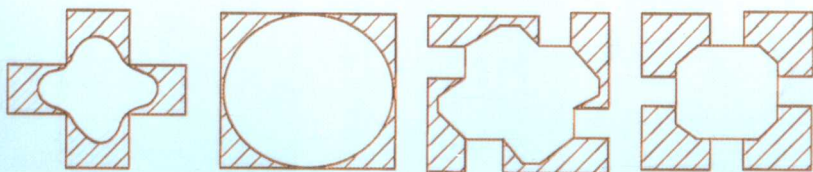




半导体 测试技术原理与应用

刘新福 杜占平 李为民 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

天津市科协自然科学学术专著基金



半导体测试技术 原理与应用

刘新福 杜占平 李为民 编著

北 京

冶金工业出版社

2007

内 容 提 要

本书在介绍电学参数测试原理的基础上,重点介绍了具有国际先进水平的国内外首台微区电阻率测试仪原理及应用,具有很高的实际应用价值。全书共分11章,1~6章讨论了微区电学参数测试的重要性,综述了当今已研究出来的各种半导体测试方法的特点;详细分析四探针测量技术的基本原理,重点讨论常规直线四探针法、改进范德堡法和改进 Rymaszewski 四探针测试方法;研究四探针测试技术中的共性问题,介绍了以较高的定位精度进行大型硅片的无图形等间距测量的原理。7~11章重点讨论了测试技术在材料科学等领域的分析与应用及无接触测量技术。

图书在版编目(CIP)数据

半导体测试技术原理与应用/刘新福等编著. —北京:
冶金工业出版社, 2007. 1

ISBN 978-7-5024-4101-2

I. 半… II. 刘… III. 半导体材料—测试技术
IV. TN304. 07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 117011 号

出 版 人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 张 卫 美术编辑 李 心

责任校对 符燕蓉 李文彦 责任印制 丁小晶

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2007 年 1 月第 1 版, 2007 年 1 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 10 印张; 267 千字; 304 页; 1 ~ 3000 册

28.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

序

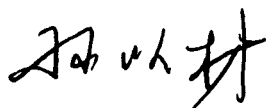
随着电子信息技术的不断发展，测试技术也需要不断地提高与创新，本书是作者在半导体硅片微区薄层电阻测试领域所做探索的基础上，借鉴国内外许多专家在该领域的研究成果编写而成的。

各领域的研究与发展离不开技术的支持，可以说技术是生产和科研工作中不可缺少的一个重要环节。随着集成电路技术的不断创新，集成电路的特征尺寸已达到 $0.1\mu\text{m}$ 以下，对硅片的电阻率均匀性要求越来越高，而传统的四探针其分辨率大于针距的 3 倍，已不能满足检测微区均匀性的要求，因而需要有新型的测试仪器设备来取代。在河北工业大学自主研发硅片四探针自动测试仪工作中，课题组在微区测试领域提出了改进的 Rymaszewski 四探针测试方法，该测试方法不仅在完全没有光刻图形的样品上能够完成测试工作，而且可以自动完成测试过程，节约测试时间，提高测试效率，并于 2003 年通过技术鉴定。

作为具有图像识别功能的全自动微区薄层电阻四探针测试仪课题的主要研究人员之一，作者为该课题的完成做出了较大的努力。同时，该课题还得到了天津市自然科学基金项目和河北省自然科学基金项目的支持。本

书作者在《物理学报》、《半导体学报》、《电子器件》、《半导体技术》、《微电子学与计算机》、《固体电子学研究与进展》、《稀有金属》和《河北工业大学学报》等刊物上发表了多篇相关论文。该项目经教育部天津大学查新工作站查询（报告编号：200312d0300244）：对《图像识别在微区测试四探针定位技术中的应用》得出以下结论：“国内外均未发现有与本课题技术特征相同的专利及非专利文献报道。”

本书作者在半导体测试技术原理与应用领域还仅仅是做了初步的尝试与探索，一定会存在不少的疏漏与欠妥之处，敬请同行专家批评指正。



2006年6月

前 言

本书以半导体测试技术的原理分析及测试技术的改进为基础,介绍微区薄层电阻多种测试方案的实施与应用,重点分析独立研制的微区薄层电阻四探针自动测试仪器,以及改进 Rymaszewski 四探针测试方法的原理,并对无接触测量技术在半导体测试中的应用进行了介绍。

全书共 11 章。第 1 章对半导体微区电阻测量技术的各种方法进行了分析比较,对国内外薄层电阻测试方法进行综述;第 2 章是四探针技术测量薄层电阻原理的分析,对常规直线四探针法、改进的范德堡法和斜置式方形 Rymaszewski 四探针法分别进行了详细论述;第 3 章深入地讨论了四探针测试技术中的共性问题,重点对测试设备的校准及环境对测量的影响,以及对四探针测试中的边缘修正问题进行了论述;第 4 章论述了本课题组开发的自动测量四探针仪测控系统;第 5 章论述游移对测试结果的影响及测量薄层电阻的改进 Rymaszewski 方法;第 6、7 章分别论述探针图像预处理、边缘检测以及探针的图像分割、定位控制与探针图像检测精度分析;第 8 章对电阻率的无接触测量技术及自主研制的薄层电阻自动测试仪器进行了分析与介绍;第 9 章讨论了高电阻率材料的电学参数测量问题;第 10 章论述了扫描电子显微镜及其在半导体测试技术中的应用;第 11

章介绍了外延片的物理测试原理。

本书由刘新福、杜占平、李为民编著。刘新福撰写第1~7章，杜占平撰写第8~11章，李为民参加了第11章第5节的编写工作；刘翠响、王静、张艳辉、谢辉、王旭东等参加相关课题的研究，以及部分章节图形的制作等工作。在具有图像识别功能的四探针仪的研制工作中，博士生导师孙以材教授作为项目负责人自始至终领导了项目研究工作，保证了研究工作的顺利完成。在本书的撰写过程中，孙以材教授作为国内半导体测试技术领域的专家，以诲人不倦的精神给予作者多方面的具体指导和帮助，在此深表感谢！本书所介绍的相关课题研究项目得到了国家自然科学基金项目的资助（编号为50475055）。该书的出版得到了天津市科协自然科学学术专著基金的资助，还得到了河北工业大学机械学院的领导，冶金工业出版社的大力支持，在此一并致谢！

由于作者在半导体测试技术领域研究得不够深入，书中不妥之处，敬请各位专家与学者斧正，作者在此深表谢意！

编著者

2006年6月

目 录

1 半导体微区电阻测量技术	1
1.1 微区电阻测试相关因素分析	1
1.1.1 离子注入监测	2
1.1.2 二极管的反向饱和电流	3
1.1.3 反向耐压	3
1.1.4 晶体管的饱和压降	3
1.1.5 晶体管的放大倍数 β	4
1.1.6 MOS 电容器耗尽层弛豫时间 T_c	4
1.1.7 GaAs 器件阈值分散性	5
1.1.8 化合物半导体计量比的一致性	6
1.1.9 材料结构强度的判定依据	6
1.1.10 可控硅整流器	7
1.2 国内外薄层电阻测试方法综述	7
1.2.1 微区薄层电阻测试方法种类	7
1.2.2 微区电阻测试方法的原理与特点	8
1.2.3 微区电阻测试结果的表示方法	14
1.2.4 微区电阻的测试结构分析	15
1.2.5 四探针技术可测试的对象及电阻率 测试的广泛应用	18
1.3 图像处理与分析及其在半导体薄层电阻 测量中的应用	19
参考文献	22
2 四探针技术测量薄层电阻的原理分析	26
2.1 四探针测试技术概述	26

2.2 常规直线四探针法	29
2.2.1 常规直线四探针法的基本原理	29
2.2.2 直线四探针法的测准条件分析	31
2.2.3 测量电流的选择	33
2.2.4 直线四探针技术的边缘和厚度修正	35
2.2.5 直线四探针法的测量区域的局限	35
2.3 改进的范德堡法	38
2.3.1 改进范德堡法的基本原理	38
2.3.2 改进范德堡法测试条件分析	39
2.3.3 改进范德堡法的边缘修正	42
2.4 斜置式方形 Rymaszewski 四探针法	42
2.4.1 斜置式方形 Rymaszewski 四探针法 基本原理	42
2.4.2 斜置式方形 Rymaszewski 四探针法 的厚度修正	44
2.5 小结	46
参考文献	47
3 四探针测试技术中的共性问题	48
3.1 测试探针	48
3.2 测试设备的校准及环境对测量的影响	49
3.2.1 测试设备的校准	49
3.2.2 环境对测量的影响	49
3.3 四探针测试中的边缘修正问题	50
3.3.1 边缘修正的镜像源法	51
3.3.2 边缘修正的图形变换法	54
3.3.3 边缘修正的有限元法	57
3.3.4 结论	60
3.4 小结	61
参考文献	61

4 四探针仪测控系统及其实现	63
4.1 机械系统设计	63
4.1.1 总体布局设计	63
4.1.2 样品平台设计	64
4.1.3 探针系统设计	64
4.2 四探针仪测试系统设计	65
4.2.1 自动测试系统功能	65
4.2.2 信号测量系统原理	69
4.2.3 串行接口电路设计	78
4.2.4 系统通信程序设计	80
4.3 光学监视系统	88
4.4 小结	89
参考文献	89
5 游移对测试结果的影响及测量薄层电阻的改进 Rymaszewski 方法	90
5.1 方形四探针测试中探针游移对测试结果造成的误差分析	90
5.1.1 方形四探针测试系统游移造成的误差分析	90
5.1.2 测试系统探针游移造成的探针定位误差试验	94
5.2 方形四探针法与常规直线四探针法游移造成误差的对比分析	96
5.2.1 测准条件分析	97
5.2.2 常规直线四探针测试系统探针游移造成的误差理论分析	97
5.2.3 两种四探针游移误差分布对比	100
5.2.4 两种测试方法中的电势分布	100

5.2.5 两种四探针测试结果的对比	102
5.3 用改进的 Rymaszewski 公式及方形四探针法 测定微区的方块电阻	103
5.3.1 现存问题的讨论	103
5.3.2 基本原理及应用	103
5.3.3 理论计算数据及测试方案	109
5.3.4 实验测试及结论	111
5.4 小结	113
参考文献	113
6 探针图像预处理及边缘检测	115
6.1 探针图像的获取	115
6.2 探针图像的预处理	116
6.2.1 探针图像的灰度级修正	117
6.2.2 探针图像的平滑	118
6.3 探针图像的二值化及处理	123
6.4 探针图像的边缘检测	125
6.4.1 空域微分算子	126
6.4.2 其他新边缘检测法	131
6.4.3 几种新型边缘检测算法	133
6.5 亚像素边缘检测算法	134
6.5.1 亚像素细分算法的必要性与可能性	134
6.5.2 基于矩保持的亚像素边缘检测	135
6.5.3 利用一阶微分期望值的亚像素边缘检测	136
6.5.4 利用切线信息的亚像素边缘检测	137
6.5.5 空间矩亚像素细分算法	140
6.5.6 试验结果及算法比较	145
6.6 图像特征描述	148
6.7 小结	149
参考文献	149

7 探针的图像分割、定位控制与检测精度分析	151
7.1 探针图像的分割	151
7.1.1 依赖像素的阈值选取	154
7.1.2 依赖区域的阈值选取	154
7.1.3 依赖坐标的阈值选取	156
7.2 测试结构对测试结果的影响	157
7.3 图像识别在探针自动定位与监控中的应用	158
7.3.1 通过直方图选择边界阈值	159
7.3.2 中心探测确定探针位置	160
7.3.3 驱动步进电机调整探针的测试结构	161
7.3.4 试验结论	161
7.4 探针识别系统产生误差的因素	162
7.5 探针图像检测误差分析	164
7.5.1 微区图像识别系统存在的误差	164
7.5.2 亚像素细分算法的误差分析	166
7.6 小结	167
参考文献	167
8 电阻率的无接触测量及自动测试技术	169
8.1 利用等离子共振极小点测定半导体多数载流子浓度	169
8.1.1 测试原理	170
8.1.2 仪器设备	175
8.1.3 测试步骤	176
8.1.4 误差和精度	177
8.2 无电极法电阻率测量	180
8.3 大型硅片薄层电阻四探针自动测试仪	187
8.3.1 设备研制的理论依据	187
8.3.2 仪器研制工作	188

8.3.3	理论突破及达到的技术指标	192
8.3.4	该仪器测试效果——Mapping 技术测量结果	194
8.3.5	查新检索	195
8.4	小结	196
	参考文献	196
9	高电阻率材料的电学参数测量	197
9.1	概述	197
9.2	直流测量法	197
9.3	交流测量技术	207
9.4	绝缘体的电学参数测量	210
9.5	小结	219
	参考文献	219
10	扫描电子显微镜及其在半导体测试技术中的应用	221
10.1	扫描电子显微镜结构和工作原理	221
10.1.1	基本原理	221
10.1.2	电子-光学系统	222
10.1.3	样品表面上产生的效应	226
10.1.4	探测器	228
10.2	操作模式和工作条件	231
10.2.1	操作模式	231
10.2.2	电子束斑最小有效尺寸	232
10.2.3	电子束斑电流	234
10.2.4	分辨本领	235
10.2.5	放大倍数及其选择	236
10.2.6	景深	237
10.3	成像衬度机制	239
10.3.1	表面形貌衬度	239
10.3.2	原子序数衬度	241

10.3.3	表面磁场和电场衬度	243
10.3.4	表面电势衬度	243
10.3.5	样品诱导电流衬度	243
10.3.6	晶体取向衬度	244
10.4	在半导体测试技术中的应用	244
10.4.1	一般应用	244
10.4.2	特殊应用	246
10.5	电子束通道效应	254
10.5.1	ECP 图案的形成	254
10.5.2	ECP 图案的性质	256
10.5.3	获得 ECP 图案的条件	257
10.5.4	ECP 图案的应用	258
10.6	小结	259
参考文献		260
11	外延片的物理测试	261
11.1	概述	261
11.2	红外干涉法测外延层厚度	261
11.2.1	膜反射红外光时的干涉效应	262
11.2.2	测量方法	263
11.2.3	外延层厚度测量应注意的事项	266
11.2.4	计算实例	270
11.3	硅外延层缺陷检验和质量分析	271
11.3.1	外延层缺陷种类及其成因分析	272
11.3.2	外延层缺陷检验方法	280
11.4	外延片夹层的测试	280
11.4.1	外延片中的夹层	280
11.4.2	夹层的检测	281
11.5	三探针电压击穿法测外延层电阻率	282
11.5.1	基本原理	282

11.5.2	测试线路与装置	285
11.5.3	测试步骤	287
11.5.4	电阻率的测试	289
11.5.5	测试注意事项	289
11.5.6	测量精度	291
11.6	电容-电压法测硅外延层纵向杂质分布	292
11.6.1	测试的基本原理	292
11.6.2	用高频 Q 表的测试方法和测试线路	296
11.6.3	测试步骤	298
11.6.4	测试数据的处理与杂质浓度的确定	299
11.6.5	测准条件与注意事项	300
11.6.6	利用 C-V 测试仪和汞探针测外延片 杂质浓度简介	301
11.7	小结	304
	参考文献	304

1 半导体微区电阻测量技术

科技发展日新月异, 计算机不断更新换代, 其存储容量也在不断增长, 作为其基础元件的集成电路已由超大规模 (VLSI) 向特大规模 (ULSI) 发展。图形日益微细化, 集成电路尺寸不断缩小, 目前, IC (集成电路, integrate circuit) 制造以 203.2mm (8in)、0.13 μm 为主, 预计在 2007 年左右将以 304.8mm (12in)、65nm 为主^[1~3], DRAM (动态随机存取存储器, dynamic random access memory) 达到 64GB, MPU (微处理器, micro processor unit) 和 ASIC (专用集成电路, application specific integrate circuit) 集成度分别达到每平方厘米 90M 和 40M 个晶体管。在硅芯片上很小的区域已经能够集成非常复杂的电路, 这一方面要求芯片直径不断增大以提高生产率, 目前已达到 304.8mm (12in), 并逐渐发展到 406.4mm (16in); 另一方面对晶体的完美性、力学及电特性也提出了更为严格的要求。特别是微区的电学特性及其均匀性已经成为决定将来器件性能优劣的关键因素^[4]。在各种器件设计、生产中, 需要了解和掌握硅片及外延片的微区电阻率分布状况。因此, 微区电阻率的测试成为芯片加工之中的重要工序, 为了更好地保证芯片的生产质量, 保证设计的完美性和成功率, 应开展各种芯片的微区电阻率分布的测试研究, 以更好地服务于大规模集成电路的生产, 保证最终产品的性能。

1.1 微区电阻测试相关因素分析

下面直接对部分芯片制作工艺过程有关的若干重要电学参数进行重点分析, 以表明微区测试的重要性^[5]。

1.1.1 离子注入监测^[6~15]

用微区薄层电阻图示可以作为监控硅片离子注入均匀性、重复性的一种综合的方法。微区薄层电阻图示方法，大大方便了对各种注入现象的观察，包括平面沟道效应，图 1-1 是一晶向为 $[100]$ 、磷（50keV，3E14）、标准偏差 2.05%、平均值 261.7 Ω /方块、等值线距离 1.0% 的 152.4mm（6in）硅片上 625 个测试点的薄层电阻图形。图中粗线表示平均薄层电阻的轨迹，细线表示大于（+）或小于（-）平均值 1% 的等值线。薄层电阻值小的区域是由于沟道离子在沿着平面向外方向上的深层穿透引起的。图 1-1 清楚地表明了硅片与离子束相互作用的问题。图 1-2 是条纹实验硅片，片号：5 1E14/1E44 100keV，标准偏差 10.45%，平均值 529.0 Ω /方块，等值线距离 2.00%，硅片的四个区域测量 625 个点上所做的薄层电阻图示。由于掩膜对准的原因使未刻条纹的中立区偏向左侧。每一区域的明显不均匀性与在静电式扫描注入机中使用扫描观察得到的结果相似，每一区域的不均匀度与条纹宽度成正比，在图中能清楚地看到条纹的不均匀性。因此，利用该图示能够发现设备的注入不均匀性。

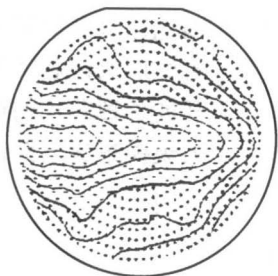


图 1-1 磷注入薄层电阻等值图



图 1-2 条纹实验 625 点的
薄层电阻图示