

长江学者论丛

# 半导体集成电路 制造技术

■ 张亚非 等 编著

Microfabrication Technology of  
Semiconductor Integrated Circuits



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

长江学者论丛

# 半导体集成电路 制造技术

■ 张亚非 等 编著

Microfabrication Technology of  
Semiconductor Integrated Circuits

 高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

## 内容简介

半导体集成电路发展到今天已经形成一个重大产业,本书主要讲述半导体集成电路的制造技术,既有基本原理和工艺技术的阐述,也有国内外近期发展状况的介绍。本书根据半导体集成电路的基本原理和内部结构以及版图设计,通过半导体材料制备、化学清洗、薄膜沉积、NP 掺杂、光刻、金属化处理、生产整合与自动化等工艺整合,讲解集成电路的制造技术。本书可作为高等院校微电子学和半导体专业本科生的教材,也可供有关专业本科生、研究生及工程技术人员阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

半导体集成电路制造技术/张亚非等编著. -北京:高等教育出版社,2006.6

ISBN 7-04-018299-8

I. 半... II. 张... III. 半导体集成电路-集成电路工艺-高等学校-教材 IV. TN430.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 026336 号

策划编辑 刘剑波      责任编辑 许海平      封面设计 王凌波  
责任绘图 朱 静      版式设计 范晓红      责任校对 杨雪莲  
责任印制 陈伟光

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷	北京市白帆印务有限公司		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
		畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开 本	787×1092 1/16	版 次	2006 年 6 月第 1 版
印 张	25.5	印 次	2006 年 6 月第 1 次印刷
字 数	470 000	定 价	48.00 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 18299-00

## 作者简介



**张亚非** 理学博士，教授，长江学者，优秀留学回国人员。1982 - 1992 年任兰州大学半导体专业副教授，1995 - 1997 年任香港城市大学研究员，1997 - 2001 年任日本科技厅无机材质研究所先端机能材料研究中心高级科学家，2001 年以来任上海交通大学微/纳科学技术研究院微电子学与固体电子学学科长江学者。长期从事半导体集成电路工艺、纳电子材料与器件方向的研究。曾作为中国高科技中心成员 [CCAST(世界实验室)]、美国通用电器公司 (GE) 特聘讲座学者、美国材料学会会员、意大利理论物理研究中心访问学者等在电子材料与器件国际学术领域进行过多次讲学与合作研究，并受邀担任多家著名国际学术期刊 (如 Applied Physics Letters 等) 的特约评审人。承担和主持完成过多项国家自然科学基金和横向应用研究项目，获科技发明专利 8 项，发表相关论文百余篇，被 SCI 他人引用数百次，曾获得 SCI 引用单篇论文全国第 7 名证书、“世界华人重大学术成果”奖、日本表面技术协会论文赏和 2005 年国家自然科学二等奖等多项奖励。

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

**反盗版举报电话：**(010) 58581897/58581896/58581879

**传 真：**(010) 82086060


**E - mail：**dd@hep.com.cn

**通信地址：**北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

**邮 编：**100011

购书请拨打电话：(010)58581118

“长江学者”学术著作出版资助项目 

## “长江学者论丛”编辑出版指导委员会

---

主任委员:赵沁平 教育部副部长

副主任委员:金国藩 清华大学教授,中国工程院院士

闵乃本 南京大学教授,中国科学院院士

吴树青 北京大学教授,教育部社科委主任

饶子和 清华大学教授,中国科学院院士,长江学者特聘教授

舒德干 西北大学教授,长江学者特聘教授,长江学者成就奖获得者

## “长江学者论丛”编辑出版指导委员会办公室

---

主任:吴德刚 教育部人事司司长

副主任:刘志鹏 高等教育出版社社长

吕玉刚 教育部人事司副司长,教育部人才发展办公室主任

吴向 高等教育出版社副总编辑

## 序

当今世界,科学技术日新月异,知识经济方兴未艾,综合国力竞争日趋激烈。面对日益激烈的国际竞争,立足国情,我国只能走建设创新型国家的发展道路,把提高自主创新能力作为调整经济结构、转变增长方式、提高国家竞争力的中心环节。而科技和人才,特别是创新人才是建设创新型国家和提高自主创新能力的关键。实施科教兴国、人才强国战略,建设创新型国家,构建社会主义和谐社会,高等学校肩负着重大历史使命。教育大计,人才为本。人才问题,始终是高等学校改革与发展的核心问题和头等大事。加快建设高等学校高层次人才队伍,努力培养和造就一批在国际上有重要影响的学术大师、战略科学家和学科带头人,是发展我国高等教育事业的必然要求,也是关系社会主义现代化建设全局的重要任务。

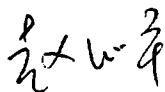
为贯彻落实科教兴国和人才强国战略,推进我国高等学校高层次人才队伍建设,教育部与香港李嘉诚基金会于1998年共同启动了“长江学者奖励计划”。该计划自实施以来,在党和国家领导人的高度重视和关心下,在国家财政等有关部门、高等学校和社会各界的大力支持下,取得了显著成效,在海内外引起了强烈反响。诺贝尔物理学奖获得者杨振宁评价“长江学者奖励计划”是“一个非常了不起的壮举”,“是20世纪末21世纪初中国实施科教兴国战略的一个非常重要的环节”。

长江学者群英荟萃、硕果累累。“长江学者奖励计划”的实施吸引、汇聚和造就了一大批优秀拔尖人才。目前全国88所高等学校聘任727位长江学者,先后有6位优秀学者获得“长江学者成就奖”,31位长江学者被聘为“973”首席科学家,24位长江学者当选为中国科学院、中国工程院院士。在“长江学者奖励计划”的激励和支持下,长江学者们取得了一批重大科研成果,近年来共有20余篇论文发表在《Nature》、《Science》上,近百项科研成果获得国家自然科学奖、技术发明奖、科技进步奖,其中3项成果获得一等奖,20余项重要成果入选“中国十大科技进展新闻”、“中国基础研究十大新闻”、“中国高校十大科技进展”,有力地支



持了国家重大战略的实施,促进了学科建设和科技发展,为培养和造就优秀拔尖创新人才做出了贡献。

编辑出版长江学者学术著作,得到了广大长江学者的积极响应和高等教育出版社的大力支持。希望《长江学者论丛》的出版,进一步提高长江学者在学术领域的影响力,并激励广大学者弘扬长江学者的创新精神,勇攀科学高峰,更好地为促进高校在提高国家自主创新能力、建设创新型国家的伟大事业中,做出更大的贡献。



2006年1月

# 前 言

集成电路是现代信息产业和信息社会的基础,是改造和提升传统产业的核心技术,随着全球信息化、网络化和知识经济浪潮的到来,集成电路产业的战略地位越来越重要。半导体集成电路发展极快,不论是集成度、外封装类型还是新型电路,都在日新月异地变化,但其工作原理、内部结构仍然是相似的。了解它的基本知识,对合理应用及了解其发展都是有益的。基于以上背景,本书的作者们协力合作撰写了此书。

全书共分16章。各章的题目、作者主要如下:第1章 绪论(张亚非);第2章 集成电路器件物理(张亚非);第3章 半导体材料物理化学基础及加工技术(常程康);第4章 半导体制备用材料及化学品(惠春);第5章 硅片清洗工艺(韦红雨);第6章 氧化工艺(凌行);第7章 化学气相沉积技术(王家敏);第8章 离子注入技术(王家敏);第9章 金属沉积技术(陈秋龙);第10章 扩散工艺(凌行);第11章 快速加热处理工艺(凌行);第12章 刻蚀流程与设备(陈秋龙);第13章 光刻工艺(凌行);第14章 金属化与平坦化工艺(常程康);第15章 微分析技术及缺陷改善工程(韦红雨);第16章 工艺整合与自动化(韦红雨)。全书由张亚非统稿。

本书首先从绪论介绍开始,讲述器件的基本物理及运作原理,然后分成材料与化学(晶片、清洗等)、薄膜(氧化、多晶硅)、掺杂(离子注入、扩散)、光刻(光刻、刻蚀)、后段工艺(金属平坦化),最后叙述工艺整合。各章可独立成文,也可全书连成一体;既有基本原理的阐述,也有国内、外近期发展情况。

本书可作为高等院校微电子学和半导体专业本科生的教材,也可供有关专业的本科生、研究生以及工程技术人员阅读参考。书中定有我们目前尚未认识的错误和不当之处,敬请读者们批评指正。

向与我共同完成此书的作者致以深深的敬意,感谢大家在繁忙的科研、教学任务中,不辞辛苦和劳累,及时完成撰稿。

张亚非  
于上海交通大学

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 半导体产业的发展 .....	2
1.3 电路集成 .....	3
1.4 集成电路制造 .....	4
1.5 半导体产业的发展趋势 .....	5
1.6 电子时代 .....	6
<b>第 2 章 集成电路器件物理</b> .....	9
2.1 硅半导体的基本物理特性 .....	9
2.2 金属 - 氧化物 - 半导体二极管 .....	12
2.3 金属 - 氧化物 - 半导体场效应晶体管 .....	22
2.4 短沟道效应 .....	31
2.5 轻掺杂漏极(LDD)MOSFET 器件 .....	39
2.6 器件缩小原理(scaling principle) .....	41
2.7 纳米 MOSFET 器件中的载流子输运模型及其特性 .....	42
2.8 发展硅纳电子学集成电路的限制 .....	52
参考文献 .....	62
<b>第 3 章 半导体材料物理化学基础及加工技术</b> .....	65
3.1 相图和固溶度 .....	65
3.2 晶体结构和缺陷 .....	68
3.3 硅片的生长技术 .....	72
3.4 区熔法生长单晶 .....	77
3.5 GaAs 单晶体的液封直拉法生长技术 .....	80
3.6 布氏法生长 GaAs .....	81
3.7 晶片成形 .....	82
3.8 晶片的测试分析技术 .....	88

参考文献 .....	92
<b>第 4 章 半导体制备用材料及化学品 .....</b>	<b>93</b>
4.1 概述 .....	93
4.2 清洗技术用高纯度化学品 .....	94
4.3 光刻技术用材料及化学品 .....	98
4.4 刻蚀技术用高纯度化学品 .....	101
4.5 化学气相沉积工艺用材料及化学品 .....	104
4.6 平坦化技术用材料及化学品 .....	109
4.7 结论 .....	117
参考文献 .....	117
<b>第 5 章 硅片清洗工艺 .....</b>	<b>118</b>
5.1 晶片清洗概论 .....	118
5.2 晶片清洗的要求 .....	118
5.3 湿式化学清洗技术 .....	138
5.4 物理清洗技术 .....	147
5.5 干式清洗技术 .....	149
5.6 清洗设备的结构 .....	152
5.7 总结及对未来清洗技术的展望 .....	155
参考文献 .....	159
<b>第 6 章 氧化工艺 .....</b>	<b>162</b>
6.1 概述 .....	162
6.2 SiO <sub>2</sub> 膜的结构、性质及其作用 .....	162
6.3 热氧化的原理 .....	164
6.4 氧化方法 .....	169
6.5 氧化工艺的设备 .....	170
6.6 氧化膜的质量评价 .....	172
参考文献 .....	174
<b>第 7 章 化学气相沉积技术 .....</b>	<b>175</b>
7.1 概述 .....	175
7.2 CVD 基本原理简介 .....	175
7.3 各种 CVD 反应简介 .....	180
7.4 CVD 装置 .....	183
7.5 CVD 制备工艺 .....	187
参考文献 .....	192
<b>第 8 章 离子注入技术 .....</b>	<b>193</b>

8.1 概述 .....	193
8.2 离子注入技术的基本原理 .....	194
8.3 离子注入设备 .....	208
8.4 离子注入层特性的测量和分析 .....	216
参考文献 .....	217
<b>第 9 章 金属沉积技术 .....</b>	<b>219</b>
9.1 概述 .....	219
9.2 未来金属化的展望 .....	219
9.3 化学气相沉积金属制作工艺 .....	223
9.4 物理气相沉积金属的工艺 .....	244
参考文献 .....	250
<b>第 10 章 扩散工艺 .....</b>	<b>252</b>
10.1 概述 .....	252
10.2 扩散原理 .....	252
10.3 硅中杂质原子的扩散方式 .....	255
10.4 扩散设备 .....	258
10.5 与扩散有关的参数测量 .....	259
参考文献 .....	262
<b>第 11 章 快速加热处理工艺 .....</b>	<b>263</b>
11.1 快速加热处理工艺简介 .....	263
11.2 快速加热化学气相沉积 .....	265
11.3 快速氧化层生长及氮化 .....	267
11.4 注入离子活化及浅结面的形成 .....	270
11.5 金属硅化物的形成 .....	272
11.6 磷硅玻璃 (PSG) 或硼磷硅玻璃 (BPSG) 的缓流及再缓流 .....	275
11.7 外延生长 .....	275
11.8 快速升温系统介绍 .....	276
参考文献 .....	278
<b>第 12 章 刻蚀流程与设备 .....</b>	<b>279</b>
12.1 概述 .....	279
12.2 湿法刻蚀 .....	280
12.3 干法刻蚀 .....	282
12.4 半导体工艺中常用材料的干法刻蚀 .....	290
12.5 前瞻 .....	298
参考文献 .....	299

<b>第 13 章 光刻工艺</b> .....	301
13.1 概述 .....	301
13.2 光刻胶及其主要性能 .....	302
13.3 光刻对准曝光系统 .....	304
13.4 光刻工艺过程 .....	306
13.5 光刻质量的检测 .....	308
13.6 掩模版的制造 .....	309
参考文献 .....	310
<b>第 14 章 金属化及平坦化工艺</b> .....	311
14.1 概述 .....	311
14.2 金属化处理技术 .....	312
14.3 金属连线的生产技术 .....	314
14.4 连线制备技术的展望 .....	317
14.5 介质绝缘膜的制备技术 .....	319
14.6 低介电常数材料 .....	321
14.7 高介电常数材料 .....	324
14.8 CMP 设备及消耗材料 .....	326
14.9 CMP 的工艺控制 .....	330
参考文献 .....	332
<b>第 15 章 微分析技术及缺陷改善工程</b> .....	333
15.1 概述 .....	333
15.2 微分析仪器的分类 .....	334
15.3 微分析仪器在半导体工业中的应用 .....	336
15.4 常用微分析仪器介绍 .....	340
15.5 失效分析简介 .....	364
15.6 缺陷改善工程 .....	366
15.7 结论 .....	371
参考文献 .....	372
<b>第 16 章 工艺整合与自动化</b> .....	373
16.1 概述 .....	373
16.2 工艺整合技术 .....	374
16.3 CIM 及自动化 .....	376
16.4 半导体制造厂计算机信息整合制造的实践 .....	377
16.5 信息技术/自动化技术顾问公司的支持 .....	388
参考文献 .....	390

# 第 1 章 绪 论

在 20 世纪,社会经历了从机械技术派生出的产品到集成电子技术产品变化的技术革命,如数字 CD 播放机取代了磁带播放机,汽车发动机由电子点火系统控制,电子计算机也几乎在社会各个方面迅速起着非常重要的作用,并促进了资源的有效利用。从由电子技术引起变化的广度来看,这场革命才刚刚开始。

半导体产业已经成为这场技术革命的核心。而半导体材料是贯穿整个社会电子产品的要素。迅速增长着的半导体市场不断要求以更低的成本获得更好的性能。

## 1.1 引 言

制造电子器件的基本半导体材料是圆形单晶硅薄片,称为硅片。由硅片生产的半导体产品又被称为微芯片或芯片。

半导体制造技术很复杂,有许多特殊工艺步骤、材料、设备以及供应产业。根据不同产品的应用要求,芯片被制造并被封装到各种电子和机械的装配件中。这些应用的例子有汽车电子、计算机及移动电话。现在,芯片占整台计算机成本的 30%~40%;在每一部手机中芯片的成本约为 100 美元;每辆汽车含有近乎价值 140 美元的芯片,使得汽车变得更加智能化。

半导体产业属于高技术产业,包含整个半导体应用中可见的全部硬件和软件。在美国高技术产业是庞大的。20 世纪 90 年代中期,高技术产业占美国经济的 27%,相比之下居民住房占 14%,汽车产业占 4%。为什么半导体产业会如此强大呢?一个主要原因是该产业能持续增加产品性能并降低产品的成本。满足市场对于高性能低成本需求的能力可以直接归根于技术的规律性发展,它贯穿了整个产品设计和制造业的历史。

## 1.2 半导体产业的发展

半导体产业的发展是以 20 世纪上半叶开发的技术为基础。关键技术是从工业和学术网中获取的,如真空管电子学、无线电通信、机械制表机及固体物理。这些构成了当时的高技术产业。

放大电子信号的三极真空管是由李·德·福雷斯特(Lee De Forest)于 1906 年发明的。他发展了早期由约翰·弗莱明和托马斯·爱迪生在真空管方面开创的工作。三极真空管由三个部分组成,在一个抽真空的玻璃容器中分别封入两个电极和一个栅极。抽真空是为了使部件不被烧毁,同时还要保证电子能够在电极间传输。李·德·福雷斯特申请了专利并将他发明的真空管命名为音频管,因为他认为真空管对于声音放大和再生有一些潜力。在 20 世纪 50 年代前,真空管一直是收音机、电视机和整个电子学领域的主要电子器件。

一种相对新的材料——硅单晶,在 20 世纪初曾被用于将无线电通信信号从交流转换为直流。包含这种材料的“半导体”一词最初在德国采用。然而,真正发展成为半导体技术还需要全世界物理化学家和物理学家的共同研究。在半导体特性被完全解释之前,为了理解电子行为的量子理论,这项基础研究工作一直延续了几十年,直到第二次世界大战。

由于数据计算有市场需求,因此产生了第一台机械计算机——霍尔瑞斯机械制表机,它是由赫尔曼·霍尔瑞斯发明的,在令人惊异的六周内把 1890 年人口普查的数据制成了表格。这台制表机由电动机驱动并且依靠穿孔卡工作。在第二次世界大战期间的宾夕法尼亚大学,真空管被用于开发第一台电子计算机 ENIAC。ENIAC 重达 50 吨,占地 3 000 平方英尺,需要 19 000 只真空管,并且使用相当于 160 个灯塔的电量。

ENIAC 除了体积大之外,最主要的缺点是伴随真空管出现的一系列问题。真空管体积大、不可靠,耗电量也大,还会烧毁,使用寿命有限。为了适应迅速发展的电子市场的需求来生产体积小、可靠性强的电子产品,真空管显然不是优选技术。

第二次世界大战后,贝尔实验室的科学家们一直努力研究固态硅和锗半导体晶体。领导这项研究的科学家感到需要替换掉真空管,并且可以从用固态半导体材料代替真空管中受益。

1947 年 12 月 16 日在贝尔实验室诞生了固态晶体管,发明者是威廉·肖克利(William Shockley)、约翰·巴丁(John Bardeen)和沃特·布拉顿(Walter Brattain)。晶体管的名字取自“跨导”和“变阻器”两词,晶体管具有与真空管同样的电学功能,同时还具有固态的显著优点:尺寸小、无需抽真空、可靠、重量轻、最小的发热及



低功耗。这三位科学家由此获得了 1956 年诺贝尔物理学奖。这一发明产生了以固体材料和技术为基础的现代半导体产业。

半导体产业从 20 世纪 50 年代开始迅速成长为以硅为基础的商品化晶体管技术。1957 年,在加利福尼亚州的帕罗阿托市的仙童半导体公司制造出第一个商用平面晶体管。它有一层铝互连材料,这种材料被沉积在硅片的最顶层,以连接晶体管的不同部分。从硅上热氧化生长的一层自然氧化层被用于隔离铝导线。这些层的使用是半导体领域一项重要进展,也是称其为平面技术的原因。

## 1.3 电路集成

半导体这一名称的来源是由于半导体材料有时导电而有时又不导电。最早的半导体材料是由锗建成的,是具有单一功能的简单芯片(器件)。现在,85%以上的芯片都是由半导体材料硅制造的。基于这个原因,本书着重强调半导体材料硅。

半导体产业向前迈进的重要一步是将多个电子器件集成在一个硅衬底上,被称为集成电路,它是由仙童半导体公司的罗伯特·诺伊西(Robert Noyce)和得州仪器公司的杰克·基尔比(Jack Kilby)于 1959 年分别独自发明的。在一块集成电路的硅表面上可以制造许多不同的半导体器件,例如晶体管、二极管、电阻和电容,它们被连成一个有确定芯片功能的电路。集成电路通常意味着芯片和它的全部器件。

可以大致以集成在一块芯片上的器件数来划分电路集成的程度,如表 1-1 所示。

表 1-1 半导体的电路集成

电路集成	半导体产业时期	每个芯片中的器件数
没有集成(器件)	1960 年之前	1
小规模集成电路(SSI)	20 世纪 60 年代前期	2 ~ 50
大规模集成电路(LSI)	20 世纪 70 年代前期到 70 年代后期	5 000 ~ 100 000
超大规模集成电路(VLSI)	20 世纪 70 年代后期到 80 年代后期	100 000 ~ 1 000 000
甚大规模集成电路(ULSI)	20 世纪 90 年代后期至今	> 1 000 000

目前,集成在一块芯片上的器件数仍在持续增长。电路集成的一个重要挑战是半导体制造工艺的能力,即在可接受的成本条件下改善加工技术,以生产高集成度的甚大规模集成电路芯片。为达到此目标,半导体产业已高度标准化,大多数制造商都使用标准化的制造工艺和设备。