

国外电子与通信教材系列



半导体晶片清洗

——科学、技术与应用

Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology:
Science, Technology, and Applications

[美] Werner Kern 主编

陆晓东 伦淑娴 于忠党 周涛 译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国外电子

半导体晶片清洗

——科学、技术与应用

Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology:
Science, Technology, and Applications

[美] Werner Kern 主编

陆晓东 伦淑娴 于忠党 周涛 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

半导体制造工艺是实现由材料到分立器件或集成系统的关键,其中清洗工艺是使用最普遍的工艺步骤。本书详细介绍了与分立半导体器件及超大规模集成电路芯片制造相关的各种晶片清洗技术,着重讲解了这些清洗技术的发展过程、基本原理和实际应用问题。全书共分为五部分十三章:第一部分介绍半导体晶片沾污类型、清洗技术的发展历程和演变,以及芯片制造过程中硅片表面微量化学沾污的产生过程;第二部分介绍各种湿法化学工艺技术的原理、工艺方法、工艺参数控制、清洗装置及应用实例;第三部分介绍各种干法清洗工艺技术的原理、工艺方法、工艺参数控制、清洗装置及应用实例;第四部分介绍清洗技术的分析和控制;第五部分介绍清洗技术未来的发展趋势。讲解过程中,本书既重视相关技术的背景知识介绍,又以丰富的图表和数据形式详细剖析了各种清洗技术的原理和应用条件,极大地方便了读者对各种清洗技术的了解和全面掌握。

本书既可作为高等学校电子科学与技术、微电子学与固体电子学、光电子学及光伏等相关专业学生的基础教材或学习参考书,也可作为刚入职半导体行业的从业人员、研究者和相关技术人员的自学教材和参考资料。此外,本书还可作为分立半导体器件制造、集成电路加工和半导体工艺设备生产等公司的工艺培训教材。

Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology: Science, Technology, and Applications.

Werner Kern. ISBN: 0815513313. ISBN: 978-0815513315.

Copyright © 1993 by Elsevier. All rights reserved. Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor. Copyright © 2012 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Published in China by Publishing House of Electronics Industry under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China Mainland. Unauthorized export of this edition is a violation of Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予电子工业出版社在中国大陆发行与销售。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。本书封底贴有 Elsevier 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2012-4986

图书在版编目(CIP)数据

半导体晶片清洗: 科学、技术与应用/(美)克恩(Kern, W.)主编; 陆晓东等译. —北京: 电子工业出版社, 2012.7
(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology: Science, Technology and Applications

ISBN 978-7-121-17397-4

I. ①半… II. ①克… ②陆… III. ①芯片—半导体材料—清洗技术—高等学校—教材 IV. ①TN304

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 131074 号

策划编辑: 谭海平

责任编辑: 谭海平 特约编辑: 王 崧

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司
装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 23 字数: 648 千字

印 次: 2012 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 98.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为作好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

| | | |
|-----|-----|---|
| 主任 | 吴佑寿 | 中国工程院院士、清华大学教授 |
| 副主任 | 林金桐 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师 |
| | 杨千里 | 总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师 |
| 委员 | 林孝康 | 清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 |
| | 徐安士 | 北京大学教授、博士生导师、电子学系主任 |
| | 樊昌信 | 西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士 |
| | 程时昕 | 东南大学教授、博士生导师 |
| | 郁道银 | 天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 |
| | 阮秋琦 | 北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员 |
| | 张晓林 | 北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事 |
| | 郑宝玉 | 南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 朱世华 | 西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员 |
| | 彭启琮 | 电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员 |
| | 毛军发 | 上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 赵尔沅 | 北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任 |
| | 钟允若 | 原邮电科学研究院副院长、总工程师 |
| | 刘 彩 | 中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任 |
| | 杜振民 | 电子工业出版社原副社长 |
| | 王志功 | 东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员 |
| | 张中兆 | 哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长 |
| | 范平志 | 西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长 |

译者序

半导体产业的发展水平是衡量一个国家整体科学技术水平和综合国力的主要指标之一。进入 21 世纪以来,随着经济的快速发展,我国半导体产业也获得了长足的进步,特别是集成电路与光伏产业发展迅猛。例如,在集成电路芯片工艺方面,我国已普遍采用 $0.18\sim 0.13\ \mu\text{m}$ 的工艺技术,部分技术领先企业甚至已实现了 $65\ \text{nm}$ 产品的量产;在光伏产业发展方面,中国已成为世界太阳能光伏电池的主要生产大国,其产业规模已跃居世界第三。但是也必须看到,与国际半导体技术发达的国家相比,我们还存在着较大差距。为了提高我国半导体产业的技术水平,我们一方面要瞄准国际前沿,通过不断开发出具有自主知识产权的新工艺和新设备,加速与国际先进半导体技术接轨;另一方面也需要深入开展许多基础性的研究工作,以便促进我国半导体加工技术整体实力的提高,为半导体技术的进一步发展奠定坚实的技术基础。

半导体技术涉及半导体材料、半导体物理、半导体器件和半导体制造工艺等多方面内容,其中半导体制造工艺是实现由材料到分立器件或集成系统的关键,也是半导体技术的核心内容之一。通常集成电路芯片和分立半导体器件的制造过程十分复杂,往往要经过数十到数百道工序才能完成,但无论是在集成电路还是在分立器件的制作过程中,清洗工艺都是使用最普遍的工艺步骤。尽管清洗工艺与每个加工步骤所要实现的目标无关,但有效控制各步骤的沾污水平却是实现各工艺步骤目标的必要前提,因为清洗技术不仅影响着各半导体工艺步骤的工艺质量,而且还决定了最终加工产品的可靠性和寿命。

就其本质而言,清洗过程就是采用一定的物理或化学方法,将沾污从晶片表面去除的过程,所以其属于交叉学科,涵盖了化学、物理学、工程学、机械学和测量学等相关领域。经过数十年的发展,有些清洗技术已经比较成熟,如湿法清洗工艺,但有些清洗工艺仍处于快速发展过程中,如气相清洗工艺、干法清洗工艺。对不同的沾污类型和沾污水平,往往需要运用多种不同的清洗方法,才能将沾污降到允许的水平,而实现这一过程,就需要深入了解沾污产生的原因、沾污去除的机理和各种监测沾污技术的特点。因此,了解和掌握必要的清洗技术已成为半导体行业从业人员及其研究人员必备的基本知识。

本书详细介绍了与太阳能电池芯片及超大规模集成电路芯片制造相关的晶片清洗技术,着重讲解了这些清洗技术背后的科学与技术原理。全书共分为五部分十三章,第一部分介绍半导体晶片沾污类型、清洗技术的发展历程和演变,以及在芯片制造过程中硅片表面微量化学沾污产生的过程;第二部分重点介绍各种湿法化学工艺技术的原理、工艺方法、工艺参数控制、清洗装置及应用实例;第三部分着重介绍各种干法清洗工艺技术的原理、工艺方法、工艺参数控制、清洗装置及应用实例;第四部分主要介绍清洗技术的分析和控制,包括颗粒沾污物的测量和控制方法、硅片表面的化学组分及表面形态分析方法、电活性沾污物的分析和控制方法、硅片表面微量杂质的分析方法;第五部分主要介绍清洗技术未来发展的趋势。

在写作过程中,作者深入浅出地详细介绍了目前已知的各类清洗工艺及相关检测技术,特别是对于每一种清洗技术,书中利用大量的模拟及实验数据,通过详细、科学的计算分析,非常形象且直观地给出了实际工艺过程的物理本质和动力学原理;优化了每种清洗方法中的工艺参数。通过该书的学习,可使读者了解各种半导体清洗工艺的发展历史和未来趋势,且借助于书中对基本工艺原理和相关实验结果的总结和评述,读者可很容易对各种清洗工艺进行理解、掌握及实际运用。正因为如此,原书自出版后已被引用 400 余次(统计结果截至 2011 年),遥遥领先于其他同类书籍,成为风靡于全球半导体行业体清洗领域的权威著作。

本书由渤海大学半导体材料与器件应用研究所的陆晓东、伦淑娴、于忠党和周涛四位老师共同翻译,其中第 1 章至第 8 章和第 13 章主要由陆晓东、伦淑娴完成,第 9 章至第 12 章主要由于忠党和周涛完成。全书最后由伦淑娴、于忠党统一审校。书籍出版过程中,获得了国家自然科学基金资助(No: 60974071)和辽宁省微电子工艺控制重点实验室的资助。本书在翻译过程中,曾获得陆晓东和周涛老师所带的渤海大学 2010 级微电子学专业的许多同学的帮助,在此表示感谢。鉴于译者和审校者的水平所限,译本中的错误及疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

参 编 者

Donald C. Burkman

Unit Instruments
Yorba Linda, CA

Yves J. Chabal

AT&T Bell Laboratories
Murray Hill, NJ

Bruce E. Deal

Department of Electrical Engineering
Stanford University
Stanford, CA

Donald Deal

FSI International, Inc.
Chaska, MN

Robert P. Donovan

Research Triangle Institute
Research Triangle Park, NC

G. (John) Foggiate

Qeuster Technology, Inc.
Fremont, CA

Donald C. Grant

FSI International, Inc.
Chaska, MN

C. Robert Helms

Department of Electrical Engineering
Stanford University
Stanford, CA

Gregg S. Higashi

AT&T Bell Laboratories
Murry Hill, NJ

Richard S. Hockett

Charles Evans & Associates
Redwood City, CA

Emil Kamieniecki

SemiTest, Inc.
Billerica, MA

Werner Kern

Werner Kern Associates
East Windsor, NJ

Venu B. Menon

SEMATECH, Inc.
Austin, TX

Robert J. Nemanich

Department of Physics
North Carolina State University
Raleigh, NC

Charlie A. Peterson

Empak
Chanhassen, MN

Ronald A. Rudder

Research Triangle Institute
Research Triangle Park, NC

Jerzy Ruzyllo

Department of Electrical and Computer Engineering
The Pennsylvania State University
University Park, PA

Raymond E. Thomas

Research Triangle Institute
Research Triangle Park, NC

Donald L. Tolliver

Motorola/SEMATECH, Inc.
University of Arizona
Tucson, AZ

John R. Vig

U.S. Army Research Laboratory
Department of the Army
Fort Monmouth, NJ

前 言

半导体晶片清洗工艺已成为半导体器件制造过程中最为关键的操作之一，特别是在先进的 ULSI 硅集成电路的制造中。关于这一重要课题，已出版了大量的技术和科学文献。然而，这些文献通常分散在众多期刊及研讨会的论文集中。编写本书的目的是将所有与半导体晶片清洗相关的知识以及与半导体清洗这一课题直接或间接相关的科学和技术原理汇集到一起。本书首次提供了可覆盖这一迅速发展的领域的全面的、最新的知识。本书中的 13 章分别由 19 位科学家撰写，他们都是这些领域内公认的专家。

本书所涉及的范围非常广，涵盖了晶片清洗的方方面面。为了有助于对清洗、测试及评估的分析方法中涉及的化学和物理过程进行理解，本书将重点放在与权威科学背景信息联系在一起的工厂实际应用方面。

这一易于用户使用的手册是在一个为期两天的关于晶圆清洗技术主题的密集课程讲座的基础上编写而成的。该讲座是编者组织的、在旧金山和普林斯顿地区举办的、本书多个章节作者参与的一系列讲座。与会者的强烈反响使我们确信：除了解决迫在眉睫的问题外，这样一本以主题概述的形式，以较深深度处理这种题材的书，确实是值得高度期待的。

在创作满足这一需求的综合手册过程中，每一章的作者或合著团队都为涵盖这一多学科的主题，提供了专业化且互补的专业知识。

本书由以下五部分组成：

1. 简介和概述。
2. 湿法化学工艺。
3. 干法清洗工艺。
4. 分析和控制。
5. 结论和未来的方向。

这些章节中所给出的回顾是在 1992 年中期完成的，涵盖了 1992 年之前的文献。每一章都经过仔细编辑，从而消除了过多的重复。

本书素材的深度和广度对该领域内的新人也具有吸引力。本书的目的是为了给该领域内的从业者或专业技术人员，包括致力于半导体微电子器件生产和发展的工厂工程师、科学家及技术工作者提供一个手册。对于工艺设备生产商、致力于沾污控制和分析的相关人士，以及参加高级或专业技术课程的学生而言，本书同样可起到很大的帮助作用。

最后，我由衷地感谢参编作者，感谢他们在总结浩繁的专业文献以及在准备高质量的章节内容中所付出的巨大努力，还要感谢 Noyes 出版社的副总兼执行编辑 George Narita，感谢他在这次激动人心的探索中所给予的帮助和合作。

Werner Kern
East Windsor, New Jersey

目 录

第一部分 引言和概述

| | |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 半导体晶片沾污与清洗技术的回顾和演变 | 2 |
| 1.1 介绍 | 2 |
| 1.1.1 清洁晶片表面的重要性 | 2 |
| 1.1.2 晶片清洗技术 | 2 |
| 1.1.3 本章的范围和组织结构 | 3 |
| 1.2 硅片沾污情况综述 | 3 |
| 1.2.1 沾污的类型和来源 | 3 |
| 1.2.2 半导体晶片类型 | 4 |
| 1.2.3 沾污对半导体器件的影响 | 4 |
| 1.2.4 避免设备和过程沾污 | 6 |
| 1.2.5 化学沾污 | 6 |
| 1.2.6 分析方法 | 8 |
| 1.3 晶片清洗技术的回顾 | 8 |
| 1.3.1 获得清洁半导体晶片的方法 | 8 |
| 1.3.2 液体清洗方法 | 8 |
| 1.3.3 湿法化学清洗工艺 | 9 |
| 1.3.4 湿法化学清洗工艺的应用 | 12 |
| 1.3.5 硅片冲洗、干燥和存储 | 13 |
| 1.3.6 气相清洗方法 | 13 |
| 1.4 硅片清洗科学和技术的发展 | 15 |
| 1.4.1 从 1950 年到 1960 年的早期 | 15 |
| 1.4.2 从 1961 年到 1971 年 | 16 |
| 1.4.3 1972 年到 1989 年 | 24 |
| 1.4.4 1989 年 10 月到 1992 年年中 | 27 |
| 1.5 小结和结论 | 30 |
| 致谢 | 31 |
| 参考文献 | 31 |
| 第 2 章 硅片表面的微量化学沾污 | 39 |
| 2.1 介绍 | 39 |
| 2.1.1 横向和纵向尺寸 | 41 |
| 2.1.2 一个生产问题, 而非器件的设计要求 | 41 |
| 2.1.3 美国的清洗技术 | 41 |

| | | |
|--------|----------------------|----|
| 2.1.4 | 问题的可见性 | 42 |
| 2.1.5 | 制作过程中表面沾污管理 | 42 |
| 2.1.6 | 砷化镓和其他 III-V 族化合物半导体 | 42 |
| 2.2 | 化学沾污的来源 | 43 |
| 2.2.1 | 超净间的空气 | 43 |
| 2.2.2 | 超净间的人员 | 43 |
| 2.2.3 | 液体源和光刻胶 | 44 |
| 2.2.4 | 处理溶液的材料、成分和系统 | 47 |
| 2.2.5 | 液体及化学药品的存储和输运 | 48 |
| 2.2.6 | 半导体制造中作为表面污染源的高纯工艺气体 | 49 |
| 2.2.7 | 来自热处理工具和系统的化学沾污 | 52 |
| 2.2.8 | 等离子刻蚀、剥离和 RIE 工艺设备 | 53 |
| 2.2.9 | 湿法刻蚀、湿法清洗和干燥的设备 | 54 |
| 2.2.10 | 真空工艺设备 | 57 |
| 2.2.11 | 晶片处理和存储系统 | 57 |
| 2.3 | 杀手缺陷 | 58 |
| 2.3.1 | 微粒密度 | 58 |
| 2.3.2 | 微量金属浓度 | 59 |
| 2.3.3 | 粒子和金属之外的杀手 | 59 |
| 2.4 | 未来的方向和需求 | 59 |
| 2.4.1 | 设备设计 | 59 |
| 2.4.2 | 材料规范 | 59 |
| 2.4.3 | 制造和安装 | 60 |
| 2.4.4 | 表征和评定 | 60 |
| 2.4.5 | 安全和环境要求 | 60 |
| 2.4.6 | 研究和发展方向 | 60 |
| | 参考文献 | 60 |

第二部分 湿法化学工艺

| | | |
|-------|---------------|----|
| 第 3 章 | 水溶液清洗工艺 | 64 |
| 3.1 | 水溶液清洗工艺介绍 | 64 |
| 3.1.1 | 水溶液清洗的优点 | 64 |
| 3.1.2 | 水溶液清洗的缺点 | 64 |
| 3.2 | 沾污和衬底的考虑 | 65 |
| 3.2.1 | 表面效应——束缚沾污的力 | 65 |
| 3.2.2 | 化学吸附 | 66 |
| 3.2.3 | 物理吸附 | 66 |
| 3.3 | 影响水溶液清洗的因素 | 68 |
| 3.3.1 | 预测和增强沾污的溶解性 | 68 |
| 3.3.2 | 刻蚀——一种去除沾污的手段 | 68 |

| | | |
|------------|---------------------|-----------|
| 3.4 | 清洗化学 | 69 |
| 3.5 | 化学药品水溶液清洗工艺的一个例子 | 70 |
| 3.5.1 | 去除有机物 | 70 |
| 3.5.2 | 去除天然氧化物 | 70 |
| 3.5.3 | 去除微粒的同时, 进行氧化物再生长 | 71 |
| 3.5.4 | 金属的去除 | 71 |
| 3.6 | 化学清洗水溶液工艺参数的作用 | 71 |
| 3.6.1 | 改变化学清洗步骤顺序的影响 | 71 |
| 3.6.2 | 浓度的影响 | 73 |
| 3.6.3 | 温度的影响 | 73 |
| 3.6.4 | 湿润的影响 | 74 |
| 3.6.5 | 溶液降级的影响 | 75 |
| 3.6.6 | 载体的影响 | 75 |
| 3.7 | 半导体晶片干燥 | 75 |
| 3.7.1 | 离心干燥 | 76 |
| 3.7.2 | 汽化干燥 | 76 |
| 3.7.3 | 热水干燥技术 | 77 |
| 3.8 | 水溶液清洗的设备 | 78 |
| 3.8.1 | 一般设计的考虑 | 78 |
| 3.8.2 | 晶片清洗装置 | 78 |
| 3.8.3 | 喷射清洗装置 | 79 |
| 3.8.4 | 超声和兆声 | 81 |
| 3.8.5 | 液体置换清洗装置 | 82 |
| 3.8.6 | 使用现场的化工原料 | 82 |
| 3.8.7 | 单晶片清洗装置 | 82 |
| 3.8.8 | 其他清洗技术 | 82 |
| 3.8.9 | 干/湿系统的组合 | 83 |
| 3.8.10 | 冲水和干燥 | 83 |
| 3.9 | 结论 | 84 |
| | 参考文献 | 84 |
| 第4章 | 微粒的沉积和黏附 | 88 |
| 4.1 | 介绍 | 88 |
| 4.2 | 气溶胶微粒的沉积 | 88 |
| 4.3 | 液槽的微粒沉积 | 96 |
| 4.3.1 | 水溶胶和气溶胶微粒沉积机制的对比 | 96 |
| 4.3.2 | 胶体化学的概念 | 97 |
| 4.3.3 | 界面动电势和微粒沉积 | 100 |
| 4.3.4 | 离子浓度对电偶层排斥力(EDR)的影响 | 103 |
| 4.3.5 | 范德瓦尔斯吸引力 | 103 |
| 4.4 | DLVO理论 | 104 |

| | |
|------------------------|-----|
| 4.4.1 溶液 pH 值对胶体沉积的影响 | 105 |
| 4.4.2 疏水性表面 | 107 |
| 4.4.3 在胶体滤除过程中的 EDR 效应 | 107 |
| 4.5 微粒黏附 | 109 |
| 4.6 结论 | 111 |
| 参考文献 | 112 |

第三部分 干法清洗工艺

| | |
|-------------------------------|------------|
| 第 5 章 干法晶片清洗工艺概述 | 116 |
| 5.1 介绍 | 116 |
| 5.2 湿法晶片清洗工艺的局限 | 116 |
| 5.3 IC 制造中, 干法晶片清洗工艺的角色 | 117 |
| 5.4 干法晶片清洗技术所用的设备 | 118 |
| 5.5 干法晶片清洗技术的机理 | 119 |
| 5.6 干法晶片清洗技术总结 | 122 |
| 5.7 试验结果回顾 | 123 |
| 5.7.1 借助物理相互作用的清洗 | 123 |
| 5.7.2 热增强清洗 | 124 |
| 5.7.3 气相清洗 | 125 |
| 5.7.4 增强的光化学清洗 | 126 |
| 5.7.5 等离子体增强清洗 | 129 |
| 5.8 小结 | 131 |
| 参考文献 | 131 |
| 第 6 章 半导体表面的紫外线/臭氧清洗技术 | 135 |
| 6.1 介绍 | 135 |
| 6.2 紫外线/臭氧清洗技术的历史 | 135 |
| 6.3 紫外线/臭氧清洗过程中的变量 | 138 |
| 6.3.1 紫外线源发射的波长 | 138 |
| 6.3.2 样品和紫外线源间的距离 | 139 |
| 6.3.3 沾污 | 139 |
| 6.3.4 预清洗 | 140 |
| 6.3.5 衬底 | 141 |
| 6.3.6 速率增强技术 | 142 |
| 6.4 紫外线/臭氧清洗的机理 | 143 |
| 6.5 真空系统中的紫外线/臭氧清洗 | 144 |
| 6.6 安全考虑 | 145 |
| 6.7 紫外线/臭氧清洗设备的建造 | 146 |
| 6.8 紫外线/臭氧清洗技术的应用 | 147 |
| 6.8.1 硅表面的清洗 | 147 |

| | | |
|------------|-----------------|------------|
| 6.8.2 | 其他半导体表面的清洗 | 149 |
| 6.8.3 | 其他应用 | 150 |
| 6.9 | 紫外线/臭氧的非清洗效应 | 151 |
| 6.9.1 | 氧化 | 151 |
| 6.9.2 | 增强紫外线的除尘作用 | 152 |
| 6.9.3 | 其他的表面/界面效应 | 152 |
| 6.9.4 | 刻蚀 | 152 |
| 6.10 | 概要和总结 | 152 |
| | 参考文献 | 153 |
| 第7章 | 气相晶片清洗技术 | 160 |
| 7.1 | 引言和背景 | 160 |
| 7.1.1 | 一般情况 | 160 |
| 7.1.2 | 水溶液清洗工艺 | 161 |
| 7.1.3 | “干法”清洗工艺 | 161 |
| 7.1.4 | 其他类型的清洗工艺 | 161 |
| 7.2 | 蒸气清洗 | 162 |
| 7.2.1 | 历史 | 162 |
| 7.2.2 | 气相清洗工艺的优势 | 163 |
| 7.2.3 | 目前的气相清洗系统 | 164 |
| 7.3 | 氧化物刻蚀 | 168 |
| 7.3.1 | 热氧化物 | 168 |
| 7.3.2 | 天然/化学氧化物 | 171 |
| 7.3.3 | 淀积的氧化物 | 172 |
| 7.4 | 氧化物的刻蚀机理 | 173 |
| 7.4.1 | 背景 | 173 |
| 7.4.2 | 重要的水溶液化学反应 | 174 |
| 7.4.3 | 气相清洗的机理 | 176 |
| 7.4.4 | 小结 | 179 |
| 7.5 | 杂质的去除 | 180 |
| 7.5.1 | 沾污的类型 | 180 |
| 7.5.2 | 评估技术 | 180 |
| 7.5.3 | 微粒和残留物 | 181 |
| 7.5.4 | 有机沾污 | 181 |
| 7.5.5 | 金属沾污 | 182 |
| 7.5.6 | 金属杂质的去除机制 | 183 |
| 7.6 | 器件应用 | 184 |
| 7.6.1 | 杂质对器件性质的一般影响 | 184 |
| 7.6.2 | 结的性质 | 184 |
| 7.6.3 | 接触/界面特性 | 185 |
| 7.6.4 | 门极氧化物性质 | 186 |

| | |
|------------------------------------|------------|
| 7.7 集成工艺过程 | 188 |
| 7.7.1 概念 | 188 |
| 7.7.2 集成工艺的优缺点 | 189 |
| 7.7.3 集成工艺的要求和考虑 | 189 |
| 7.7.4 与气相清洗有关的应用 | 189 |
| 7.8 结论和概要 | 190 |
| 参考文献 | 191 |
| 第 8 章 硅晶片清洗的远程等离子体工艺 | 197 |
| 8.1 介绍 | 197 |
| 8.2 等离子清洗的标准 | 198 |
| 8.2.1 低温外延生长的清洗 | 199 |
| 8.2.2 淀积 SiO ₂ 的硅界面态的清洗 | 199 |
| 8.3 机理 | 200 |
| 8.4 工艺设备 | 202 |
| 8.5 晶片处理 | 205 |
| 8.5.1 非现场工艺 | 205 |
| 8.5.2 现场工艺: 远程 RF 源 | 206 |
| 8.5.3 现场工艺: ECR 源 | 210 |
| 8.5.4 现场工艺: 远程微波源 | 212 |
| 8.6 结论 | 213 |
| 致谢 | 213 |
| 参考文献 | 213 |

第四部分 分析和控制方面

| | |
|--------------------------|------------|
| 第 9 章 颗粒沾污物的测量和控制 | 218 |
| 9.1 引言 | 218 |
| 9.1.1 适用范围 | 218 |
| 9.1.2 本章结构 | 218 |
| 9.2 液体中的颗粒测量 | 219 |
| 9.2.1 光散射 | 219 |
| 9.2.2 非挥发的残余物监测 | 220 |
| 9.2.3 显微镜检查 | 221 |
| 9.2.4 晶片上的颗粒 | 221 |
| 9.3 化学药品中的颗粒控制 | 222 |
| 9.3.1 生产中使用的化学药品质量 | 222 |
| 9.3.2 去离子水质量 | 224 |
| 9.3.3 化学药品配送系统 | 226 |
| 9.3.4 过滤器的使用点 | 229 |
| 9.3.5 化学药品再加工 | 230 |

| | | |
|---------------|------------------------------|------------|
| 9.4 | 工艺过程中的颗粒控制 | 231 |
| 9.4.1 | 化学工艺的影响 | 231 |
| 9.4.2 | 工艺系统配置 | 234 |
| 9.4.3 | 冲洗和干燥 | 237 |
| 9.4.4 | 气/蒸气相清洗 | 239 |
| 9.5 | 后处理颗粒去除技术 | 240 |
| 9.5.1 | 刷洗 | 241 |
| 9.5.2 | 清洗的流体动力学 | 242 |
| 9.5.3 | 超声波清洗 | 243 |
| 9.5.4 | 兆声波清洗 | 243 |
| 9.5.5 | 其他技术 | 245 |
| 9.6 | 颗粒监控措施 | 246 |
| 9.7 | 小结 | 247 |
| | 致谢 | 247 |
| | 参考文献 | 247 |
| 第 10 章 | 硅片表面的化学组分及表面形态 | 251 |
| 10.1 | 引言 | 251 |
| 10.2 | 氧化层钝化的晶片表面 | 252 |
| 10.2.1 | 引言 | 252 |
| 10.2.2 | 化学组分 | 253 |
| 10.2.3 | 结构和形态 | 255 |
| 10.2.4 | 沾污物问题 | 257 |
| 10.3 | 氢钝化的表面 | 258 |
| 10.3.1 | HF 处理(湿法)后表面的化学组分 | 258 |
| 10.3.2 | 结构和形态 | 265 |
| 10.3.3 | 沾污物问题 | 279 |
| 10.4 | 小结及未来方向 | 281 |
| | 致谢 | 282 |
| | 参考文献 | 283 |
| 第 11 章 | 利用表面电荷分析技术分析和控制电活性沾污物 | 287 |
| 11.1 | 表面电荷分析技术简介 | 287 |
| 11.2 | 工作原理 | 287 |
| 11.2.1 | 基本关系 | 288 |
| 11.2.2 | 测量参数概述 | 294 |
| 11.3 | 清洗工艺的表面电荷特征 | 297 |
| 11.3.1 | HF 刻蚀 | 299 |
| 11.3.2 | RCA 标准清洗 1 (SC-1) | 301 |
| 11.3.3 | RCA 标准清洗 2 (SC-2) | 302 |
| 11.3.4 | 金属沾污物的影响 | 303 |
| 11.3.5 | 冲洗和干燥 | 305 |

| | | |
|---------------|-----------------------------------|------------|
| 11.4 | 原始晶片的表面质量监控 | 306 |
| 11.5 | 小结 | 307 |
| | 参考文献 | 307 |
| 第 12 章 | 硅片表面微量杂质的 SIMS 和 TXRF 分析方法 | 309 |
| 12.1 | 引言 | 309 |
| 12.2 | 所要分析的问题 | 309 |
| 12.2.1 | 相关的沾污程度 | 309 |
| 12.2.2 | 原子深度和数量分析 | 310 |
| 12.2.3 | 量化 | 311 |
| 12.2.4 | 清洁的初始氧化层的组成 | 311 |
| 12.3 | 可行的分析技术 | 311 |
| 12.3.1 | 化学分析的电子能谱 | 311 |
| 12.3.2 | 俄歇电子能谱 | 312 |
| 12.3.3 | 卢瑟福背散射能谱法 | 313 |
| 12.3.4 | 激光电离质谱 | 314 |
| 12.3.5 | X 射线荧光光谱 | 314 |
| 12.3.6 | 高分辨率电子能量损失能谱 | 315 |
| 12.3.7 | 红外光谱 | 315 |
| 12.3.8 | 气相分解/原子吸收光谱 | 315 |
| 12.3.9 | 二次离子质谱 | 317 |
| 12.3.10 | 全反射 X 射线荧光光谱 | 317 |
| 12.4 | SIMS 分析技术的原理和方法 | 317 |
| 12.4.1 | SIMS 的原理 | 317 |
| 12.4.2 | 静态 SIMS | 317 |
| 12.4.3 | 动态 SIMS | 320 |
| 12.4.4 | 多晶硅封装/SIMS | 321 |
| 12.5 | TXRF 分析 | 323 |
| 12.5.1 | TXRF 的原理 | 323 |
| 12.5.2 | 量化 | 326 |
| 12.5.3 | 量化比较 | 328 |
| 12.5.4 | 入射角的性质 | 328 |
| 12.5.5 | 单色 TXRF | 330 |
| 12.5.6 | 采用 TXRF 技术对清洗工艺的描述 | 331 |
| 12.6 | 未来的分析技术 | 334 |
| 12.6.1 | VPD 方法中所采用的化学物质 | 335 |
| 12.6.2 | VPD ICP/MS | 335 |
| 12.6.3 | VPD/TXRF | 336 |
| 12.6.4 | VPD/SIMS | 337 |
| 12.6.5 | TOF-SIMS | 337 |
| 12.7 | 小结 | 337 |
| | 参考文献 | 338 |