



普通高等教育“十三五”规划教材

集成电路制造与封装基础

商世广 金 蕾 赵 萍 谢 端 编著



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

集成电路制造与封装基础

商世广 金 蕾 赵 萍 谢 端 编著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍半导体性质、硅片制备、氧化技术、图形技术、光刻技术、掺杂技术、薄膜物理制备、薄膜化学制备、工艺集成、工艺监控、封装技术、元器件可靠性设计和表面组装等微电子技术领域的基本内容,这些内容为进一步掌握半导体材料、半导体器件与集成电路制造、可靠性设计及表面组装的基本理论和方法奠定了坚实的基础。

本书可作为电子信息类微电子科学与工程、集成电路设计与集成系统、电子科学与技术、光电信息科学与工程、电子信息工程和应用物理学等专业的本科生和相关研究生的专业课程教材,也可供相近专业工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

集成电路制造与封装基础 / 商世广等编著. —北京: 科学出版社, 2018.8

ISBN 978-7-03-058386-4

I. ①集… II. ①商… III. ①集成电路工艺 IV. ①TN405

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 168593 号

责任编辑: 宋无汗 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 8 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018 年 8 月第一次印刷 印张: 24 3/4

字数: 499 000

定价: 108.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

半导体产业已成为事关国民经济、国防建设和人民生活的基础性、战略性新兴产业，也是推进信息化的重要力量。半导体产业的发展水平，已经成为一个国家综合国力发展水平的重要指标。半导体产业是很多国家重点扶持的首选产业之一，在全球已逐渐形成以集成电路设计、制造以及封装与测试为中心的三大产业群。目前，我国半导体产业与西方发达国家有着一定的差距，尤其是制造产业已经成为制约我国半导体产业发展的瓶颈。本书的出版对我国微电子技术专业及电子信息技术相关专业的人才培养具有重要的意义。

《集成电路制造与封装基础》从系统到相对独立性考虑，在内容的选取和编排上力求重点突出、难点分散，叙述了半导体材料的基本性质和制备、半导体工艺的基本原理、薄膜材料制备技术、工艺集成监控、封装技术以及元器件可靠性设计和表面组装等较全面的系列知识。本书的编写简化了深奥的理论论述，深入浅出、通俗易懂。谨希望本书的基础理论知识化作一滴甘泉汇入半导体专业知识的长河，供半导体器件和集成电路设计、制造及应用等信息技术领域的科研与工程技术人员阅读与参考。

本书分为五篇，共计 12 章。第一篇为半导体材料与衬底（第 1 章和第 2 章），主要内容包括半导体的性质、硅和硅片的制备，重点介绍了半导体的分类、缺陷、能带、能级和导电机理，半导体材料硅的提纯和多晶硅制备、单晶硅生长、硅片加工、硅片清洗以及硅片检验包装等。第二篇为半导体工艺原理（第 3~5 章），主要内容包括氧化技术、图形技术和掺杂技术，重点介绍了氧化、光刻、刻蚀、扩散和离子注入等工艺流程。第三篇为薄膜技术（第 6 章和第 7 章），主要内容包括薄膜的物理制备和化学制备，重点介绍了真空的获取和测量、真空蒸镀、溅射镀膜、离子镀、分子束外延和化学气相沉积等技术。第四篇为工艺集成与封装（第 8~10 章），主要内容包括工艺集成、工艺检测及监控和封装技术，重点介绍了欧姆接触、互连、CMOS 和双极型的电路集成、半导体工艺检测以及封装等技术。第五篇为元器件可靠性设计与组装（第 11 章和第 12 章），主要内容包括元器件的可靠性设计和表面组装检测技术，重点介绍了降额设计、热设计、静电防护、抗辐射、耐环境设计、可靠性试验以及表面组装的材料、工艺、在线和功能检测。这些内容为进一步理解和掌握半导体器件和集成电路分析、设计、制造的基本理论与方法奠定了坚实的基础。

本书的第 1、2、6、7 章由商世广编写，第 3~5 章由金蕾编写，第 8~10 章

由赵萍编写，第 11 章和第 12 章由谢端编写，参与绘图的同志有程亨、杜玉环、蒋建朋、杜晓鸽和柴娜等。另外，在本书的编写过程中参阅了许多资料和文献，对参考资料和文献的作者一并表示诚挚的感谢。在编写本书过程中还引用了互联网上的最新技术报道和进展，在此向这些作者和机构表示衷心的感谢。共享资料，以及对某些资料进行加工、修改后引用到本书的，我们在此郑重声明，其著作权属于原作者，并在此向贡献者表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2018 年 3 月

目 录

第一篇 半导体材料与衬底

第 1 章 半导体的性质	3
1.1 半导体的概述	3
1.1.1 半导体的基本性质	3
1.1.2 半导体的发展应用	4
1.2 半导体的晶体结构和分类	7
1.2.1 半导体的晶体结构	7
1.2.2 半导体的分类	11
1.3 半导体的缺陷	12
1.3.1 点缺陷	13
1.3.2 线缺陷	14
1.3.3 面缺陷	15
1.3.4 体缺陷	16
1.4 半导体的电子状态和能带	16
1.4.1 原子能级和晶体能带	16
1.4.2 晶体的能带结构	18
1.5 半导体的导电机制	19
1.6 半导体的杂质能级	20
1.6.1 施主杂质和施主能级	20
1.6.2 受主杂质和受主能级	21
1.7 半导体的缺陷能级	22
1.7.1 点缺陷能级	22
1.7.2 线缺陷能级	25
习题	26
参考文献	26
第 2 章 硅和硅片的制备	27
2.1 硅源的合成	27
2.1.1 硅的初级加工	27

2.1.2 硅的中间产物	28
2.2 多晶硅的提纯与制备	32
2.2.1 多晶硅的提纯	32
2.2.2 多晶硅的制备	32
2.3 单晶硅的生长	35
2.3.1 晶体的掺杂	35
2.3.2 直拉法	37
2.3.3 区熔法	39
2.3.4 其他的制备方法	41
2.4 硅片的加工	42
2.5 硅片的清洗	47
2.5.1 硅片的干法清洗	47
2.5.2 硅片的湿法清洗	48
2.5.3 新型清洗技术	50
2.6 硅片的检验与包装	52
2.6.1 硅片的检验	52
2.6.2 硅片的包装	54
2.7 带状硅的制备	55
习题	57
参考文献	57

第二篇 半导体工艺原理

第3章 氧化技术	61
3.1 二氧化硅的性质和应用	61
3.1.1 二氧化硅的基本结构	61
3.1.2 二氧化硅的性质	63
3.1.3 二氧化硅在集成电路中的应用	64
3.2 热氧化的基本原理	65
3.2.1 二氧化硅的生长	65
3.2.2 迪尔-格罗夫模型	66
3.2.3 决定二氧化硅生长的因素	69
3.2.4 影响二氧化硅生长的因素	71
3.3 氧化方法	75
3.3.1 热生长氧化法	76

3.3.2 掺氯氧化法	81
3.3.3 热分解淀积法	82
3.4 氧化工艺的质量检测	85
3.4.1 氧化膜的缺陷检验	85
3.4.2 氧化膜的物理测量	86
3.4.3 氧化膜的光学测量	87
3.4.4 氧化膜的电学测量	88
3.4.5 氧化层密度的测量	91
习题	92
参考文献	92
第 4 章 图形技术	93
4.1 图形加工	93
4.1.1 图形加工的流程	94
4.1.2 图形加工的缺陷	98
4.2 光刻技术	100
4.2.1 洁净室	101
4.2.2 光刻胶	101
4.2.3 掩膜版	105
4.2.4 光刻技术分类	107
4.2.5 传统曝光技术	110
4.2.6 分辨率增强技术	112
4.2.7 新型曝光技术	114
4.3 刻蚀技术	117
4.3.1 湿法刻蚀	118
4.3.2 干法刻蚀	121
习题	130
参考文献	131
第 5 章 掺杂技术	132
5.1 合金法	132
5.2 扩散技术	133
5.2.1 扩散方程	133
5.2.2 扩散类型	135
5.2.3 扩散机理	139

5.2.4 扩散方法	146
5.2.5 扩散设备	151
5.3 离子注入法	154
5.3.1 离子注入的机理	154
5.3.2 离子注入的分布	159
5.3.3 离子注入的设备	160
5.3.4 离子注入的效应	162
5.3.5 离子注入的应用及展望	165
习题	166
参考文献	166

第三篇 薄膜技术

第6章 薄膜的物理制备	169
6.1 真空技术	169
6.1.1 真空的概念	169
6.1.2 真空的获取	170
6.1.3 真空的检漏	176
6.1.4 真空的测量	177
6.2 真空蒸镀	181
6.2.1 真空蒸镀的原理	181
6.2.2 真空蒸镀的分类及特点	182
6.3 溅射镀膜	184
6.3.1 溅射的基本原理	185
6.3.2 溅射镀膜的分类	186
6.3.3 溅射镀膜的特点	189
6.4 离子镀	190
6.4.1 离子镀的基本原理	190
6.4.2 离子镀的分类	191
6.4.3 离子镀的优点	192
6.5 分子束外延	192
6.5.1 分子束外延的基本原理	193
6.5.2 分子束外延的特点	193
6.5.3 分子束外延的缺陷	194
6.5.4 分子束外延的影响因素	196

6.6 脉冲激光沉积	197
6.6.1 脉冲激光沉积的原理	197
6.6.2 脉冲激光沉积的特点	198
6.6.3 脉冲激光沉积的影响因素	199
习题	200
参考文献	200
第7章 薄膜的化学制备	202
7.1 化学气相沉积	202
7.1.1 化学气相沉积的基本原理	203
7.1.2 化学气相沉积的常用方法	204
7.1.3 化学气相沉积的发展趋势及特点	213
7.2 化学溶液制备	214
7.2.1 化学反应沉积法	214
7.2.2 阳极氧化法	216
7.2.3 电镀法	216
7.2.4 喷雾热分解法	218
习题	219
参考文献	219
 第四篇 工艺集成与封装 	
第8章 工艺集成	223
8.1 金属化与多层互连	223
8.1.1 金属互连线	223
8.1.2 欧姆接触	224
8.1.3 布线技术	227
8.1.4 多层互连	232
8.1.5 铜多层互连系统工艺	235
8.2 CMOS 集成电路工艺	237
8.2.1 隔离工艺	238
8.2.2 双阱工艺	240
8.2.3 薄栅氧化	241
8.2.4 非均匀沟道掺杂	241
8.2.5 自对准工艺	242

8.2.6 源/漏技术与浅结形成	243
8.2.7 CMOS 电路工艺流程	244
8.3 双极型集成电路工艺	250
8.3.1 标准埋层双极型晶体管工艺流程	251
8.3.2 其他先进的双极型集成电路工艺流程	253
习题	255
参考文献	255
第9章 工艺检测及监控	257
9.1 工艺检测的概述	257
9.1.1 第一类工艺检测	257
9.1.2 第二类工艺检测	259
9.2 工艺检测的内容	259
9.2.1 晶片检测	259
9.2.2 氧化层检测	261
9.2.3 光刻工艺检测	262
9.2.4 扩散层检测	263
9.2.5 离子注入层检测	265
9.2.6 外延层检测	266
9.3 工艺监控	267
9.3.1 工艺实时监控	268
9.3.2 工艺检测片	268
9.3.3 集成结构测试图形	268
习题	275
参考文献	275
第10章 封装技术	276
10.1 封装技术发展的现状	276
10.1.1 封装的概念	276
10.1.2 封装的层次	277
10.1.3 封装的作用	278
10.1.4 封装的发展历史	279
10.2 封装的工艺流程	280
10.2.1 芯片减薄和切割	281
10.2.2 芯片贴装	282

10.2.3	芯片互连	284
10.2.4	封装成型技术	292
10.2.5	去飞边毛刺	293
10.2.6	其他工艺流程	293
10.3	封装材料	294
10.3.1	陶瓷封装材料	294
10.3.2	金属封装材料	295
10.3.3	塑料封装材料	296
10.3.4	焊接材料	298
10.3.5	基板材料	298
10.4	先进的封装技术	299
10.4.1	球栅阵列封装	299
10.4.2	芯片尺寸封装	303
10.4.3	晶圆级封装	307
10.4.4	倒装芯片封装	310
10.4.5	多芯片组件封装	314
10.4.6	三维封装	316
	习题	318
	参考文献	319

第五篇 元器件可靠性设计与组装

第 11 章	元器件可靠性设计	323
11.1	可靠性内涵及表征	323
11.1.1	可靠性内涵	323
11.1.2	可靠性表征	324
11.2	可靠性设计分类	328
11.3	降额设计	329
11.4	热设计	332
11.4.1	失效率与温度关系	332
11.4.2	热设计思路	334
11.4.3	表面贴装元件热设计方法	334
11.5	静电防护设计	337
11.5.1	静电放电现象	337
11.5.2	静电放电损伤	338

11.5.3 静电放电防护	339
11.6 抗辐射加固技术	341
11.6.1 辐射效应分类	341
11.6.2 抗辐射加固措施	343
11.6.3 抗辐射加固原则	344
11.7 耐环境设计	344
11.7.1 元器件失效模式	345
11.7.2 耐环境设计方法	346
11.8 可靠性试验	347
11.8.1 可靠性试验方法	347
11.8.2 可靠性筛选种类	349
习题	352
参考文献	353
第 12 章 表面组装技术	354
12.1 表面组装概述	354
12.2 表面组装元器件及印刷电路板	355
12.2.1 表面组装元器件	355
12.2.2 印刷电路板	356
12.3 表面组装工艺材料	358
12.3.1 贴片胶	358
12.3.2 焊膏	359
12.4 表面组装工艺	361
12.4.1 涂敷和贴片技术	363
12.4.2 自动焊接技术	363
12.5 表面组装检测技术	365
12.5.1 组装工序检测	366
12.5.2 常用的检测方法	368
习题	375
参考文献	376
附 表	
附表 A 检测项目和陪片设置	379
附表 B 微电子封装的主要类型	380



第一篇 半导体材料与衬底

第 1 章 半导体的性质

半导体技术是电子信息产业发展的基础，对航空航天技术、国防现代化乃至国民经济都会产生深刻的影响。半导体技术的发展直接依赖于半导体材料的开发和利用。半导体材料是半导体技术的重要分支之一，是半导体技术发展的物质基础。半导体材料在半导体行业中主要用来制作晶体管、固态激光器和集成电路等产品。半导体产品的性能、成品率和可靠性，除了与半导体产品本身的设计和制造工艺有关外，在很大程度上取决于半导体材料的质量。因此，半导体技术的发展，促进了半导体材料性能的提高；而半导体材料内在质量的改进，反过来又推动半导体技术向更高的水平迈进。本章主要介绍半导体材料的性质。

1.1 半导体的概述

常见的半导体有硅（Si）、锗（Ge）和砷化镓（GaAs）等，是制作晶体管、集成电路、电力电子器件和光电子器件的重要材料，支撑着通信、计算机、信息家电与网络技术等信息产业的发展。半导体是导电性可受控制，范围为绝缘体至导体的材料，它的发展对半导体工业的发展具有极大的影响。

1.1.1 半导体的基本性质

根据材料的导电性质，通常把导电性、导热性差的材料，称为绝缘体；而把导电性和导热性都比较好的金属材料称为导体；把介于绝缘体和导体之间的材料称为半导体^[1]。典型三种材料的电阻率和电导率，如图 1-1 所示。

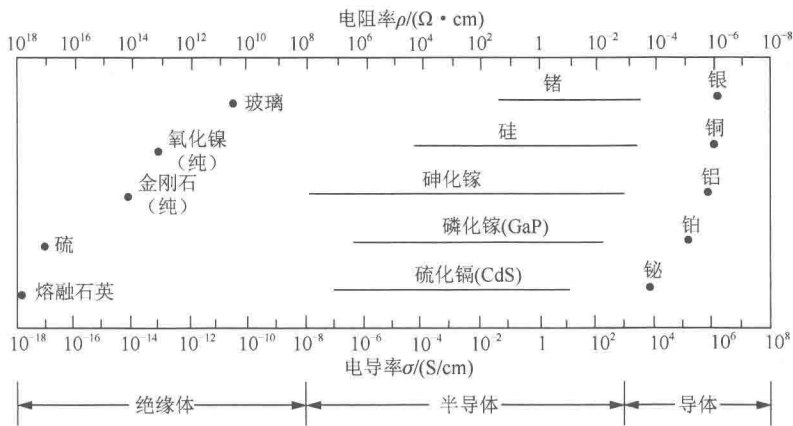


图 1-1 典型绝缘体、半导体及导体的电阻率和电导率范围

从图 1-1 中可以看出, 绝缘物质的电阻率分布在 $10^8 \sim 10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$, 如熔融石英、金刚石、玻璃和硫等固态物质都分布在这个区间; 导体物质的电阻率一般小于 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, 如铋、铂、铝、铜和银等金属都处于这个区间; 而电阻率在 $10^{-3} \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$, 介于绝缘体和导体之间的固态物质, 则是本书主要研究的固态物质——半导体材料, 如锗、硅和砷化镓等。半导体材料的主要特性^[2]如下所示。

1) 掺杂特性

完全不含杂质且无晶格缺陷的纯净半导体称为本征半导体, 其电阻率很高。如果在本征半导体中有选择地掺入微量的某种杂质元素, 就会使它的电阻率发生极大的变化。例如, 在室温下的纯硅中掺入百万分之一的硼元素, 其电阻率就会从 $2.14 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 减小到 $0.4 \Omega \cdot \text{cm}$, 可以使硅的导电能力提高 50 多万倍。这种适当掺入极微量的杂质元素, 使导电性能显著增加的现象, 是半导体最显著、最突出的特性——掺杂特性。正是通过掺入某些特定的杂质元素, 可人为地、精确地控制半导体的导电能力, 用以制作各种半导体器件。

2) 光敏特性

半导体的电阻率对光的变化十分敏感。有光照时, 电阻率很小; 无光照时, 电阻率很大。例如, 常用的硫化镉光敏电阻, 在没有光照时, 电阻高达几十兆欧姆; 受到光照时, 电阻降到几十千欧姆, 电阻值改变了上千倍。利用半导体的光敏特性, 可制作出多种类型的光电器件, 如光电二极管、光电三极管和硅光电池等。

3) 热敏特性

半导体的电阻率随温度变化会发生明显的改变。例如, 纯锗温度每升高 10°C , 其电阻率就要减小到原来的 $1/2$ 。温度的细微变化, 能从半导体电阻率的明显变化上反映出来。这种半导体的导电能力与温度的密切关系特性, 称为半导体的热敏特性。利用半导体的热敏特性, 可以制作感温元件——热敏电阻, 可应用于温度测量和控制系统中。值得注意的是, 各种半导体器件都因存在着热敏特性, 在环境温度变化时影响其工作的稳定性。

此外, 半导体材料还具有负电阻率温度特性、整流特性、电场和磁场效应等特性。

1.1.2 半导体的发展应用

半导体因其独特的电学性能, 受到人们的广泛关注和深入研究。在实际的应用中, 出现了整流管、三极管、场效应管以及平面工艺后的大规模集成电路和超大规模集成电路, 同时开发出高温、高频、抗辐射及大功率等特殊的半导体器件。半导体的研发水平及产业化规模已成为衡量一个国家经济社会发展、科技进步和