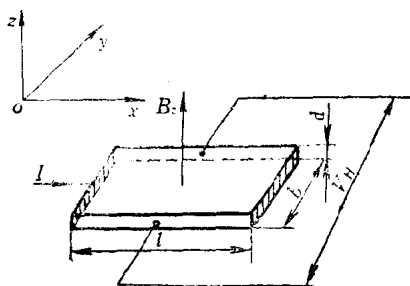


图1-0 霍尔效应示意图

个现象称为霍尔效应，见图1-8。

霍尔电场 E_y 与电流密度 J_x 和磁感应强度 B_z 成正比，即

$$E_y = R_H J_x B_z \quad (1-7)$$

比例系数 R_H 称为霍尔系数，即

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} \quad (1-8)$$

式(1-7) 可以写成

$$V_H = R_H \frac{I_x B_z}{d} \quad (1-9)$$

式中 V_H ——霍尔电压 (V)；

I_x ——样品在 x 方向的电流(A)；

d ——样品厚度(m)；

B_z ——磁感应强度(T)；

R_H ——霍尔系数(m^3/C)。

但是当长度使用cm作单位，磁感应强度使用高斯(Gs) $\ominus$ 作单位，这样霍尔系数可以表示为

$$R_H = \frac{V_H d}{I_x B_z} \times 10^3 \quad (1-10)$$

在上述电流和磁场的正方向下，若测得 V_H 沿 y 方向增大，霍尔系数为负，则样品是N型材料；反之，霍尔系数为正，则样品是P型材料。因此通过测量霍尔系数的正、负可以判断半导体的导电类型。

根据半导体物理可知，霍尔系数与载流子浓度的关系为

$$\left. \begin{aligned} \text{对于N型} \quad n &= -\left(\frac{\mu_H}{\mu}\right)_n \frac{1}{q R_H} \\ \text{对于P型} \quad p &= \left(\frac{\mu_H}{\mu}\right)_p \frac{1}{q R_H} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

$\ominus \quad 1\text{Gs} = 10^{-4}\text{T}$