

国家级物理实验教学示范中心系列教材
中山大学物理学实验系列教程



半导体工艺与测试实验

© 谢德英 陈 晖 黄展云 陈 军 编



科学出版社

国家级物理实验教学示范中心系列教材
中山大学物理学实验系列教程

半导体工艺与测试实验

谢德英 陈 晖 黄展云 陈 军 编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书内容包括半导体工艺的6个主要单项实验、半导体材料特性表征与器件测试实验、工艺和器件特性仿真实验,并通过综合流程实验整合各单项实验知识和技能,着重培养学生的半导体器件的综合设计能力。

本书可作为高等院校微电子学、电子科学与技术、光电等专业本科生相关实验课程的教材,也可作为从事微电子科学、电子器件、集成电路等工程研究和应用相关人员的实验技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

半导体工艺与测试实验/谢德英等编. —北京:科学出版社,2015.3
国家级物理实验教学示范中心系列教材·中山大学物理学实验系列教程
ISBN 978-7-03-043646-7

I. ①半… II. ①谢… III. ①半导体工艺-高等学校-教材
IV. ①TN305

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第043678号

责任编辑:王 刚 曹 盛/ 责任校对:张凤琴
责任印制:徐晓晨 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencecp.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年3月第一次印刷 印张:12

字数:232 000

定价:34.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

微电子技术是电子信息产业的基础. 微电子技术的持续发展、半导体工艺技术的革新和半导体器件测试技术的完善, 使得新器件不断涌现, 促进了电子工业的加速发展. 与此同时, 对高科技人才的需求也是前所未有的, 半导体工艺、材料与器件特性测试实验已成为很多高校微电子学专业的一门必修课程, 具有实践性强、实践与理论紧密结合的特点, 对培养具有竞争力的高素质微电子技术人才十分必要.

全书共分为四章. 第1章是绪论, 提出了实验目的和要求; 第2章是半导体工艺实验, 包括硅片清洗、热氧化、光刻、湿法刻蚀、扩散和金属蒸镀实验等半导体器件制造的6个主要单项工艺实验; 第3章是半导体材料与器件特性表征实验, 实验项目涵盖了典型的半导体材料参数、器件电学特性的表征与测量原理, 及其测试技术应用; 第4章是综合实验, 以半导体器件设计为主线, 围绕器件设计与工艺制造, 以及器件特性表征与检测技术, 把前述的各个单项工艺、测试、仿真实验项目的内容整合在一起, 最后设计或制造出硅基NMOS或双极型晶体管等器件. 由此通过案例式的实验技能训练, 增强学生对各单项实验知识之间的融会贯通, 及对半导体器件设计、制造和测试的整体把握. 全书章节分明、语言直观、图文并茂、引用完备, 力求达到作为完备的实验手册的同时, 启发学习者的兴趣和为读者深入了解提供指引.

本书从筹备到出版, 先后得到了中山大学教务处、中山大学设备与实验室管理处、中山大学物理科学与工程技术学院等单位的支持和资助; 同时, 中山大学物理实验教学中心及科学出版社对本教材的编写给予了极大的鼓励和帮助, 在此向他们表示衷心的感谢.

本书在编写过程中参考了大量国内有关电子器件、晶体管原理、集成电路工艺等方面的传统教材, 同时也参考了国际上在该领域内的许多新教材, 其中主要的文献资料已详细列于书后, 但难免会有未顾及的, 在此一并表示衷心感谢.

限于作者的水平和经验, 书中的不足之处在所难免, 敬请广大读者批评指正.

编 者

2014年9月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 实验目的	1
1.2 实验要求	1
1.3 洁净室简介	2
1.4 实验室安全与注意事项	3
第 2 章 半导体工艺实验	6
2.1 光掩模版介绍	6
2.2 工艺流程介绍	10
2.3 硅片清洗实验	21
2.4 热氧化工艺实验	24
2.5 光刻工艺实验	35
2.6 湿法刻蚀工艺实验	42
2.7 磷扩散工艺实验	45
2.8 金属蒸镀工艺实验	48
第 3 章 半导体材料与器件特性表征实验	53
3.1 高频光电导衰减法测量硅单晶非平衡少数载流子寿命实验	53
3.2 四探针法测量硅片电阻率与杂质浓度实验	62
3.3 半导体材料的霍尔效应测量实验	77
3.4 pn 结的电容-电压(C-V)特性测试实验	84
3.5 双极型晶体管的直流参数测试实验	92
3.6 薄膜晶体管器件电学特性测试实验	108
3.7 MOS 结构的 Si-SiO ₂ 界面态密度分布测量实验	115
第 4 章 综合实验	121
4.1 半导体仿真工具 SILVACO TCAD 介绍	121
4.2 工艺仿真的基本操作	154
4.3 PMOS 器件工艺仿真实验	167
4.4 半导体器件物理特性仿真实验	168
4.5 半导体器件设计实验	173
4.6 半导体器件制备和特性测试实验	178
参考文献	183

第 1 章 绪 论

半导体工艺与测试实验是微电子学专业的基础课程,围绕半导体材料、器件、工艺等环节开设.根据微电子学专业的培养目标,实验教学将为学生在电子器件领域从事工程技术工作和科学研究提供系统的实践训练.学生在实验的学习过程中,要有意识地提高科学实验素养,具有强烈的求知欲望、严谨的科学态度以及勇于探索的钻研精神.

本章是实验的预备知识,内容安排如下:1.1节和1.2节阐述本实验课程中两大部分实验目的与要求;1.3节介绍洁净实验室的环境;1.4节提出学生进入实验室学习的安全与注意事项.

1.1 实验目的

随着科学技术的发展,社会对大学生的素质要求也不断提高,微电子专业的学生不但要掌握集成电路的基本理论知识,而且还要掌握基本的实验技能,并具有一定的科学研究能力.半导体工艺与测试实验是一门实践性、技术性较强的专业实验课,是微电子学专业教学内容必不可少的一部分.同时也是理论教学的深化和补充,巩固和加深学生对所学的半导体材料、半导体物理、半导体器件、集成电路原理和微加工技术等专业课程的理解,进一步巩固相关理论知识,为从事电子器件设计与制造打下良好的基础.

本课程通过半导体工艺实验,加深学生对整个半导体器件制造工艺的了解,培养学生的动手能力和半导体器件工艺流程设计的能力,并提高学生独立分析问题、解决问题的能力;通过半导体材料与器件特性表征实验,使对半导体材料性能参数、半导体表面及界面态的测量、半导体器件电学参数的观测等实验手段有较深入的认识,了解和掌握有关半导体材料和器件特性检测方面的基本方法和实验手段,提高学生的实验技能;通过综合实验,利用 TCAD(technology computer aided design)仿真软件对工艺和器件进行仿真、设计,扩展对实验局限性的认识,探讨现代工艺和器件的主要改进方向.最后从器件设计、集成制备、表征检测等方面完成半导体器件项目的流程综合训练,着重培养学生的综合设计和创新能力.

1.2 实验要求

1.2.1 实验预习要求

实验前应仔细阅读实验教材和参考资料,熟悉仪器设备的说明书,了解相关的理论知识.明确实验目的、实验原理、实验内容和注意事项,按要求做好预习报告,知道实验该做什么、怎么做,大概会出现怎样的结果.

1.2.2 实验过程要求

实验过程中,要严格遵守实验室有关规章制度,正确操作和使用仪器设备.实验安全问题十分重要,学生应按照不同实验的要求,佩戴好个人的防护,同时也要注意用电、用气、热辐射、化学腐蚀等安全问题.每个实验仪器都有具体的指示牌,标明了仪器的正确操作步骤和最重要的注意事项,需要仔细阅读.实验时,需要填写实验记录表,把测量的原始数据记录下来,同时实验过程中遇到问题,也需要记录下来,与老师共同寻求解决方案,最后要附在实验报告里.实验结束后,要把仪器设备恢复到初始状态,把有关的实验用品整理好才能离开,如有仪器设备损坏,必须及时报告老师.

1.2.3 实验报告要求

实验报告应简单明了、语言通顺、图表规范完整.实验报告内容应包括:实验原理简述、实验步骤、实验数据(实验原始记录表)、实验结果分析(含图表)、实验讨论和思考题.按时提交实验报告.

1.2.4 实验完成后要求

实验课程完成后学生在知识结构和实验技能方面应达到以下要求:

- (1) 对整个集成电路工艺流程、半导体材料与器件特性表征方法有一个比较全面的了解;
- (2) 能够熟练掌握常见的半导体工艺设备和测试仪器,进一步巩固和加深对集成电路器件的理解,综合运用所学知识提高独立设计集成电路器件的能力;
- (3) 能根据实验要求熟练查阅手册及有关的参考资料,通过独立思考,深入钻研有关问题,培养自己独立分析问题、解决问题的能力,具有一定的创新能力;
- (4) 准确分析实验结果,认真撰写实验报告及设计报告,要求文理通顺、说理清楚、立论准确;
- (5) 通过完成综合实验,培养学生独立解决实际问题的能力,提高学生的科研素质与创新意识.

1.3 洁净室简介

半导体器件制造必须要在一个洁净无污染的环境中进行,基本原则是要有一个封闭的空间,由非污染物建造,并能提供洁净的空气,还包括可以防止由外界或操作人员带入的意外污染.

洁净室是指能将一定空间范围内的空气中的微粒子、有害空气、细菌等污染物排除,并将室内温度、洁净度、室内压力、气流速度与气流分布、噪声振动及照明、静电等控制在某一需求范围内而特别设计的房间.也即是不论外在空气条件如何变化,其室内均能具有维持原先所设定要求的洁净度、温湿度及压力等性能特性.按照国际惯例,无尘净化级别主要是根据每立方米空气中粒子直径大于划分标准的粒子数量来规定的.也就是说所谓

无尘并非百分之百没有一点灰尘,而是控制在一个非常微小的单位级别上.当然这个标准中符合灰尘标准的颗粒相对于我们常见的灰尘已经是小得微乎其微,但是对于半导体制造而言,哪怕是一点点的灰尘都会产生非常大的负面影响,所以在半导体器件生产上,无尘是必然的要求.每立方米将小于 $0.3\mu\text{m}$ 粒径的微尘数量控制在 3500 个以下,就达到了国际无尘标准的 A 级.目前应用在芯片级生产加工的无尘标准对于灰尘的要求高于 A 级,这样的高标准主要被应用在一些等级较高的芯片生产上. $5\mu\text{m}$ 及以下的微尘数量被严格控制在每立方米 1000 个以内,这也就是业内俗称的 1K 级别.

目前,一般半导体工艺洁净实验室主要由以下几个功能区组成:更衣区、风淋室、纯水间、空调机房和工艺实验工作区.

更衣区作为洁净室与外界的缓冲部分,用于放置洁净服.工作人员必须在此区域更换洁净服,进入洁净室的物品也必须在此清洁.

风淋室是连接洁净室和更衣区的部分,工作人员进入风淋室,高速流动的空气可以吹落洁净服外面的颗粒.风淋室采用互锁系统,可以防止前后门同时打开.

工艺实验工作区是器件制造的主要场地,回风空气经过一系列过滤器,以均匀平行的方式流出,为洁净室提供洁净的空气,使之达到相应的洁净级别.

为了维持洁净室的高洁净度,除了建立一个完整的空气循环系统外,日常对其维护是很重要的.洁净室的污染源来自于工作人员、仪器、实验用品(实验材料、化学药品等),其中工作人员是最大的污染源,即使一个经过风淋的工作人员,当他坐着的时候,每秒钟也可释放 10 万到 100 万个颗粒,活动的时候,就会释放得更多.因此,进入洁净室,工作人员要把身体的每个部位罩住,也就是从头到脚都要在洁净服里面.

1.4 实验室安全与注意事项

实验室是进行科学研究和实践的地方,有大量的仪器设备、实验材料和特殊的实验环境.各类实验室装备不同,实验环境要求也不同.学生进入实验室学习一定要养成良好的实验习惯,严格执行实验室给出的各项具体的操作规程和安全防护规则,确保人身安全和仪器安全.

在半导体制造和器件测试的过程中,也存在着广泛的安全隐患,如化学溶液(腐蚀或有毒)、压缩气体、高温、高压电、辐射、机械危险等.特别是进入洁净室前,必须学习如何使用这些材料和仪器,了解相关的安全准则.

1.4.1 化学溶液使用安全

工艺实验的洁净室内要用到大量的化学溶液,如酸类药品(浓硫酸、浓盐酸、浓硝酸、氢氟酸、浓磷酸、醋酸)、碱类药品(氢氧化钠、氢氧化钾、TMAH、氨水)和有机药品(甲苯、丙酮、乙醇、异丙醇),要正确安全使用这些化学药品,以及学习一些急救措施.

使用化学试剂前,要先看清楚标签和注意事项,或者查阅相关的安全资料,查明是否会对人体造成伤害,药品使用完毕要放回原位.特别关注以下的操作规范:

- (1) 使用强酸和碱类药品前,应戴上耐酸碱手套,穿上塑胶围裙,并戴上防护面罩;

(2) 使用有机药品时,应戴上乳胶手套,并戴上防护面罩;

(3) 在配置浓硫酸溶液时,浓硫酸应最后缓慢加入水溶液中,并用石英棒不断地搅动,绝对禁止把水溶液倒入浓硫酸中,以免飞溅伤人;

(4) 使用氢氟酸时,务必使用塑料容器,严禁使用玻璃容器,氢氟酸溶液使用完毕后,应把残液倒入废弃氢氟酸桶内,严禁直接倒入下水管道。

酸废液需稀释后方可倒入酸碱腐蚀槽内(氢氟酸废液除外),切不可任意倾倒,更不可与有机溶液混合。尤其是浓硫酸废液需稀释后并等溶液完全冷却,方可倒入酸碱腐蚀槽内;碱废液需稀释后方可倒入酸碱腐蚀槽内,切不可任意倾倒,更不可与有机溶液混合。

若不慎接触到化学有毒溶液,以下介绍一些紧急处理方法:

(1) 皮肤或眼睛接触浓硫酸切忌用水冲洗,先用棉布吸取浓硫酸,再用大量水冲洗,接着用3%~5%的碳酸氢钠溶液中和,最后用水清洗;

(2) 皮肤接触氢氟酸时,先用大量清水冲洗较长时间,直至伤口表面发红,然后用3%~5%的碳酸氢钠溶液洗,再以甘油和氧化镁(2:1)悬浮剂涂抹,最后用消毒纱布包扎;

(3) 眼睛接触氢氟酸时,应先用大量水冲洗,再用3%~5%的碳酸氢钠溶液清洗;

(4) 皮肤或眼睛接触浓盐酸、浓硝酸、浓磷酸或醋酸时,应先用大量水冲洗,再用3%~5%的碳酸氢钠溶液清洗;

(5) 皮肤或眼睛接触碱类药品应先用大量水冲洗,再用2%的乙酸溶液清洗;

(6) 皮肤接触有机药品时,应用清水和肥皂水彻底冲洗;

(7) 眼睛接触有机药品时,提起眼睑,用流动清水或生理盐水冲洗。

此外还要注意其他安全事项:

(1) 在倾注或加热溶液时,不要俯视容器,以防溅在脸上或皮肤上;

(2) 使用药品时,应在通风橱中完成。加热液体时,或超声有机溶液时,应关闭好橱柜门,以免液体飞溅伤人;

(3) 溶液配置完毕后,应在容器上贴上标签,注明所配置溶液的名称;

(4) 在工作时,应养成良好的工作姿势,上身应避免前倾入通风橱中,除避免危险外亦减少污染机会;

(5) 无论晶片处于清洗还是腐蚀状态,绝不可轻忽省略,擅自离开;

(6) 化学药品外泄时应立即向工作人员汇报,并作适当处理,若有撤离需要时应按照指示撤离。

1.4.2 仪器使用安全

使用仪器前要先了解仪器的性能、配置和正确操作方法,严禁拆卸零件及附件,不能私自调整仪器的参数。

曝光机使用时,应注意以下安全事项:

(1) 光刻胶不能在日常白光下打开,需要戴防护手套,避免与化学药品直接接触;

(2) 汞灯电源冷却风机停转或发生某种故障时禁止使用电源;

(3) 汞灯触发时存在很高的电压和电磁干扰,务必注意人身安全和电子器件的干扰;

(4) 在测量光强度和调整汞灯时,不要直视光源,要戴好防护眼镜,以免紫外光灼伤眼睛;

(5) 汞灯灯泡饱含水银,水银是危险材料,应小心对待,汞灯光源运行中会达到较高温度,要注意热防护。

氧化扩散炉运行时,炉内温度可以达到 1000℃,注意热防护,避免直接触碰炉体;硅片和扩散源送入炉体时,必须佩戴绝热手套。

电阻蒸发镀膜机使用时,需要用到机械泵和分子泵抽真空,注意分子泵的使用安全,当分子泵高速旋转时,切勿触碰。在搬运玻璃钟罩的过程中,小心掉落破碎。

1.4.3 用电安全

电气设备与电缆要保证有良好的绝缘和接地,在带电设备上操作时,决不能用金属笔、金属尺,或佩戴戒指、手表。当手、脚或身体在有汗、水湿的情况下,不能触碰电气设备。

对于一些高压设备,操作过程中身体切勿触碰仪器的电压输出端,以防触电。

当忽然停电、停水时,应立刻切断仪器设备的电源和水源开关,以防来电、来水时,因无人在场发生意外事故和水淹事故。

1.4.4 用气安全

打开气瓶时,必须观察流量计,避免因充气过度使仪器损坏;气体使用完毕,必须把气瓶的总开关闭。

附录 《洁净室安全卫生工作管理条例》

(1) 进入洁净室前,必须知会管理人员,并通过基本训练;

(2) 进入洁净室严禁吸烟、饮食,除规定纸张和物品外,其他物品一概不得携带进入洁净室,并严禁嬉闹奔跑;

(3) 进入洁净室前,需在洁净室外脱去外鞋,将鞋放置于鞋柜内;

(4) 进入风淋室前,需从更衣区的衣柜中取出洁净服,依程序穿着洁净服,把鞋子、帽子整理好,佩戴好手套和口罩;

(5) 洁净服穿好后,排队通过风淋室,去除灰尘后才能进入洁净室;

(6) 不论进入或离开洁净室,须按规定在更衣区内穿脱洁净服,不可在其他区域,尤其是不可在洁净室内边走边脱;

(7) 洁净服应定期清洗,有破损、脱线时,应及时换新;

(8) 脱下洁净服后必须把洁净服叠好,放进衣柜相应的位置;

(9) 更衣区的衣柜,除了放置洁净服等规定物品外,不得放置其他物品;

(10) 洁净服等不得携带出洁净室,用毕放置于规定的地方;

(11) 任何物品进入洁净室前,必须用酒精擦拭干净;

(12) 任何设备进入洁净室前,请先知会管理人员,在洁净室外擦拭干净后方可进入;

(13) 禁止使用未通过安全考核的仪器,若遇紧急情况,必须依照紧急处理步骤作适当处理,例如关闭水、电、气体等开关。

第2章 半导体工艺实验

本章介绍了半导体器件制造工艺中的六个主要单项工艺实验,每项单项工艺将对应介绍工艺的基本原理,展示工艺设备的主要构造组成,实践工艺流程步骤,进行工艺效果的检测,以使学生对半导体工艺技术有一个深入的了解,提高学生的工艺实验技能,同时加深对半导体制造相关专业理论知识的理解。

内容安排如下:2.1节介绍器件制造核心工艺——光刻中使用到的光掩模版;2.2节介绍工艺流程中的5种工艺原理:热氧化工艺、光刻工艺、刻蚀工艺、扩散工艺和金属化工艺;2.3~2.8节是六个单项实验,包括硅片清洗、热氧化工艺、光刻工艺、湿法刻蚀工艺、磷扩散工艺和金属蒸镀工艺实验。

2.1 光掩模版介绍

光刻是集成电路制造工艺中的一个重要环节。微电子技术以惊人的速度发展,离不开光刻技术的进步,包括掩模制造技术的改进。随着集成电路设计工艺的发展,对掩模版品质的要求也逐步趋向更为严格。通常来说百分之八十以上的工艺控制误差产生于光刻工艺这一步骤,如关键线宽尺寸误差、同一尺寸线宽在掩模版上不同位置上的均一性分布误差、掩模版图形成像及分辨率等,目前都已成为光刻和显影工艺所面对的重要挑战。本章在工艺实验之前先介绍一下掩模版和几个关键的单项工艺。掩模版是微电子器件制备中的关键要素,也是连接器件设计与工艺设计的主要桥梁。利用光刻技术,可以把设计的图案通过光刻胶转移到硅片上。后续的刻蚀工艺,则可以继续把光刻胶图案转移到薄膜上,一个现代的微电子工艺通常需要几十块掩模版。

掩模版是在玻璃底板表层镀铬,使掩模版表面覆盖许多电路图形的副本,将用于整个晶圆表面形成图形(图2.1.1)。

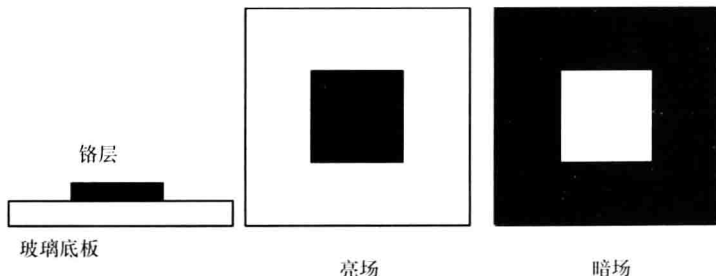


图2.1.1 在玻璃板上镀铬形成光掩模版

在本教材的实验中一共会用到五块掩模版,它们分别是:n掺杂窗口、p掺杂窗口、栅氧/氧化层图案、接触窗口、金属图案。

这些掩模版是由版图设计软件人工设计或通过计算机辅助设计软件自动产生. 版图查看软件打开掩模版图形文件后, 可以用多层叠加的形式查看版图. 这里的每一层版图, 都由很多闭合的集合图形组成. 这些几何图形, 就对应工艺流程中的一块掩模版上的金属图案或者透明窗口. 图 2.1.2 为我们使用的五块掩模版的对应版图文件. 在五层版图同时显现的时候, 会以不同的颜色和纹理图案来区分. 比如最上端版图标号, 就属于不同层的掩模版.

我们使用的是接触式曝光机, 所以掩模版曝光区域的大小是和硅片的大小一致的. 每块掩模版上, 都会有很多相同的芯片区域 (die). 如图 2.1.2 所示, 在我们这套用在 3 英寸硅片的掩模版上, 一共有 32 个 die. 每个 die 的尺寸是 48mm^2 ($8\text{mm} \times 6\text{mm}$). 在典型的半导体器件生产中, 每个 die 对应的就是一个芯片的裸片. 而从做实验的角度出发, 每个 die 在空间上处于硅片的不同区域, 可以反映出工艺均匀性方面的偏差. 均匀性是半导体工艺中最重要的指标之一, 也是半导体工艺工程师在设备研发和工艺调整过程中攻坚的主要内容. 由于光刻工艺处在其他工艺流程之前, 并且直接影响工艺在图案上的均匀性, 所以保证光刻工艺的均匀性显得尤为重要.

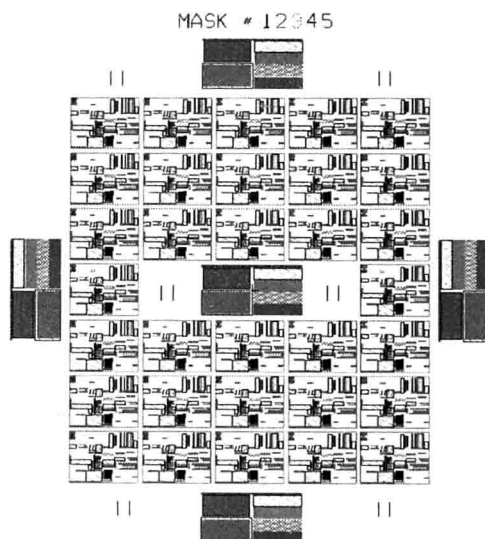


图 2.1.2 光掩模版全图

通过对掩模版版图的查看, 可以了解到每块掩模版上的图案. 而通过比对不同层间的图案的重合情况, 一个有经验的微电子工程师能很轻易地解读这些器件. 下面是我们准备制备的两种典型器件的版图:

(1) MOS 器件光掩模图案, 沟道宽度是 $8\mu\text{m}$ (图 2.1.3);

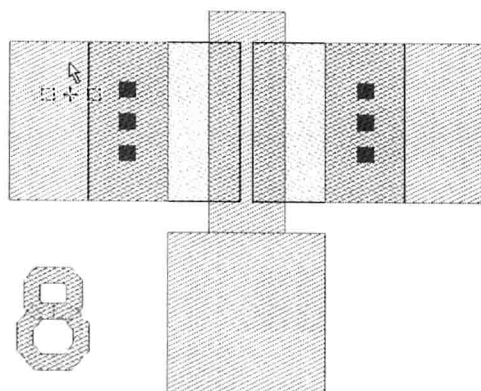


图 2.1.3 MOS 器件光掩模图案

(2) BJT 器件光掩模图案(图 2.1.4).

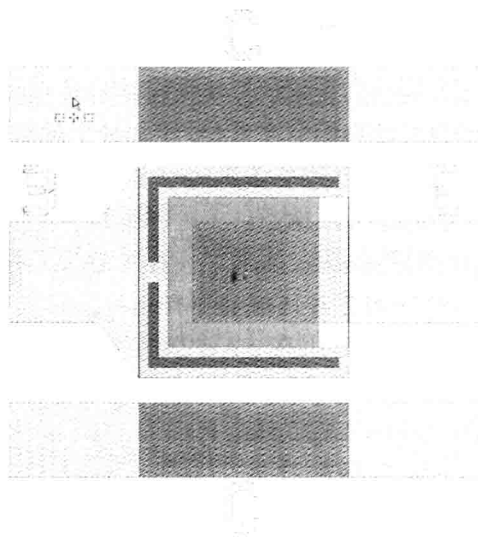


图 2.1.4 BJT 器件光掩模图案

在硅片的其他区域,还有几种辅助结构. 这些经过巧妙设计的结构,为工艺流程的质量监控提供了帮助.

一、曝光及刻蚀检查图案

曝光及刻蚀检查图案,由一系列不同宽度的线和槽组成(图 2.1.5). 图上面的数字标记表明对应线/槽采用的微米单位宽度. 在光刻胶曝光显影过后,我们可以通过检查这些图案了解光刻参数是否适当. 以正胶为例,假若 $1\mu\text{m}$ 的线不见了,那么我们就可以判断出现了过曝光或过显影的情况. 假若 $1\mu\text{m}$ 的槽没有打开,还有光刻胶残留,我们就可以判断出现了欠曝光或欠显影的情况. 同样在刻蚀过程中,这些图案会反映刻蚀工艺是否保留了

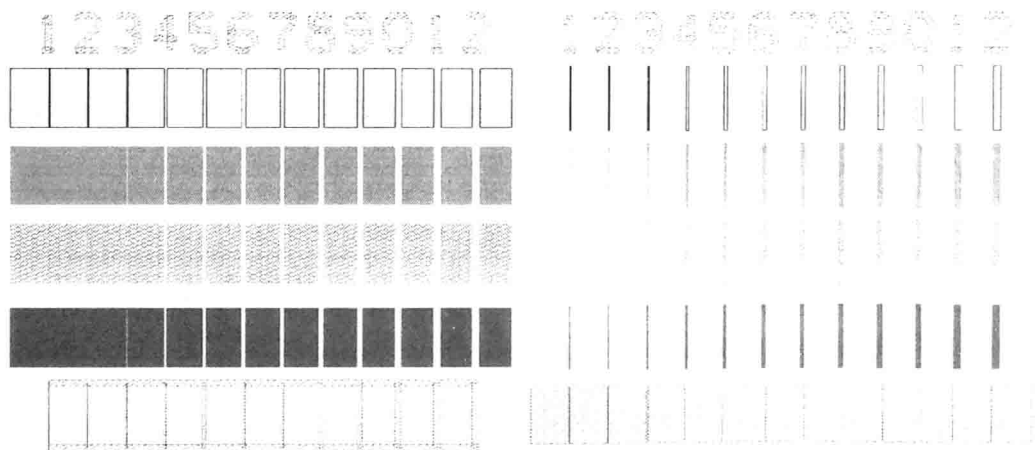


图 2.1.5 曝光及刻蚀检查图案 1

光刻胶的图案. 这些图案的存在与否, 基本可以反映我们的工艺能否再现所设计的器件中的相同尺寸的图案.

下面是另一组典型的曝光及刻蚀检查图案(图 2.1.6). 这些图案由两排错位的矩形构成. 对角相邻的矩形之间会有一定的间隙. 假若显影完成后, 两个矩形的边连接起来了, 我们就可以判断所出来的图形将会比设计的宽了多少. 如果光刻恰当, 我们又经过刻蚀工艺, 原来相连的两个矩形的边断开了, 则这个数量就是刻蚀对图案的横向侵蚀程度有多大.

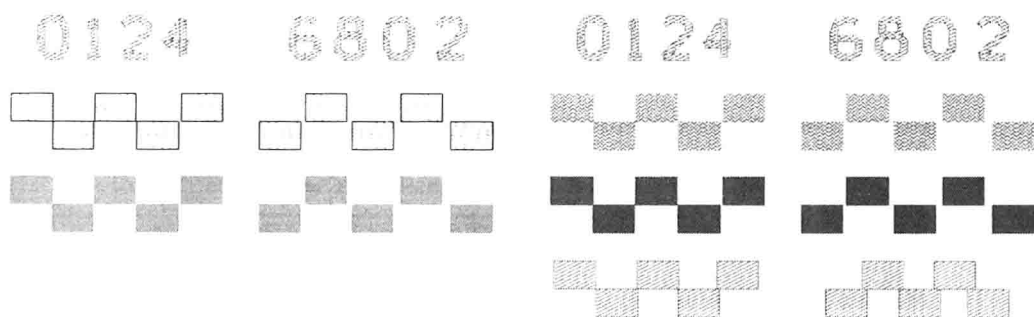


图 2.1.6 曝光及刻蚀检查图案 2

二、套刻对准图案(图 2.1.7)

通过叉丝可以保证对准, 同时旁边的梳状游标尺可以估算套刻对准的偏差.

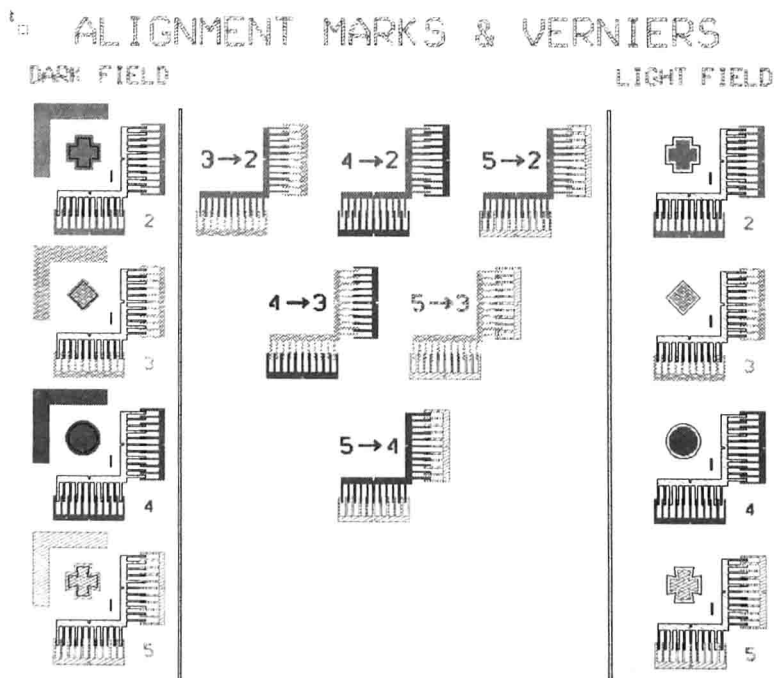


图 2.1.7 套刻对准图案

三、工艺监测窗口(图 2.1.8)

工艺监测窗口用于在各工艺步骤中作检查,以确定工艺的完整性.例如,在刻蚀工艺过后对刻蚀材料残留的检查,在扩散工艺后对掺杂半导体的性质和导电性的检查等.这都需要在版图预留特定的大面积窗口,以便使用接触式的表征设备.

在我们的教学版图中,预留的工艺监测窗口如图 2.1.8 所示,这些监测窗口位于晶圆版图的中间及上、下、左、右四个方位上,以便检查均匀性.这些窗口的宽度约为 5mm,高度为 1~2mm,很容易用肉眼观察和方便使用探针.

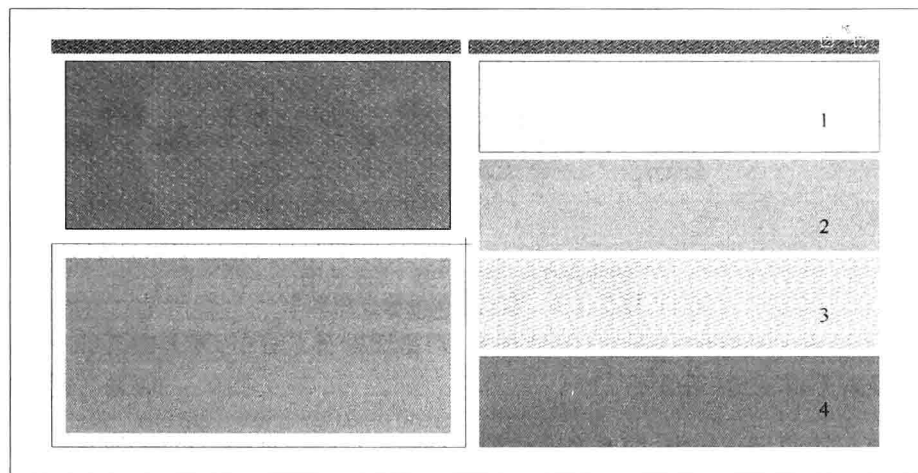


图 2.1.8 工艺监测窗口图案

右列的方块分别属于版图 1~4 层的单个窗口.由于这些版图的区域属于各步骤中氧化膜刻蚀的区域,通过在此区域上观察,便可检查刻蚀是否已经到达衬底.主要的检测方法包括:①使用显微镜观察刻蚀后该区域是否仍然呈现氧化硅的薄膜颜色;②使用膜厚测量仪监测薄膜的厚度.但由于刻蚀的剩余厚度可能较薄,最准确的验证方法是使用热探针或四探针测量该区域是否导电.如果该区域的薄膜呈现导电性,就证明氧化硅薄膜已经刻蚀干净.四探针测量可以获得该区域的薄层电阻,方便确定掺杂的效果.热探针法则可确定掺杂是否让该区域的半导体反型.

左列的方块为叠加的窗口:上面的是版图 1 和版图 4 的叠加,即 p 扩散层版图和通孔层版图,下面的是版图 1、2、4 的叠加,代表 p 扩散层版图、n 扩散层版图及通孔层版图.所以通过这两个区域的监测,可以获得扩散及接触的信息.

2.2 工艺流程介绍

大多数半导体流程都发生在硅片顶层的几微米以内,要制造一块高性能的微芯片,只需要多次运用有限的几种工艺,也就是说整个半导体工艺就是描述硅片怎么在有限的工艺流程中重复循环.但是在工艺循环中,必须意识到工艺中的各种变换,如工艺参数和材

料工具等,这些变换直接影响到最终的测试结果.图 2.2.1 是以一个 CMOS 器件的制作工艺为例,经过 24 个步骤,其中有一些需要循环的步骤,如光刻—刻蚀—去胶,最终形成一个 CMOS 器件.

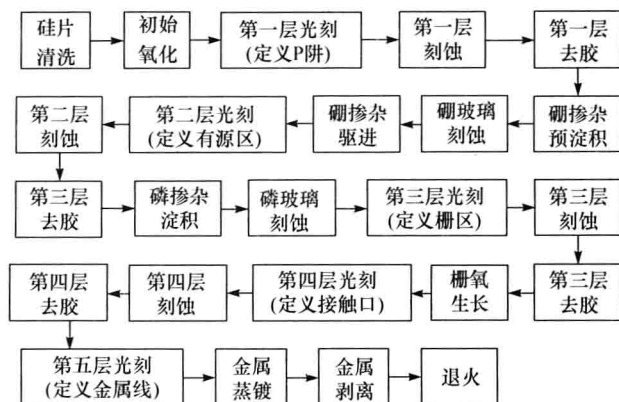


图 2.2.1 CMOS 器件制作工艺

这些制造工艺就是在硅片上执行一系列复杂的化学或物理过程,可以分为四大类:薄膜制作、刻印、刻蚀和掺杂.无论是简单的 pn 结制作还是复杂的集成电路,都是由这四大类工艺组成.以下介绍本工艺实验室用到的 5 种工艺:热氧化工艺、光刻工艺、刻蚀工艺、扩散工艺和金属化工艺.

2.2.1 热氧化工艺

由于氧化物制备容易,并且与硅衬底有着优良的界面,氧化膜对于硅基半导体工艺很重要,其应用有以下几方面:

1) 保护器件免划伤和隔离沾污. 由于二氧化硅是一种坚硬和无孔(致密)的材料,在硅片表面上生长一层二氧化硅层,可作为一种有效的阻挡层,用来隔离和保护硅内的灵敏器件.

2) 限制带电载流子场区隔离(表面钝化). 热氧化形成的二氧化硅可以通过束缚硅的悬挂键,达到降低它的表面态密度的效果,称为表面钝化,能够防止电性能退化,减少由潮湿、离子或其他外部沾污物引起的漏电流通路. 抑制金属层的电荷堆积较厚的氧化层称为场氧化层,典型厚度为 $2500 \sim 15000 \text{ \AA}$.

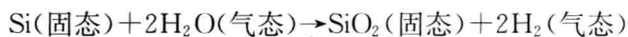
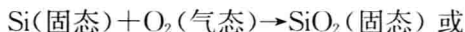
3) 栅氧或存储器单元结构中的介质材料. MOS 工艺中常用的栅氧结构就是用极薄氧化层作为介质材料,二氧化硅具有高的介电强度(10^7 V/cm)和高的电阻率($10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$).

4) 掺杂中的阻挡. 与硅相比,掺杂物在二氧化硅里的移动缓慢,因此二氧化硅作为硅表面选择性掺杂的有效掩蔽层,只需要薄的氧化层就可以阻挡杂质进入. 对于没有二氧化硅保护的硅片表面,掺杂材料可以进入其中,而有二氧化硅保护的硅片表面,可以避免杂质扩散,从而实现选择性杂质注入.

5) 金属导电层间的介质层. 通常情况下,二氧化硅是绝缘体,不能导电,是微芯片金属层间有效的绝缘体,可以防止上层金属和下层金属间短路.

因此,热氧化工艺也是硅平面技术中的一项重要工艺.硅(Si)与含有氧化物质的气体(例如水汽和氧气)在高温下进行化学反应,在硅片表面产生一层致密的二氧化硅(SiO_2)薄膜.

将硅片置于用石英玻璃制成的反应管中,反应管用电阻丝加热炉加热到一定温度(常用的温度为 $900\sim 1200^\circ\text{C}$,在特殊条件下可降到 600°C 以下),氧气或水汽通过反应管时,在硅片表面发生化学反应



生成 SiO_2 层,其厚度一般在几十埃到上万埃之间.硅热氧化工艺,按所用的氧化气氛可分为:干氧化、水汽氧化和湿氧化.干氧化是以干燥纯净的氧气作为氧化气氛,在高温下氧直接与硅反应生成二氧化硅;水汽氧化是以高纯水蒸气为氧化气氛,由硅片表面的硅原子和水分子反应生成二氧化硅,水汽氧化的氧化速率比干氧化的快;而湿氧化实质上是干氧化和水汽氧化的混合,氧化速率介于二者之间.在集成电路工艺中,以加热高纯水作为水蒸气源,而湿氧化则用干燥氧气通过加热的水(常用水温为 95°C)所形成的氧和水汽混合物形成氧化气氛.用高纯氢气和氧气在石英反应管进口处直接合成水蒸气的方法进行水汽氧化时,通过改变氢气和氧气的比例,可以调节水蒸气压,减少沾污,有助于提高热生长二氧化硅的质量.

对硅热氧化动力学的研究表明,除了几个分子层外,硅热氧化是由氧或水分子 H_2O (或 OH^-) 扩散通过已形成的二氧化硅层,在 Si-SiO_2 界面与硅反应而生成二氧化硅.随着氧化过程的进行, Si-SiO_2 界面不断向硅内部推移.当硅生成为二氧化硅时,体积增大 2.2 倍.二氧化硅的生成速率主要由两个因素控制:①在 Si-SiO_2 界面上硅与氧化物反应生成二氧化硅的速率;②反应物(O_2 、 H_2O 或 OH^-) 通过已生成的二氧化硅层的扩散速率.氧化物由两个生成阶段描述:线性阶段和抛物线阶段.

二氧化硅生长的最初阶段是线性阶段,氧化层厚度与氧化时间呈线性关系: $X = (B/A)t$, 式中 X 为生成的二氧化硅厚度, t 为生长时间, (B/A) 是线性速率系数,与硅片晶向密切相关.通常以 (111) 晶向时的 B/A 为最大, (100) 晶向时的 B/A 为最小, $B/A(111)/B/A(100) \approx 1.68$. 温度升高, B/A 值会增加,这意味着氧化速率也会增大.这个线性阶段的有效性使氧化物的厚度大约生长到 15nm, 当 SiO_2 达到一定的厚度时,氧化速率由氧化物通过已生成的二氧化硅膜的扩散速率所控制.这时二氧化硅的生长进入抛物线阶段: $X = (Bt)^{1/2}$, B 为抛物线速率系数,此阶段二氧化硅的生长要比在线性阶段慢得多.这是因为当氧化层变厚时,参与反应的氧扩散必须经过更长的距离才能达到 Si/SiO_2 界面,反应受到氧扩散速率的限制.当抛物线速率系数变大时,氧化物生长速率也会增大,例如湿氧的抛物线速率系数 B 要比干氧大,所以湿氧的氧化速率要快.

2.2.2 光刻工艺

光刻(photolithography)是半导体器件制造工艺中的一个重要步骤,光刻生产的目标是根据电路设计的要求,生成尺寸精确的特征图形,并且在晶圆表面的位置正确且与其他部件(parts)的关联正确.实现图形转移需要经过两步完成:第一步利用曝光和显影在光