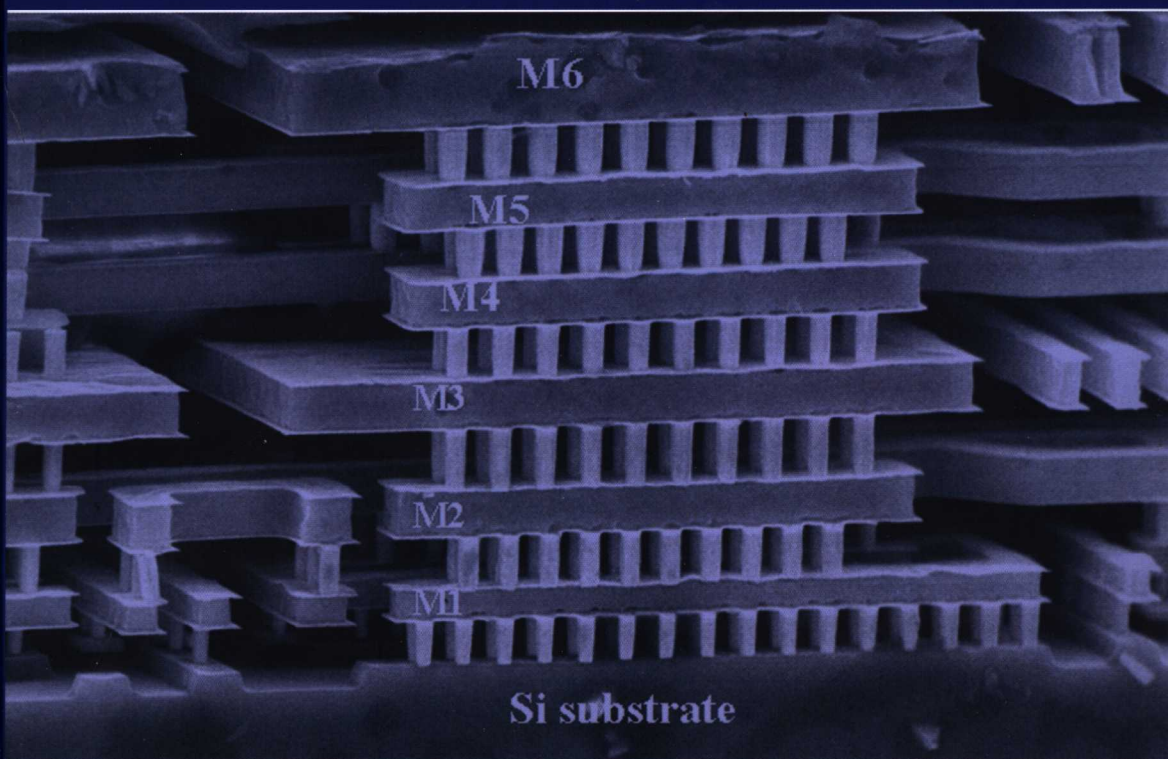


Microelectronics Materials and Processing

微电子材料与制程

陈力俊 主编



微电子材料与制程

Microelectronics Materials and Processing

陈力俊 主编

复旦大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

微电子材料与制程/陈力俊主编. —上海:复旦大学出版社,
2005.3

ISBN 7-309-04363-4

I. 微… II. 陈… III. 微电子技术 IV. TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 009483 号

微电子材料与制程

陈力俊 主编

出版发行 复旦大学出版社

上海市国权路 579 号 邮编 200433

86-21-65118853(发行部) 86-21-65109143(邮购)

fupnet@fudanpress.com <http://www.fudanpress.com>

责任编辑 梁 玲

总 编 辑 高若海

出 品 人 贺圣遂

印 刷 常熟市华顺印刷有限公司

开 本 787×960 1/16

印 张 39.25

字 数 582 千

版 次 2005 年 3 月第一版第一次印刷

印 数 1—3 100

书 号 ISBN 7-309-04363-4/T·293

定 价 68.00 元

如有印装质量问题, 请向复旦大学出版社发行部调换。

版权所有 侵权必究

简体字中文版出版者的话

《微电子材料与制程》一书是在台湾宏康科技股份有限公司谢泳芬博士的大力推动和台湾材料科学学会的大力支持下,才于2004年的仲夏时节进入简体字中文版的翻译和出版日程。我们复旦大学出版社非常感谢台湾朋友的信任和支持。

本书在出版过程中得到了复旦大学微电子学系的大力帮助,值此出版之机,我们表示衷心的感谢。李炳宗教授、茹国平教授、屈新萍副教授在百忙之中为本书的引进提供了宝贵的专家意见,林殷茵副教授和张军鹰工程师在休息日专程安排关于本书的讨论会,这些都让我们难以忘记。

业实集成电路(上海)有限公司的杨燕小姐为本书的引进出版做了许多具体而细致的落实工作。复芯微电子技术咨询有限公司的杨秋冬先生负责本书的编校工作,并及时阅读校定本书的清样。业实的郭首一先生在接管这一项目的过程中也付出很多劳动。没有他们的努力,我们很难在这么短的时间里向读者呈献这本书。业实和复芯微电子的支持,也是我们能够尽快出版简体中文版的原因之一。

考虑到本书的读者对象是微电子专业的本科生和研究生以及相关领域的工程师,本书在制作简体字中文版的过程中,全盘复制和保留了台湾英杰企业有限公司版图书的图表和文献的处理方式,由于全书各章由不同作者撰稿,各章作者对书中图表内的英文术语有译成中文的,也有未译成中文的,也有中英文混用的,正文中的物理符号则采用正体字母,计量单位也采取行业规范。这虽然不符合内地的出版规范,但对我们来说,这样做一来可以让读者感受原书的风貌,二来可以让我们尽快地出版本书,因此敬请广大读者和出版管理部门谅解。

谨以此书的出版作为我们和台湾材料科学学会合作的开始,谨以此书的出版作为我们和微电子领域专家学者合作的开始。

复旦大学出版社

2005.01.25

序 言

近年来台湾地区电子半导体相关高科技产业蓬勃发展,对材料科技人才的需求非常殷切,年轻学子也多以进入此热门行业为第一志愿。加强材料专业训练,以满足产业界人才之需求,已成为学术界重要的职责所在。

由于“政府”政策的鼓励及社会的需求,台湾地区公私立大学院校短期内增设了许多材料系所,学生人数随着急速增加,为了因应学子们学习的需要,并落实教材中文化的期望,材料学会在“教育部”的资助下,决定出版三本工具书,包括已出版的材料分析、金属材料实验及这一本微电子材料与制程。

材料学会前理事长,(台湾)清大工学院院长陈力俊教授二十多年来专心研究电子材料,并且获得极为杰出的成就,他是主编这本书最适当的人选。

我们非常感谢陈教授领导的团队,在百忙之中,挤出时间,为材料教育写书,贡献丰富的学识与宝贵的经验,希望能满足大家的需求,获得大家的喜爱。

这本书共分十一章,有六百多页,内容除了概览外,包括半导体基本理论、硅晶圆制造、硅晶薄膜、刻蚀技术、光刻技术、离子注入、金属薄膜、氧化介电层、电子封装及材料分析等,从理论基础到制造、分析等实务经验,皆有完整而透彻的介绍,相信对材料相关系所的同学及电子产业从业人员提升电子材料与工艺之知识皆会有很大的帮助。

材料科学学会理事长

洪敏雄 谨识

一九九八年十一月于台南

编者序

教材、手册的中文化可能是台湾地区近年来在发展科技诸般努力中最弱的一环,但也可能是使科技生根深化最重要的一环。适当的中文教材不仅能大幅提高学习效率,而且经由大家熟悉的文字更能传递理论的逻辑概念、关联脉络以及深层意义,勾画出思路发展,学习的效果更不可以道里计。“材料科学学会”体认到教材中文化的重要性,落实及扩大教学成效,规划出版一系列观念正确、内容丰富的中文教科书。

台湾地区在六十年代在“政府”主导下积极发展集成电路工业,七十年代末期渐渐开花结果,到目前不仅成为明星产业,在世界上有举足轻重的地位,而且将是二十一世纪产业发展的驱动力。微电子工业的快速发展,因素固然很多,但技术上的持续进步为主要因素之一。自四十年代末期晶体管问世以来,电子工业始终以基础科学为先导,日新月异。材料科学与工程在电子工业的成长中扮演了极重要的角色。高纯度及几乎无缺陷硅晶的成长,靠“区段纯化”及“柴氏拉伸法”才得以实现,因而促成集成电路电子工业全面发展。其他如清洁表面、确定晶面方向、氧化、光刻、蚀刻技术、离子注入、外延、金属膜及绝缘膜沉积、热处理、封装等各种处理材料的制程步骤,以及各种物性、结构、成分及缺陷的鉴定,无一不与材料的工艺及鉴定息息相关。因此自学会规划出版中文教科书伊始,规划委员们很迅速地建立共识,微电子工业的基石“微电子材料与制程”应是优先出版科目。

本书第一章将微电子材料与工艺作一概览,第二章介绍半导体基本理论。第三章至第十章为集成电路工艺各重要的问题:单晶成长、硅晶薄膜、蚀刻、光刻技术、离子注入、金属薄膜与工艺、氧化、介电层、电子封装技术基础教材,第十一章则为材料分析技术应用。各章邀请顶尖专家学者撰写或合撰,务求内容精到详实,兼顾理论与应用,深入浅出,希望不仅成为莘莘学子的优良入门书,也能供广大从业技术人员参考之用。

本书经接近两年时间规划、撰写、编校,虽力求精实正确,但难免有所疏漏,尚祈专家学者与读者不吝指教。在编校过程中,承蒙丁珮、庄乃贞(材料科学学会)、许淑卿(英杰公司)小姐多方协助,在此一并致谢。

陈力俊 谨识

一九九八年十一月于(台湾)清华园

作者简介

(以章节顺序为序)

陈力俊(第一章、第七章、第八章)

美国柏克莱加州大学博士

(台湾)清华大学材料科学工程学系教授

李建平(第二章)

美国加州理工学院博士

(台湾)交通大学电子工程学系教授

薛银陞(第三章)

美国俄亥俄州立大学博士

中德电子公司处长

游萃蓉(第四章)

美国麻省理工学院博士

联华电子公司资深经理

周立人(第五章)

美国伊利诺大学博士

(台湾)清华大学材料科学工程学系教授

龙文安(第六章)

美国杜兰大学博士

(台湾)交通大学应用化学系教授

朱志勳(第七章)

(台湾)清华大学材料科学工程学系博士

联华电子公司资深经理

卢火铁(第八章)

(台湾)清华大学材料科学工程学系博士

联华电子公司协理

郑晃忠(第九章)

(台湾)清华大学材料科学工程学系博士

(台湾)交通大学电子工程学系教授

蔡孟锦(第九章)

(台湾)交通大学电子工程学系博士

联华电子公司经理

谢宗雍(第十章)

美国麻省理工学院博士

(台湾)交通大学材料科学工程学系教授

谢咏芬(第十一章)

(台湾)清华大学材料科学工程学系博士

联友光电公司部经理

何快容(第十一章)

(台湾)清华大学化学系博士

联华电子公司经理

封面说明:

— 6 层集成电路后段金属薄膜
结构之扫描式电子显微镜图。

(联华电子公司提供)

目 录

序 言	iii
编者序	v
作者简介	vi

第一章 概览	陈力俊	1
1-1 微电子工业		1
1-2 微电子材料		2
1-3 材料的电性		2
1-4 硅晶集成电路		3
1-5 集成电路工艺		3
1-6 微电子材料特性		4
1-7 微电子材料的应用		4
1-8 未来挑战与展望		5
参考文献		6
习 题		6

第二章 半导体基本理论	李建平	7
2-1 简介		7
2-2 晶体结构		8
2-3 能带结构		13
2-4 有效质量与电子输运性质		19
2-5 电子浓度与费米分布		24
2-6 异质半导体(Extrinsic Semiconductor)		29
2-7 半导体的界面		34

参考文献	48
习 题	48
 第三章 硅晶圆材料制造技术	薛银升 51
3-1 简介	51
3-2 多晶硅原料	52
3-3 单晶生长设备	53
3-4 单晶生长程序及相关理论	57
3-5 晶圆加工成形(Modification)	68
3-6 晶圆抛光(Polishing)	73
3-7 晶圆清洗(Water Cleaning)	78
参考文献	79
习 题	80
 第四章 硅晶薄膜	游萃蓉 81
4-1 简介	81
4-2 硅晶薄膜工艺原理及反应机制	81
4-3 硅外延(Epitaxial Si)	86
4-4 多晶硅(Poly-Si)	97
4-5 非晶硅(Amorphous Si)	104
4-6 结论	105
参考文献	105
习 题	112
 第五章 半导体刻蚀技术	周立人 115
5-1 简介	115
5-2 湿法刻蚀技术	117
5-3 干法刻蚀技术(等离子体刻蚀技术)	120
5-4 金属刻蚀(Metal Etch)	137

5-5	总结	148
	参考文献	148
	习 题	149
第六章	光刻技术	龙文安 151
6-1	简介	151
6-2	光刻方式	154
6-3	光刻掩模版与模板	182
	参考文献	202
	习 题	206
第七章	离子注入	朱志勋、陈力俊 207
7-1	前言	207
7-2	离子注入设备	208
7-3	离子注入的基本原理	221
7-4	离子分布与模拟方法	224
7-5	离子注入造成的硅衬底损伤与热退火	236
7-6	离子注入在集成电路制造上的应用	245
7-7	离子注入工艺实务	265
7-8	结束语	269
	参考文献	270
	习 题	272
第八章	金属薄膜与工艺	陈力俊、卢火铁 273
8-1	简介	273
8-2	金属接触	275
8-3	栅电极(Gate Electrode)	293
8-4	器件间互连(Interconnect)	295
8-5	栓塞(Plug)	297

8-6	扩散阻挡层	302
8-7	黏着层(Adhesion Layer)	309
8-8	抗反射覆盖层(Anti-Reflection Coating)	310
8-9	工艺整合问题	310
8-10	铜金属化	314
8-11	展望	320
	参考文献	321
	习 题	328
第九章	氧化,介电层	郑晃忠、蔡孟锦 331
9-1	简介	331
9-2	氧化层的形成方法	331
9-3	特殊电介质	359
9-4	氧化电介质的电性及物质特性	370
9-5	氧化电介质的应用	374
9-6	结束语	377
	参考文献	378
	习 题	379
第十章	电子封装技术	谢宗雍 381
10-1	前言	381
10-2	芯片粘结	389
10-3	互连技术	391
10-4	引脚架	405
10-5	薄/厚膜技术	409
10-6	陶瓷封装	411
10-7	封装的密封	417
10-8	塑料封装	420
10-9	印刷电路板	427

10-10 焊锡与锡膏	433
10-11 器件与电路板的接合	441
10-12 清洁与涂封	448
10-13 新型封装技术	452
参考文献	461
习 题	463

第十一章 材料分析技术在集成电路工艺中的应用

..... 谢咏芬、何快容	465
11-1 简介	465
11-2 材料分析技术	470
11-3 集成电路工艺模块的观察实例	539
11-4 各种 IC 产品的基本结构	549
11-5 结束语	562
参考文献	563
习 题	564

中英文索引	567
-------------	-----

英中文索引	590
-------------	-----

概 览

1-1 微电子工业

集成电路是将各种电路器件集成于半导体表面而形成的电路。近年来集成电路几乎已成为所有电子产品的心脏。目前科技的飞速进展与集成电路的发展应用,有密不可分的关系。十九世纪工业革命主要以机器节省人力,二十世纪的工业革命则主要以电脑为人脑分劳。而电脑的发展归于集成电路工业。由于集成电路微小化的趋向,使电子产品得以“轻、薄、短、小”。故集成电路工业又称微电子工业。本书就微电子工业的基石微电子材料与工艺作具体介绍。

微电子工业可溯源于 1947 年肖克利 (W. Shockley) 等人发明晶体管取代真空管放大器。差不多在同时数字计算器的发展提供了应用晶体管的庞大潜在市场。新器件的出现与应用的配合,造就了晶体管和计算机工业的爆炸性成长。同时因为计算机、太空卫星、飞弹电子系统“轻、薄、短、小”的需求刺激了集成电路的发展。到 1950 年代末期,集成电路已发展到耐用可靠性相当良好的境地。自此以后,集成电路制造技术更一日千里。演变至今,各电路器件基本尺寸不断缩小(至深次微米大小,微米为万分之一厘米,人发直径约为五十微米),工作速度加快(每秒可执行百亿个指令),耐用性增加,而价格大为降低。估计过去三十年中,电子器件基组使用量每年增加一倍,亦即每年增加数量为该年以前所有生产及使用器件数量总和。同期间,每执行一个工作指令的器件单元价格,却以每年百分之二十至三十的幅度降低。这种价格与功能的关系,是工业革命以来所有工业产品从未出现的异常现象。尤其近年来个人电脑的发展,不仅使微电子产品自工厂进入办公室及家庭,而且更促成其他各种工业革命性的改变;如机器操作自动化,新器件自动校准,现场诊断测试能力大增,代人工作机器人的发展,资料

储存及处理机、移动通讯的日渐普遍,而渐成为所有工业进步的动力。有专家认为二十世纪与二十一世纪之交数十年间,一国或地区电子业的繁荣与否可决定其盛衰。亦有人称二十世纪中叶以后的时代为半导体时代。

1-2 微电子材料

微电子工业的快速发展,因素固然很多,但技术上的发展为主要因素之一。从1940年代末期晶体管问世以来,电子工业始终以基础科学为先导,日新月异。材料科学与工程在电子工业的成长中扮演了极重要的角色。高纯度及几乎无缺陷硅晶的生长,靠“区段纯化”及“柴氏拉伸法”才得以实现,因而促成集成电子工业全面发展。其他如切割、抛光、化学研磨试片、清洁表面、确定晶面方向、氧化、掩膜版、光刻胶处理、刻蚀技术、离子注入、外延生成、金属膜及绝缘膜蒸镀、热处理、粘焊、封装等各种处理材料的工艺步骤,以及各种物性、结构、成分及缺陷的分析,无一不与材料的工艺及分析息息相关。

近年来集成电路晶圆大型化及器件单元微小化的趋向,使产品的良品率不断提高,是促使集成电路价格不升反降的主要因素。但亦使工艺步骤日益精细复杂,生成缺陷的机会也增加。各电路器件基组尺寸缩小,缺陷对它的不良影响也相对增加。要维持一定的良品率,对材料科学是莫大的挑战。微电子工业在现代工业发展中居关键枢纽地位,而居于微电子材料中心地位的硅晶也因此有“新钢铁”之誉。

1-3 材料的电性

电子为自然界的基本粒子之一。所有元素原子均由原子核与外围电子组成。电子循一定轨道绕原子核运转。根据量子理论,电子运行轨道各有一定的能级,在各轨道运行的电子具有一定的能量。

材料的电性依电子在固体中传导的难易程度可分为导体、半导体及绝缘体:导体如金、银、铜、铁,其电阻很低;绝缘体如玻璃,其电阻非常高;半导体如硅、锗,其导电性介于导体与绝缘体之间。

材料的导电率,由固体中可自由流动的带电粒子数目来决定。在金属

中带电子为原子外层轨道电子——即价电子。因其不受单一原子的束缚,而分布于整个导体中,这些价电子亦称为自由电子。绝缘体中自由电子数目很少,所以导电性很差。要解释半导体的导电性,就必须要用到量子力学的能带观念。请参见第二章所介绍半导体基本理论。

1-4 硅晶集成电路

集成电路是将各种电路器件包括电阻、电容及集成晶体管连接于半导体表面而形成的电路。集成电路自 1960 年代问世以来,一直朝器件微小化;制造大型化发展,一方面可增进器件工作的速度,一方面可降低制造成本。目前各电路器件尺寸已缩小至深亚微米大小。

集成电路集成程度,可由边长为 0.5 厘米的方形芯片上所含电路器件数目来划分,在 1965、1970、1980 年代,芯片上电路器件数目各达到 100、10,000 及 100,000 个被称为中型、大型及超大规模集成电路,目前则已步入极大规模集成电路时代,每一芯片实际尺寸约为 $1.5\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$ 上含高达两千万个晶体管以上。美国、日本与韩国,目前都已能大量生产每芯片含十亿(1 Gb)电路器件的极大规模集成电路。在制造大型化方面,主要为缩减生产成本,增加产量,晶圆尺寸由 1970 年代的 2 英寸到目前的 8 英寸,而即将有 12 英寸厂商出现。

1-5 集成电路工艺

集成电路工艺最重要的步骤,有以下七项:

- (1) 单晶成长。
- (2) 生成硅晶薄膜。
- (3) 生成绝缘层。
- (4) 光刻刻蚀形成电路图形。
- (5) 掺入电活性杂质及热处理。
- (6) 制作金属表面及互连线。
- (7) 封装。

在本书第三章至第十章分别说明。

1-6 微电子材料特性

微电子器件的发展在二十世纪后期掀起第二次工业革命,“轻、薄、短、小”成了时代进步的象征,主要因为微电子器件具有功能替代性:大体而言,以轻工业替代重工业,以信息技术替代机械技术;如以电脑替代人脑,传真,电话替代信件传递,计算器替代算盘及机械计算器,电子表替代机械表,交通信号灯替代交通警察,自动售货机替代售货员。同时在替代过程中,具有下列特性:

(1) 节省材料:较“轻、薄、短、小”,所需材料总量不大。

(2) 节省能源:不仅在使用时,且在制造上均节省能源,如晶体管替代真空管。

(3) 节省空间:如个人电脑与早期利用真空管工作的计算器,功能有过之而无不及,所占空间大为减小。

(4) 增进性能:如机器操作自动化、新机件自动校准、现场诊断测试能力大增。

(5) 耐用可靠:如微电子器件控制相比于真空管控制的家电产品,如收音机、电视机。

(6) 价格低廉:微电子器件制造随其微小化,生产力逐渐增加,相关产品价格亦逐渐下降,与一般产品价格逐年上涨有明显差异。

1-7 微电子材料的应用

微电子材料为微电子器件的构成材料。微电子器件为电子产品心脏。电子产品在现代生活中不论在工厂、办公室及家庭可谓无所不在。其应用范围包括:

(1) 民用家电用品:如收录音机、音响、电视、录放机、激光影碟机、电子游戏机、电子表、洗衣机、缝纫机、冷暖空调、冰箱、微波炉、电子乐器、计算器。

(2) 信息产品:包括电话、个人电脑、因特网、无线手机、传真机、复印机、通讯广播设备、大型电脑及超级电脑。

(3) 医疗及工业设备:如各种分析仪器、微传感器、诊断医疗设备、监控系统、工业用机器人、工业用电子机器。

(4) 国防设备:如监控系统、武器发射控制系统。

1-8 未来挑战与展望

根据国际半导体工业协会(International Semiconductor Industry Association, SIA)在1999年所发布的美国半导体技术蓝图(表1-1)⁽¹⁾,1999年先进半导体器件量产技术DRAM线宽达180 nm,微处理器芯片中约有两千四百万个晶体管,芯片可大到 $25 \times 32(\text{mm}^2)$,芯片时钟频率达1.2 GHz,预计到2014年线宽达35 nm,微处理器芯片中约有4.3 G晶体管,芯片时钟频率达13.5 GHz。根据当时美国半导体制造技术策略联盟(Semiconductor Manufacturing Technology, SEMATECH)任职的T. Seidel在1996年预测⁽²⁾,到2010年100 nm器件微电子材料将包括选择性硅外延、 CoSi_2 或 TiSi_2 接触与栅极、Cu互连与扩散阻挡层、Cu栓塞、绝缘体上硅(Silicon on Insulator, SOI),低介电与高介电氧化物绝缘层。一方面有许多已浮现材料的研究发展工作,如Si-Ge合金基底材料,有待加速进行,在金属接触与栅极、互连方面则已达物性极限,有赖革命性的创新,开启新纪元。

表1-1 1999年国际半导体技术蓝图

产品推出年代	1999	2001	2003	2005	2008	2011	2014
技术时代(DRAM线宽) (nm)	180	—	130	100	70	50	35
微处理器栅极线宽(nm)	140	100	80	65	45	30~32	20~22
内存时代(bit)	1 G	2 G	4 G	8 G	—	64 G	—
微处理器晶体管数	24 M	48 M	95 M	190 M	539 M	1.52 G	4.31 G
芯片时钟频率(MHz)	1 250	1 767	2 490	3 500	6 000	10 000	13 500
光刻最大面积(mm^2)	25×32 800	25×32 800	25×32 800	25×32 800	25×32 800	25×32 800	25×32 800
晶圆尺寸(mm)	300	300	300	300	300	300	450
金属互连层数	6~7	7	8	8~9	9	9~10	10