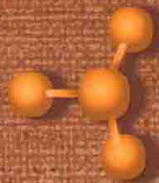


“十二五”国家重点图书出版规划项目



国防科技图书出版基金

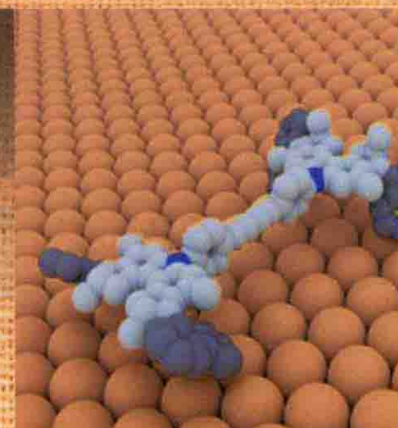


微米纳米技术丛书
MEMS与微系统系列

硅 MEMS 工艺 与设备基础

Fundamentals of Silicon-based MEMS
Processing Techniques and Equipments

■ 阮勇 尤政 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

微米纳米技术丛书 MEMS与微系统系列

微米纳米器件测试技术
微米纳米器件封装技术
聚合物微纳制造技术
MEMS传感器接口ASIC集成技术
RF MEMS器件设计、加工和应用
空间微系统与微纳卫星
微型惯性器件及系统技术
MEMS集成设计技术及应用
微米纳米器件设计
微机电耦合动力学
微纳光纤及其在传感技术中的应用
生化MEMS器件
硅MEMS工艺与设备基础



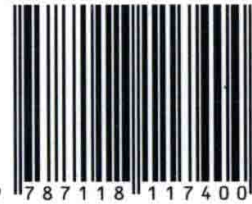
责任编辑：王晓光
责任校对：李娟娟
封面设计：蒋秀芹



► 上架建议：电子技术 ◀

<http://www.ndip.cn>

ISBN 978-7-118-11740-0



9 787118 117400 >

定价：160.00 元



国防科技图书出版基金

微米纳米技术丛书·MEMS与微系统系列

硅 MEMS 工艺与设备基础

**Fundamentals of Silicon-based MEMS
Processing Techniques and Equipments**

阮勇 尤政 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

硅 MEMS 工艺与设备基础/阮勇, 尤政编著.—北京:
国防工业出版社, 2018. 12

(微米纳米技术丛书·MEMS 与微系统系列)

ISBN 978-7-118-11740-0

I. ①硅… II. ①阮… ②尤… III. ①硅基材料—纳米材料—应用—微机电系统 IV. ①TH—39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 297120 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天津嘉恒印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 插页 4 印张 31 字数 550 千字

2018 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 160.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 许西安 谢晓阳

委员 (按姓氏笔画排序)

才鸿年	马伟明	王小谟	王群书	甘茂治
甘晓华	卢秉恒	巩水利	刘泽金	孙秀冬
芮筱亭	李言荣	李德仁	李德毅	杨伟
肖志力	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起	郭云飞
唐志共	陶西平	韩祖南	傅惠民	魏炳波

《微米纳米技术丛书·MEMS与微系统系列》

编写委员会

主任委员 丁衡高

副主任委员 尤 政

委 员 (以拼音排序)

邓中亮 丁桂甫 郝一龙 黄庆安

金玉丰 金仲和 康兴国 李佑斌

刘晓为 欧 黎 王晓浩 王跃林

温志渝 邢海鹰 杨拥军 张文栋

赵万生 朱 健

序

1994年11月2日,我给中央领导同志写信并呈送所著《面向21世纪的军民两用技术——微米纳米技术》的论文,提出微米纳米技术是一项面向21世纪的重要的军民两用技术,它的出现将对未来国民经济和国家安全的建设产生重大影响,应大力倡导在我国及早开展这方面的研究工作。建议得到了当时中央领导同志的高度重视,李鹏总理和李岚清副总理均在批示中表示支持开展微米纳米技术的跟踪和研究工作。

国防科工委(现总装备部)非常重视微米纳米技术研究,成立国防科工委微米纳米技术专家咨询组,1995年批准成立国防科技微米纳米重点实验室,从“九五”开始设立微米纳米技术国防预研计划,并将支持一直延续到“十二五”。

2000年的时候,我又给中央领导写信,阐明加速开展我国微机电系统技术的研究和开发的重要意义。国家科技部于当年成立了“863”计划微机电系统技术发展战略研究专家组,我担任组长。专家组全体同志用一年时间圆满完成了发展战略的研究工作,这些工作极大地推动了我国的微米纳米技术的研发和产业化进程。从“十五”到现在,“863”计划一直对微机电系统技术给以重点支持。

2005年,中国微米纳米技术学会经民政部审批成立。中国微米纳米学术年会经过十几年的发展,也已经成为国内学术交流的重要平台。

在总装备部微米纳米技术专家组、“863”专家组和中国微米纳米技术学会各位同仁的持续努力和相关计划的支持下,我国的微米纳米技术已经得到了长足的发展,建立了北京大学、上海交通大学、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、中国电子科技集团公司第十三研究所等加工平台,形成了以清华大学、北京大学等高校和科研院所为主的优势研究单位。

十几年来,经过国防预研、重大专项、国防“973”、国防基金等项目的支持,我国已经在微惯性器件、RF MEMS、微能源、微生化等器件研究,以及微纳加工技术、ASIC技术等领域取得了诸多突破性的进展,我国的微米纳米技术研究平台已经形成,许多成果获得了国家级的科技奖励。同时,已经形成了一支年富力强、结构合

理、有影响力的科技队伍。

现在,为了更有效、有针对性地实现微米纳米技术的突破,有必要对过去的研究工作做一阶段性的总结,把这些经验和知识加以提炼,形成体系传承下去。为此,在国防工业出版社的支持下,以总装备部微米纳米技术专家组为主体,同时吸收国内同行专家的智慧,组织编写一套微米纳米技术专著系列丛书。希望通过系统地总结、提炼、升华我国“九五”以来微米纳米技术领域所做出的研究工作,展示我国在该技术领域的研究水平,并指导“十二五”及以后的科技工作。

丁衡高

2011年11月30日

前 言

硅微机电系统(MEMS)加工技术是基于硅集成电路技术发展起来的工艺。其发展综合了材料、微电子、物理、化学、机械等学科领域的最新研究成果,应用极其广泛,特别是在微型传感器、执行器领域,作为手段,结合生物、电子等的正在形成的潜在应用,已经成为影响生活、工作的核心关键技术之一。

MEMS 工艺是区别于集成电路的平面型工艺的准三维工艺,在线宽控制、高深宽比刻蚀、多层键合等工艺内容方面与集成电路工艺区别明显,同时新的集成电路与其他微纳加工工艺融合发展也为 MEMS 不断更新完善注入了新的活力。本书在第 1 章首先介绍 MEMS 器件的硅 MEMS 基本工艺、器件和新材料,在此基础上,第 2 章阐述 MEMS 工艺设计规则与工艺误差,第 3 章至第 8 章阐述硅 MEMS 单项工艺,介绍相关工艺原理与典型设备,第 9 章分析列举了典型的硅 MEMS 器件结构的工艺制备,第 10 章和第 11 章介绍圆片键合和封装技术,第 12 章围绕工艺中的参数讨论了检测技术,附录部分对于真空技术、相关药品与安全防护进行总结。本书详细介绍了硅 MEMS 器件所需的工艺与设备,能够让 MEMS 研究人员对硅 MEMS 工艺技术及其主要设备与环境有全面了解。全书主要特色是将工艺原理、设备与实验案例贯通统一考虑,详细讨论典型 MEMS 器件工艺原理和方法与设备、安全防护、动力系统。各章节工艺的支撑均基于实际 4/6 英寸^①半自动设备和技术,适合从事 MEMS 技术研究的工程技术人员参考,使 MEMS 教学与研究人员能够在设计规划之初将设计与工艺实践结合起来,使 MEMS 器件的开发高效顺畅;同时力图将 MEMS 器件研究中困扰的问题,从设备、工艺源头给予解释阐述。本书也可用做高等学校相关专业微机电系统课程教材。

感谢北京大学张大成教授、郝一龙教授、杨振川教授和武汉理工大学孙华君教授的无私帮助,感谢山东淄博高新区 MEMS 研究院和平台公司全体同仁的具体支持。特别感谢许平老师对本书章节和内容的多次讨论和修改建议。在此对为本书提供帮助的各位专家学者一并表示感谢。相信本书能为我国 MEMS 的发展提供绵薄之力。

^① 1 英寸=2.54cm

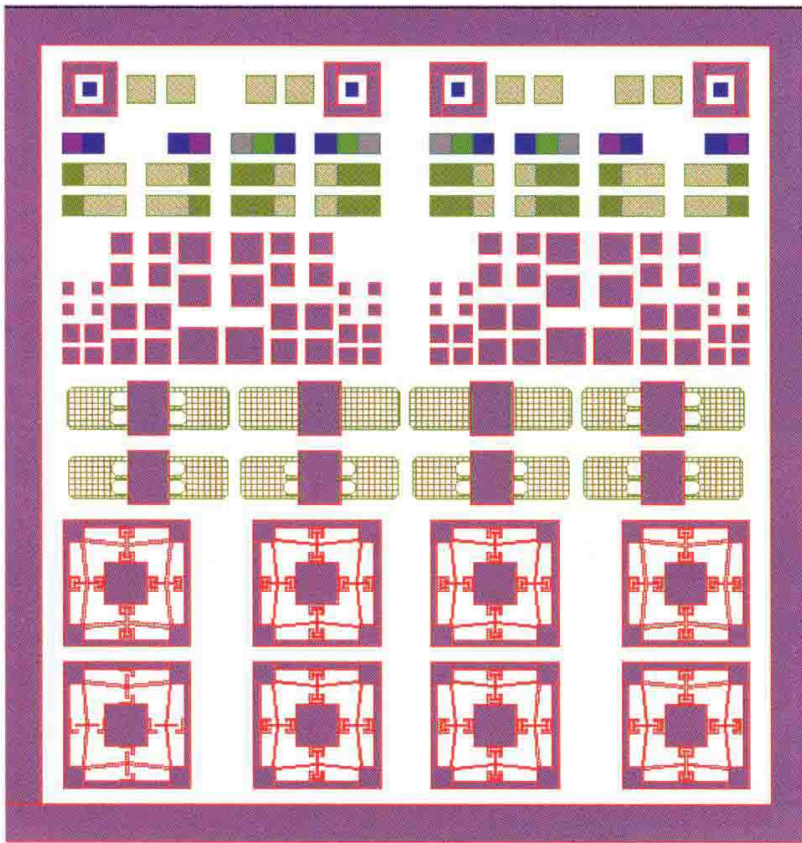


图 2.19 PCM 芯片中常见的测试结构设计图

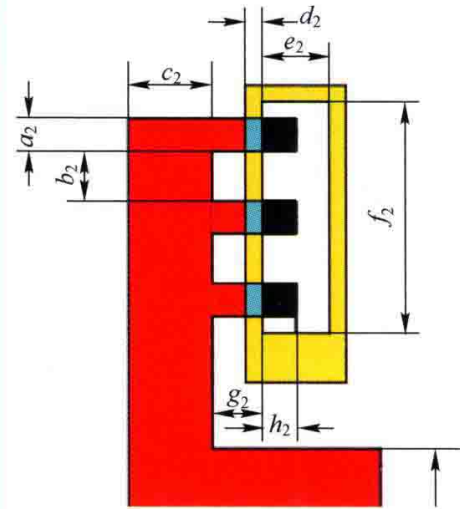


图 2.21 键合标准示意图

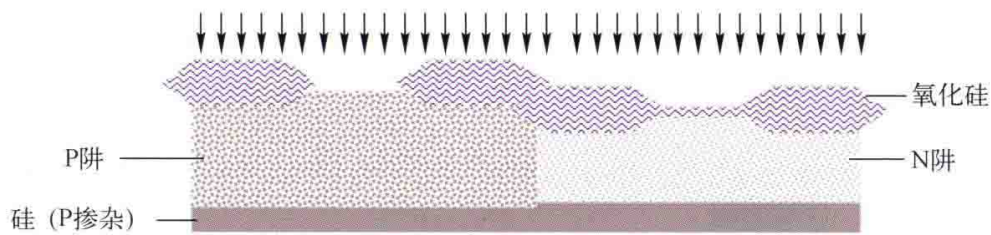


图 4.2 氧化层作掩蔽膜

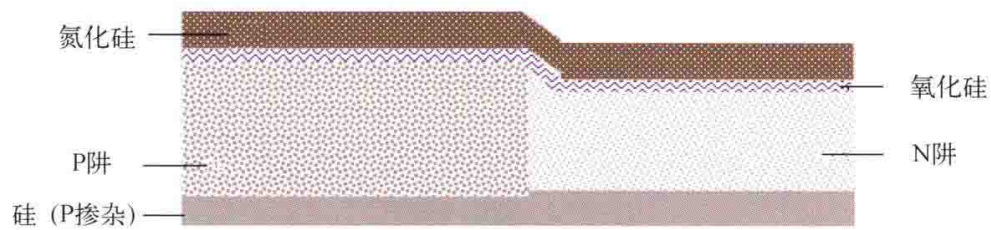


图 4.3 氧化层作缓冲介质层

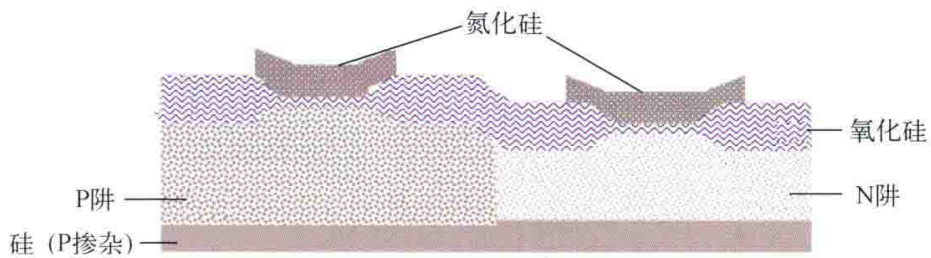


图 4.4 氧化层作隔离介质



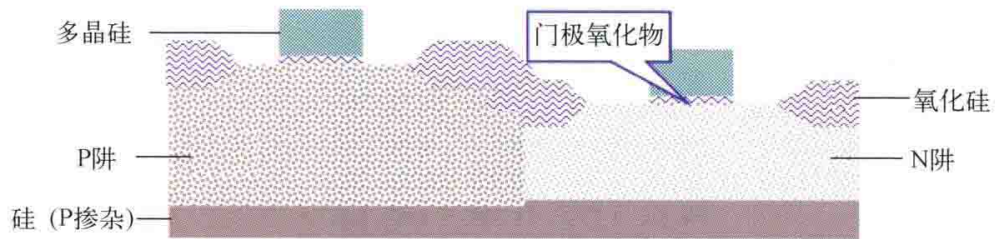


图 4.5 MOS 场效应晶体管的绝缘栅^[10]

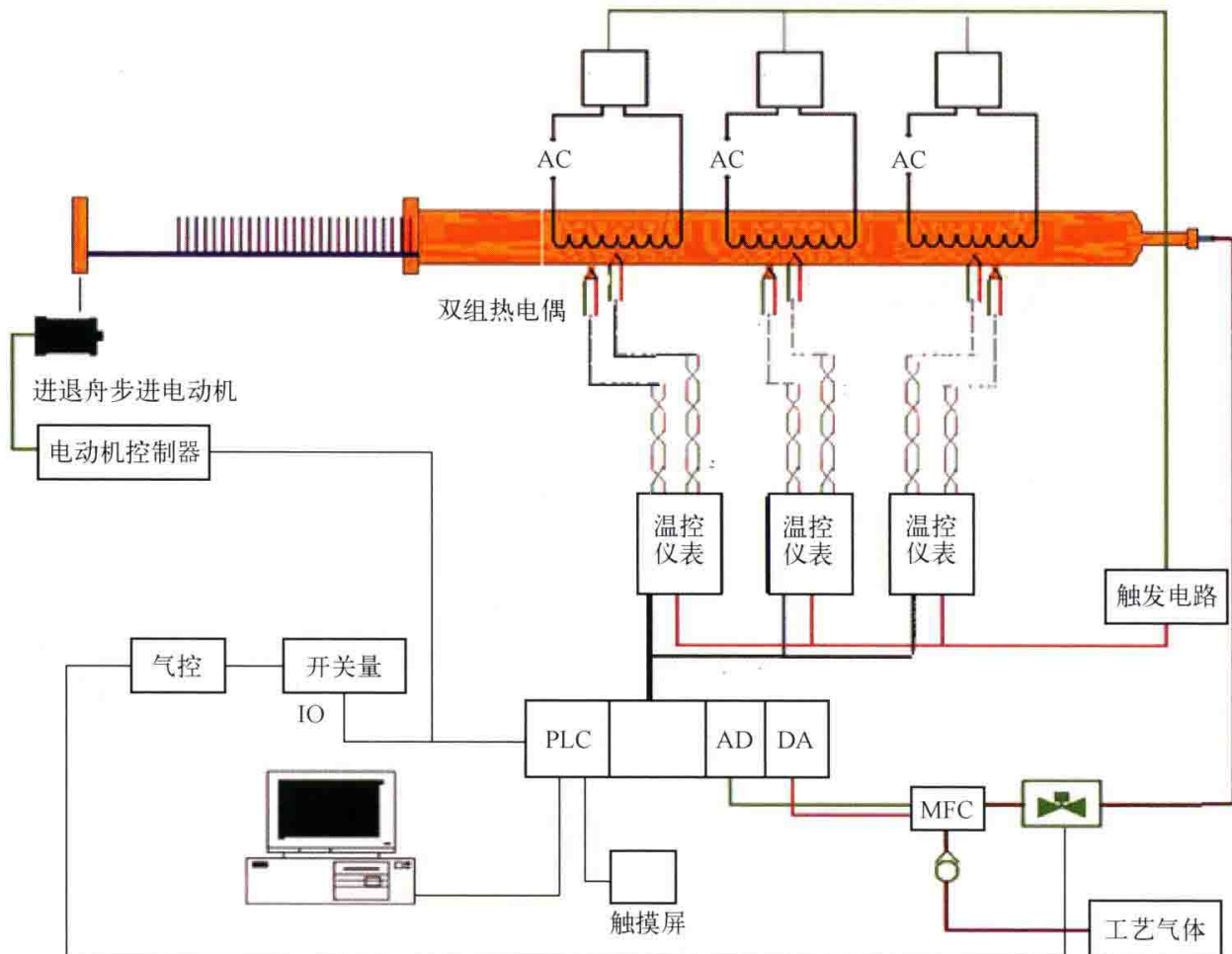


图 4.7 氧化扩散炉原理图

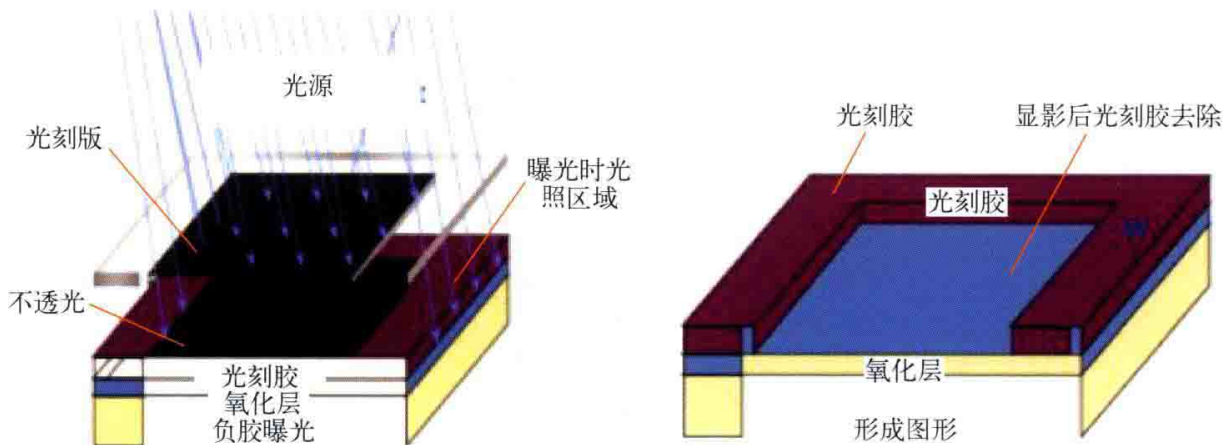


图 5.3 负性光刻原理

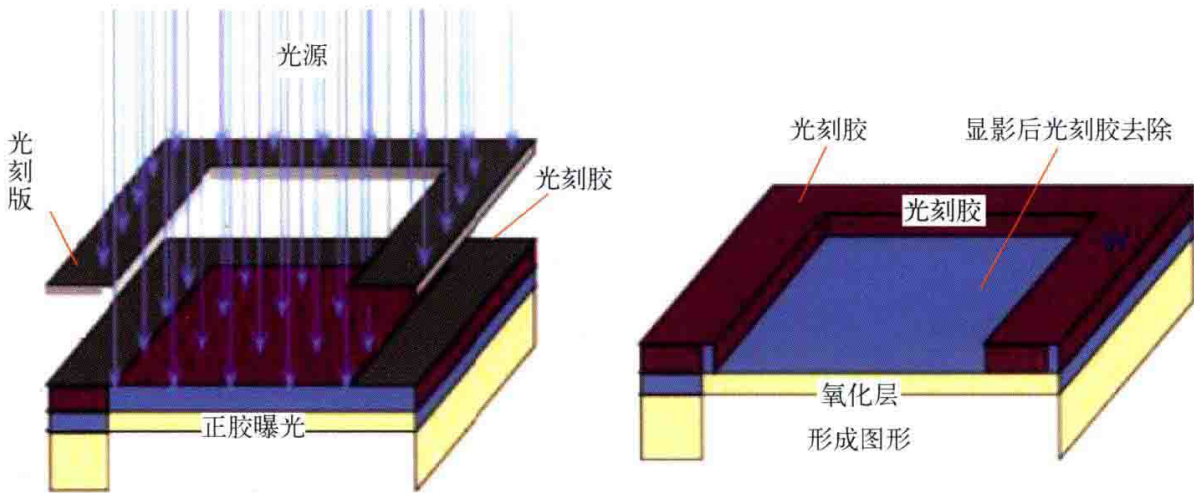


图 5.4 正性光刻原理

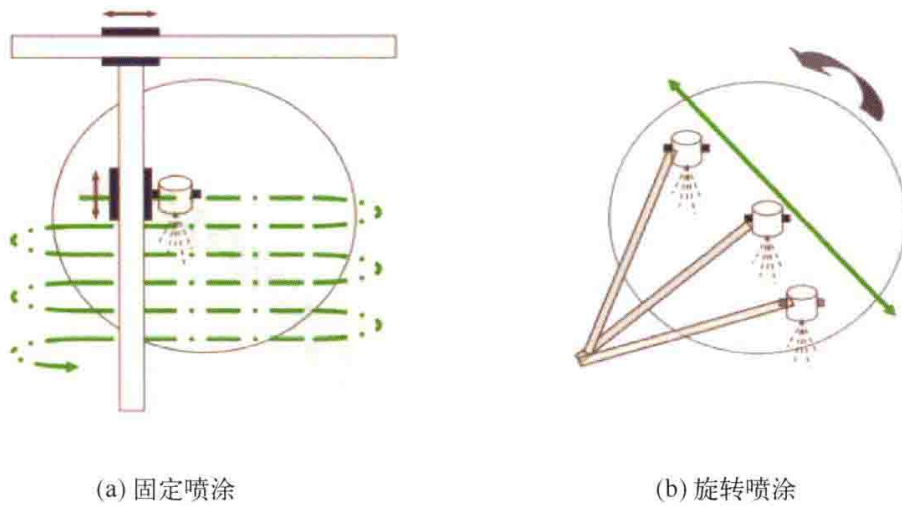


图 5.18 喷雾涂胶机喷胶示意图

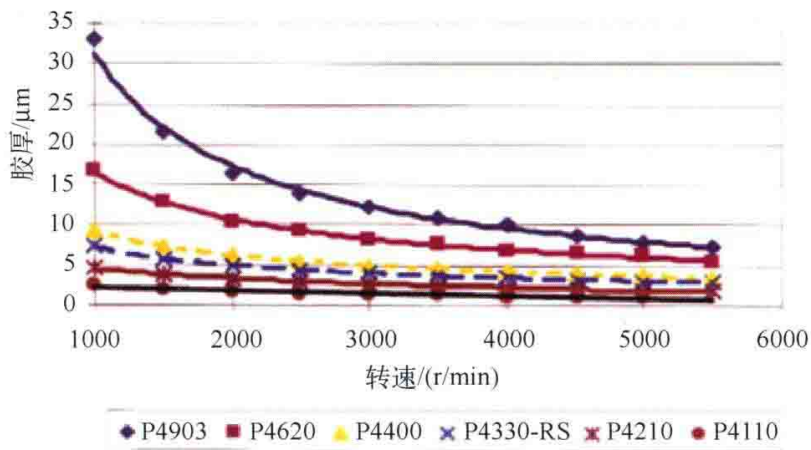


图 5.19 AZ4620 转速与刻胶胶厚关系曲线图

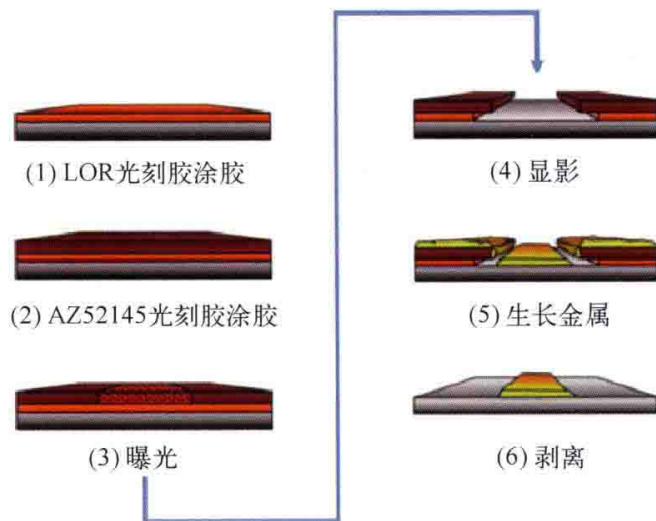


图 5.21 LOR 5B 光刻胶剥离工艺实现流程图

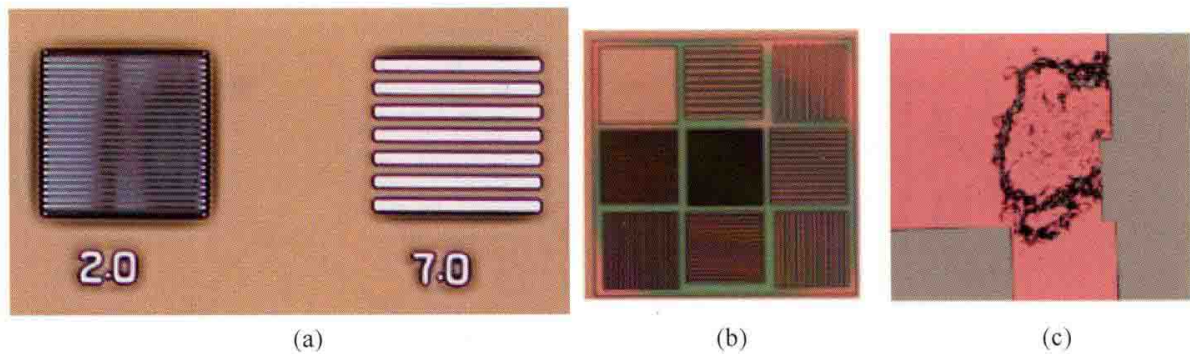


图 5.27 显影中的各种情况

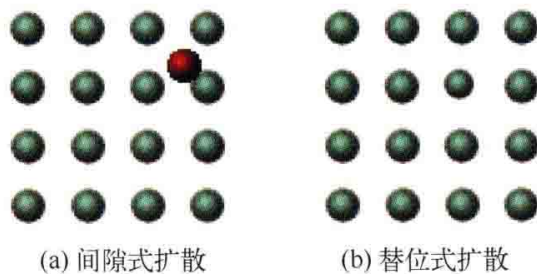


图 7.1 热扩散机制

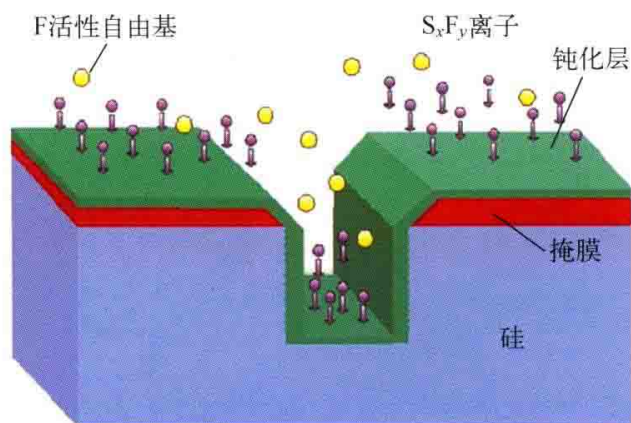


图 8.29 刻蚀打穿钝化层



表 7.4 图

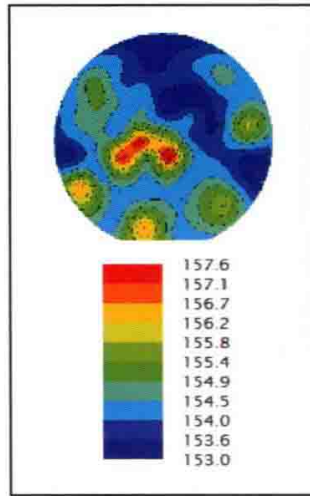


表 7.5 图

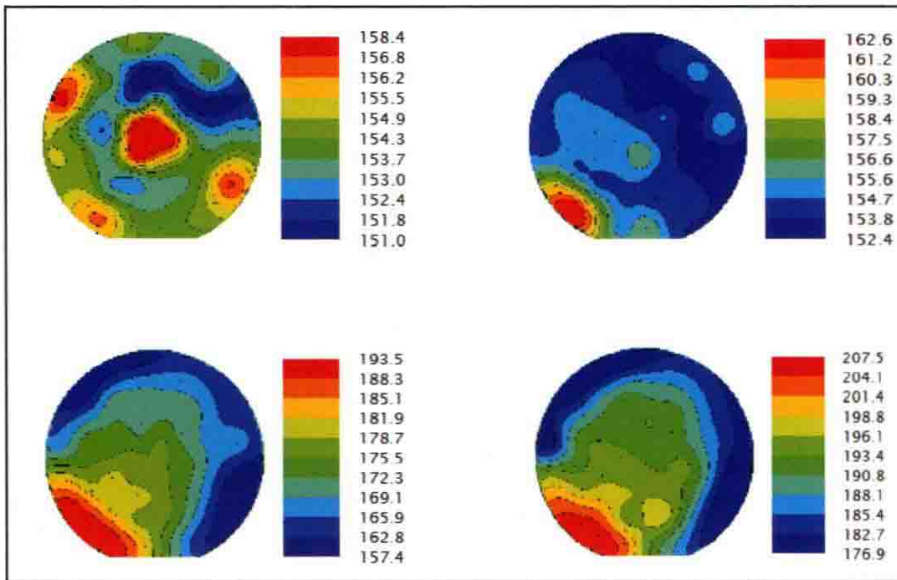
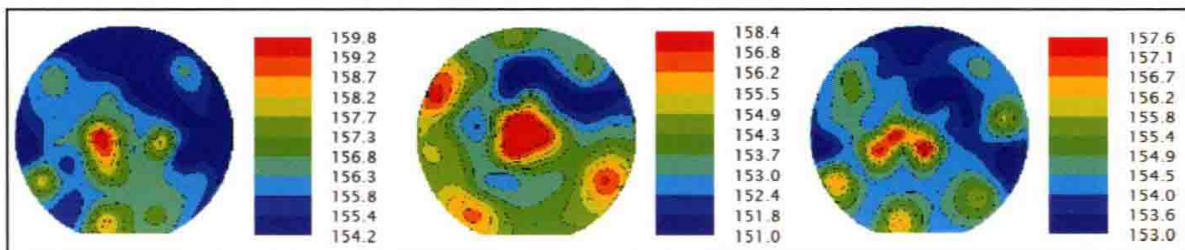


表 7.6 图



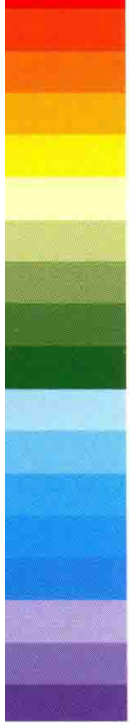


表 7.7 图

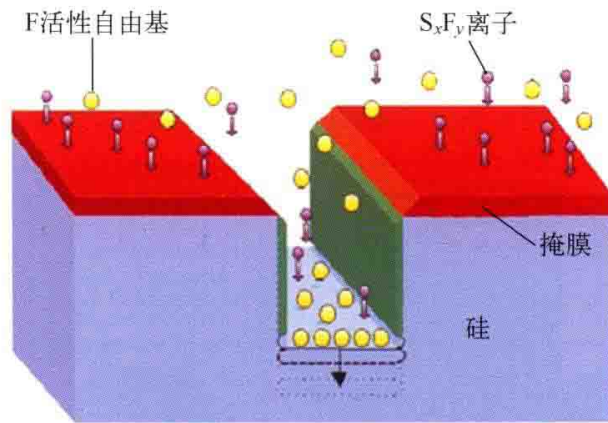
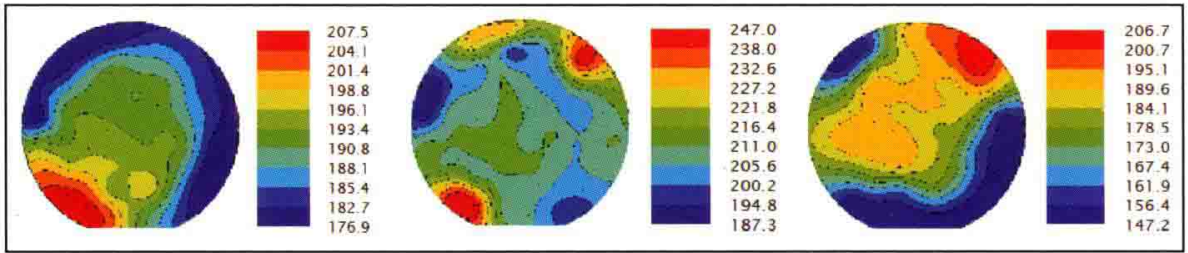


图 8.30 刻蚀基底硅

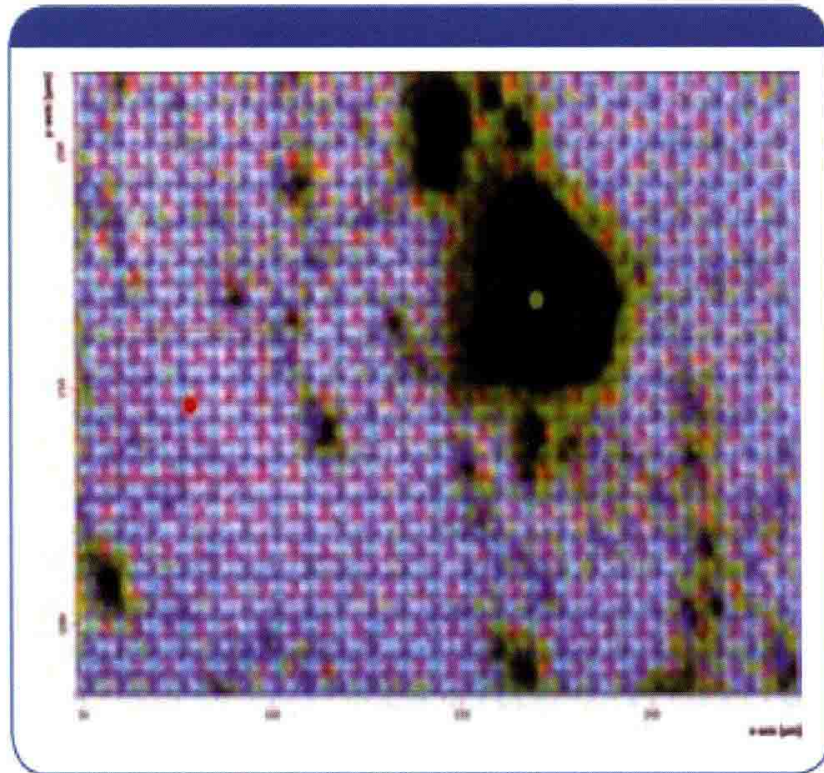


图 12.12 用摄像机拍摄的图像传感器照片（拍摄时采用了放大（Zoom）功能）

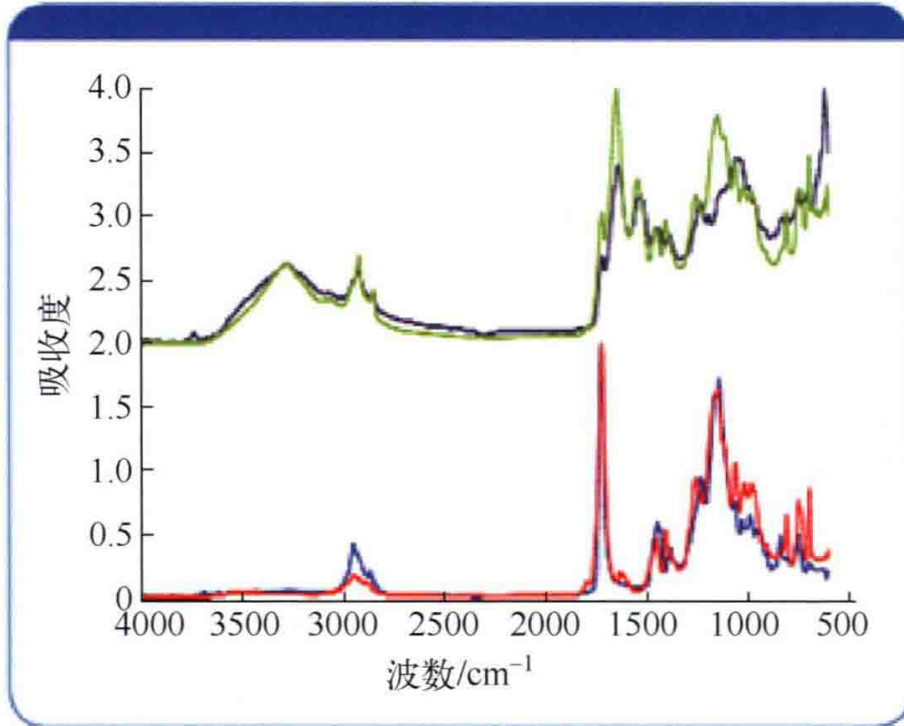


图 12.13 在污染物（上方曲线）和清洁的拜耳矩阵点上采得的谱图以及谱库中对应物质的谱图

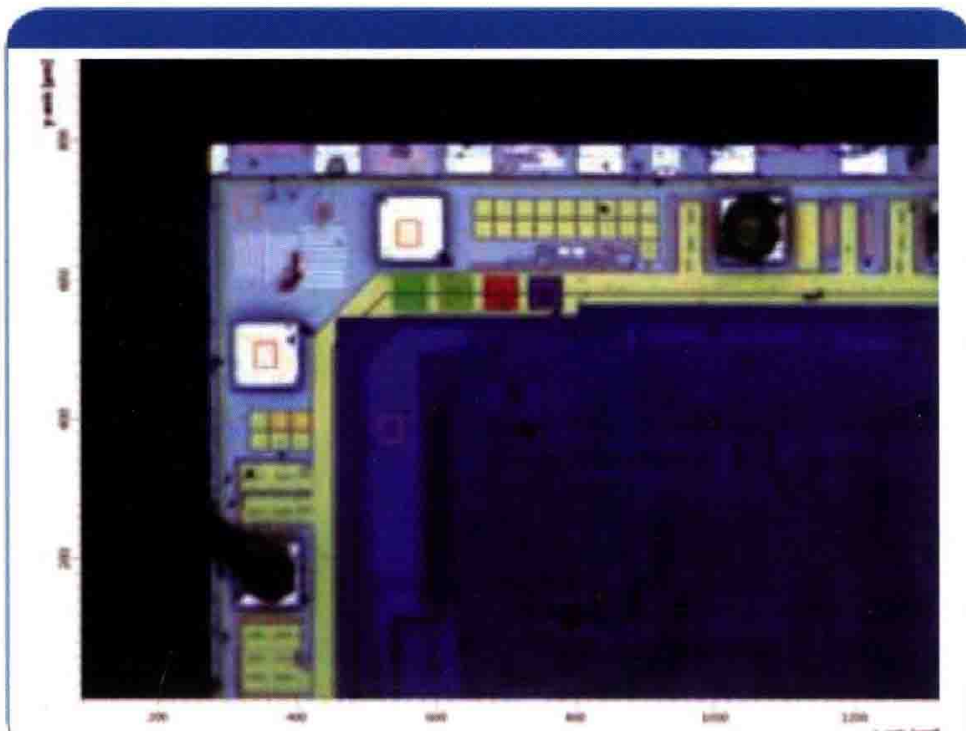


图 12.14 CMOS 图像传感器芯片的一角（采样点用红色矩形框标出）