


半导体 制造工艺基础

*BANDAOTI
ZHIZAO GONGYI JICHU*

[美] 施 敏 梅凯瑞 / 著
陈军宁 柯导明 孟 坚 / 译

安徽大学出版社



半导体制造工艺基础

[美] 施敏 梅凯瑞 著

陈军宁 柯导明 孟 坚 译

安徽大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

半导体制造工艺基础/[美] 施敏,梅凯瑞著;陈军宁,柯导明,孟坚译.
—合肥:安徽大学出版社,2007.4
ISBN 978-7-81110-292-5

I.半... II.①施...②梅...③陈...④柯... III.半导体工艺
IV. TN305

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 040649 号

半导体制造工艺基础

[美] 施敏 梅凯瑞 著
陈军宁 柯导明 孟坚 译

出版发行 安徽大学出版社
(合肥市肥西路3号 邮编 230039)
联系电话 编辑部 0551-5107145
发行部 0551-5107784
电子信箱 ahdxchps@mail.hf.ah.cn
责任编辑 朱夜明
封面设计 孟献辉

印刷 中国科学技术大学印刷厂
开本 787×1092 1/16
印张 18.5
字数 447千
版次 2007年4月第1版
印次 2007年4月第1次印刷

ISBN 978-7-81110-292-5

定价 23.00 元

如有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换

序

本书介绍了从晶体生长到集成器件和电路的完整的半导体制造技术,其中包括制造流程中主要步骤的理论和实践经验。本书适合于物理、化学、电子工程、化学工程和材料科学等专业本科高年级或硕士研究生一年级学生《集成电路制造》课程的教学。该课程授课时间为一个学期,不要求必须开设相应的实验课。同时,本书也可供在半导体工业领域工作的工程师和科学家参考。

本书第一章简要回顾了半导体器件和关键技术的发展历史,并介绍了基本的制造步骤。第二章涉及晶体生长技术。后面几章是按照集成电路典型制造工艺流程来安排的。第三章介绍硅的氧化技术。第四章和第五章分别讨论了光刻和刻蚀技术。第六章和第七章介绍半导体掺杂的主要技术:扩散法和离子注入法。第八章涉及一些相对独立的工艺步骤,包括各种薄层淀积的方法。本书最后三章集中讨论制版和综合。第九章通过介绍晶体工艺技术、集成器件和微机电系统加工等工艺流程,将各个独立的工艺步骤有机地整合在一起。第十章介绍集成电路制造流程中高层次的一些关键问题,包括电学测试、封装、工艺控制和成品率。第十一章探讨了半导体工业所面临的挑战,并展望了其未来的发展前景。

本书每一章都以引言开始,并逐条列举出学习的目标,最后对一些重要的概念进行总结。每章均提供一些实例及解答,最后都附有课外习题。若干章节提及了工艺模拟的概念,使用流行的应用工具软件包 SUPREM 和 PROLITH 进行处理。掌握这些软件可以作为学习本课程的补充,但不能取代学习和掌握有关微电子工艺的基本概念。

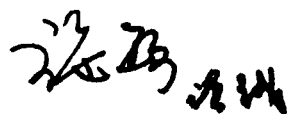
教师手册提供每章习题的详细解答,它适用于所有采用本书授课的教师。本书的电子版提供了书中所有的插图,出版商的网址是:<http://www.wiley.com/college/may>。

中文版序

集成电路(IC)自1961年发展到今,其最小线宽已由25微米缩小到65纳米(近400倍)。而IC所含器件数目则由6个增加到80亿个(超过10亿倍)。人类从来没有任何工业有如此快速之发展,而其对人类生活品质之提高更是史无前例。

随着电路技术如此惊人发展,主要半导体工艺之不断进步,我们预计到2020年,集成电路线宽可能降到10纳米左右,而届时全球以集成电路为核心之电子产品销售额将超过50,000亿美元。

中国正处于大力发展集成电路之阶段,因之急需大批专业人才。现将《半导体制造工艺基础》请安徽大学电子科学与技术学院译成简体中文出版。本书适合大学本科微电子相关专业学生作为教科书,也适合广大从事微电子技术科研、产业的技术人员作为参考。深望此书之发行有助于中国半导体工业之快速发展。



2005年4月

致 谢

作者要感谢美国国家纳米器件实验室 T. C. Chang 博士、T. S. Chao 博士、M. C. Chiang 博士、F. H. Ko 博士和 S. C. Wu 博士,以及国立嘉义大学 T. L. Li 教授对本书的有益建议和探讨。我们还要感谢 N. Erdos 先生对书稿所做的技术编辑工作、Iris LIN 女士完成数次草稿修订的打字工作,以及国立交通大学 Y. C. Yang 女士为本书提供了数百张技术图片。

对于 John Wiley & Sons 出版社,我们感谢 W. Zobrist 先生鼓励我们承担本书的撰写工作。我施敏本人还对国立交通大学思源基金会的资助表示感谢,也感谢联华电子讲座教授奖金为本书的编著提供了良好的工作环境。G. S. May 也同样对摩托罗拉教授基金的资助表示感谢。

目 录

第1章 引言	1
1.1 半导体材料	1
1.2 半导体器件	2
1.3 半导体工艺技术	5
1.3.1 一些关键的半导体技术	5
1.3.2 半导体技术发展趋势	9
1.4 基本工艺步骤	11
1.4.1 氧化	11
1.4.2 光刻和刻蚀	11
1.4.3 扩散和离子注入	13
1.4.4 金属化	13
1.5 总结	13
参考文献	13
第2章 晶体生长	16
2.1 从熔融硅中生长单晶硅	16
2.1.1 原材料	16
2.1.2 Czochralski 法(直拉法)	17
2.1.3 掺杂分布	18
2.1.4 有效分凝系数	20
2.2 硅的区熔(float-zone)法单晶生长工艺	21
2.3 砷化镓晶体的生长技术	24
2.3.1 原材料	24
2.3.2 晶体生长技术	26
2.4 材料特性	27
2.4.1 晶片成形	27
2.4.2 晶体特性	29
2.5 总结	33
习题	33

参考文献	34
第3章 硅的氧化	36
3.1 热氧化过程	36
3.1.1 生长机理	37
3.1.2 薄氧化层生长	43
3.2 氧化过程中的杂质再分布	43
3.3 二氧化硅的掩模特性	44
3.4 氧化质量	45
3.5 氧化层厚度特性	46
3.6 氧化模拟	48
3.7 总结	50
参考文献	50
习题	51
第4章 光刻	52
4.1 光学光刻(Optical lithography)	52
4.1.1 洁净室	52
4.1.2 曝光装置	54
4.1.3 掩模	57
4.1.4 光刻胶	58
4.1.5 图形转移	60
4.1.6 分辨率增强技术	61
4.2 新一代的曝光法	62
4.2.1 电子束曝光	62
4.2.2 超紫外光曝光	66
4.2.3 X射线曝光	66
4.2.4 离子束曝光	67
4.2.5 各种曝光方法的比较	68
4.3 光刻模拟	69
4.4 总结	70
参考文献	71
习题	72
第5章 刻蚀	74
5.1 湿法化学刻蚀(wet chemical etching)	74
5.1.1 硅的刻蚀	75
5.1.2 二氧化硅的刻蚀	76
5.1.3 氮化硅和多晶硅的刻蚀	76

5.1.4 铝的刻蚀	76
5.1.5 砷化镓的刻蚀	78
5.2 干法刻蚀	78
5.2.1 等离子体刻蚀基本原理	79
5.2.2 刻蚀机理、等离子体诊断和端点控制	79
5.2.3 反应等离子体刻蚀技术和设备	81
5.2.4 反应等离子体刻蚀的应用	84
5.3 刻蚀仿真	87
5.4 总结	89
参考文献	89
习题	89
第6章 扩散	91
6.1 基本扩散工艺	91
6.1.1 扩散方程	92
6.1.2 扩散分布	94
6.1.3 扩散层测量	97
6.2 非本征扩散	99
6.3 横向扩散	102
6.4 扩散模拟	103
参考文献	105
习题	105
第7章 离子注入	107
7.1 注入离子的范围	107
7.1.1 离子分布	108
7.1.2 离子驻留	109
7.2 注入损伤和退火	114
7.2.1 注入损伤	114
7.2.2 退火	115
7.3 注入相关工艺	118
7.3.1 多次注入及掩蔽	118
7.3.2 倾斜角度离子注入	120
7.3.3 高能量与大电流注入	120
7.4 离子注入模拟	121
7.5 总结	122
参考文献	123
习题	123

第8章 薄膜淀积	125
8.1 外延生长技术	125
8.1.1 化学气相淀积	125
8.1.2 分子束外延	129
8.2 外延层结构及缺陷	132
8.2.1 晶格匹配外延和应力层外延	132
8.2.2 外延层中的缺陷	134
8.3 电介质淀积	134
8.3.1 二氧化硅	135
8.3.2 氮化硅	139
8.3.3 低介电常数材料	140
8.3.4 高介电常数材料	142
8.4 多晶硅淀积	143
8.5 金属化	145
8.5.1 物理气相淀积	145
8.5.2 化学气相淀积	146
8.5.3 铝金属化	146
8.5.4 铜金属化	149
8.5.5 硅化物	152
8.6 淀积模拟	153
8.7 总结	154
参考文献	155
习题	156
第9章 工艺集成	159
9.1 无源单元	160
9.1.1 集成电路的电阻	160
9.1.2 集成电路的电容	162
9.1.3 集成电路的电感	163
9.2 双极型工艺	164
9.2.1 基本制造工艺	165
9.2.2 介质隔离	168
9.2.3 自对准双多晶硅双极型结构	169
9.3 MOSFET 技术	171
9.3.1 基本的制造工艺	172
9.3.2 存储器件	175
9.3.3 CMOS 技术	179
9.3.4 BiCMOS 技术	185

9.4 MESFET 技术	187
9.5 MEMS 技术	189
9.5.1 体显微机械加工	189
9.5.2 表面显微机械加工	189
9.5.3 LIGA 工艺	190
9.6 工艺模拟	192
9.7 总结	198
参考文献	198
习题	199
第10章 集成电路制造	202
10.1 电测试	202
10.1.1 测试结构	203
10.1.2 最后测试	204
10.2 封装	205
10.2.1 管芯分离	205
10.2.2 封装类型	206
10.2.3 粘接方法	208
10.3 统计工艺控制	212
10.3.1 品质控制图	213
10.3.2 变量控制图	214
10.4 统计实验设计	217
10.4.1 分布比较	217
10.4.2 方差分析	218
10.4.3 因素设计	221
10.5 成品率	224
10.5.1 功能成品率	224
10.5.2 参数成品率	228
10.6 计算机集成制造	229
10.7 总结	230
参考文献	230
习题	231
第11章 未来趋势和挑战	233
11.1 未来的挑战	233
11.1.1 超浅结形成	234
11.1.2 超薄氧化层	234
11.1.3 硅化物的形成	235
11.1.4 互连新材料	235

11.1.5 电源限制	235
11.1.6 SOI 技术	235
11.2 片上系统	236
11.3 总结	237
参考文献	237
习题	238
附录	239
索引	266

第1章 引言

目前,电子工业已成为世界上最大的工业。自1998年以来,电子工业全球市场份额已经超过1万亿美元,而半导体器件则是电子工业的基础。图1.1给出了过去的20年以及预计到2010年基于半导体器件的电子工业市场销售额的变化情况,并且给出全球生产总值(GWP)和汽车工业、钢铁工业、半导体工业市场销售额的变化情况^[1,2]。从图中我们看到,1998年电子工业市场销售额开始超过汽车工业。如果按照这样的发展趋势继续下去,预计到2010年电子工业全球市场销售额将达到3万亿美元,将占全球生产总值的10%。作为电子工业基础部分的半导体工业将以更高的速度发展,并将于21世纪初超过钢铁工业,到2010年将占电子工业的25%。

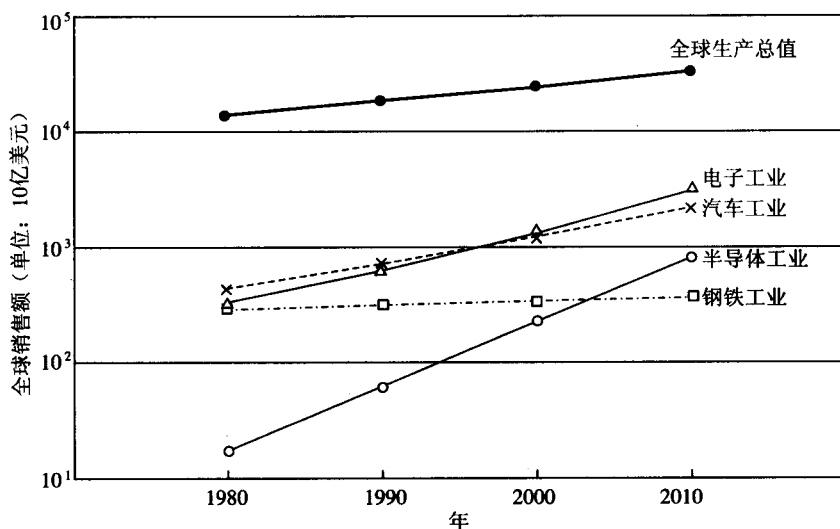


图 1.1 1980~2000 年并预测到 2010 年全球生产总值(GWP)以及电子、汽车、半导体和钢铁工业的销售额

数万亿美元销售额的电子工业的发展依赖于半导体集成电路制造工业的发展。固态计算、通信、航空航天、汽车和消费电子工业都严重依赖半导体器件和集成电路。因此,要理解现代电子工业必须学习和掌握半导体材料、器件和制造工艺等方面的基础知识。尽管本教材主要介绍集成电路制造的基本工艺,我们还是有必要首先对以上三个主题的历史作一个简短的回顾。

1.1 半导体材料

锗是最早用于制造半导体器件的材料之一。事实上,1947年巴丁(Bardeen)、布莱登(Brattain)和肖克莱(Shockley)就是使用锗制造出了世界上第一只晶体管。然而,自20世纪60年代初期以来,锗很快被硅取代。硅之所以成为主导材料是因为它具有以下几个优

点:首先,硅非常容易氧化并形成高品质的二氧化硅(SiO_2)绝缘层,二氧化硅对 IC 制造的选择性扩散工艺来说是极好的阻挡层;其次,硅的禁带宽度比锗大,这就意味着硅器件比相应的锗器件具有更大的工作温度范围;最后,或许是最为重要的优点就是作为普通沙子主要成分的硅元素,在自然界中含量极大,价格低廉。因而硅是非常廉价的半导体原材料。

另外一个在集成电路制造中广泛使用的半导体材料是砷化镓(GaAs)。尽管砷化镓的电子迁移率比硅高,但是它具有制造工艺方面的局限性:包括热处理的稳定性差、氧化特性差、价格高昂和缺陷密度高等等。因此,硅已成为集成电路的主要原材料,本书中将重点介绍。砷化镓主要用于高速电路(频率为 1GHz 以上),并且相对来说集成度比较低。

1.2 半导体器件

利用半导体材料独有的特性而发明、生产出的应用范围宽广、品种繁多、设计精巧的半导体器件,已经彻底改变了我们的生活。人们研究半导体器件已经超过 125 年^[3],迄今为止,大约已有 60 多种主要的器件以及与之相关的 100 多种变种器件^[4]。表 1.1 按年代顺序列出了部分主要的半导体器件。

最早系统研究半导体器件(金属-半导体接触)的人当属布劳恩(Braun)^[5],他在 1874 年发现了金属和金属硫化物(比如黄铜矿)的接触电阻值依赖于外加电压的大小和方向。1907 年,劳恩德(Round)^[6]发现了电致发光现象(发光二极管,LED)。当他在一块金刚砂晶体上的两点间加上 10V 的电压时,观察到了晶体发出黄光。

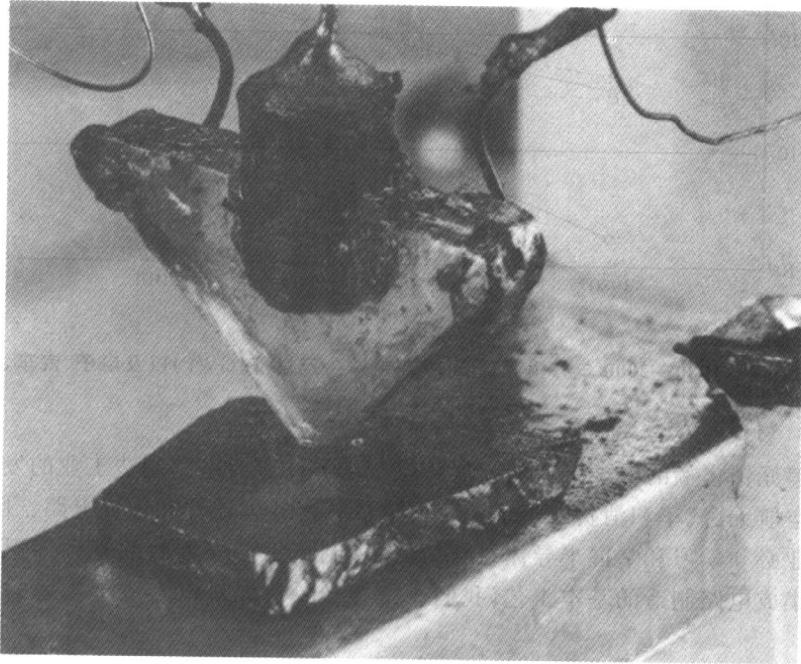


图 1.2 世界上第一只晶体管^[7](照片由 Bell 实验室提供)

1947 年,巴丁(Bardeen)和布莱登(Brattain)^[7]发明了点接触晶体管。紧接着,1949 年肖克莱(Shockley)^[8]发表了关于 $p-n$ 结和双极型晶体管的经典文章。图 1.2 就是世界上第一只晶体管。在三角形石英晶体底部的两个点接触是由相隔 $50\mu\text{m}$ ($1\mu\text{m}=10^{-4}\text{cm}$)的

金箔线压在半导体表面做成的,所用的半导体材料是锗。当一个接触点正偏(也就是说相对于第三个接触点加正的电压),而另一个接触点反偏时,可以观察到输入信号被放大的晶体管行为。双极型晶体管是一个关键的半导体器件,它开创了现代电子时代的新纪元。

1952年,埃伯斯(Ebers)^[9]提出了用途最多的开关器件——晶闸管的基本模型。1954年,Chapin^[10]等人发明了采用硅 $p-n$ 结的太阳能电池。太阳能电池是从太阳获得能量的主要器件,它能够将日光直接转换为电能,并且几乎不产生污染。1957年,Kroemer^[11]建议采用异质结双极型晶体管来提高晶体管的性能,这种器件有潜力成为速度最快的半导体器件之一。1958年,江崎(Esaki)在一个重掺杂的 $p-n$ 结中观察到了负阻特性,从而有了隧道二极管的发明。隧道二极管以及与之相关的隧穿现象对欧姆接触和薄层间的载流子穿透理论具有很大的贡献。

表 1.1 主要半导体器件

年份	半导体器件	作者/发明者	参考文献
1874	金属-半导体接触 ^a	Braun	5
1907	发光二极管(LED) ^a	Round	6
1947	双极型晶体管(BJT)	Bardeen 和 Brattain; Shockley	7, 8
1949	$p-n$ 结 ^a	Shockley	8
1952	晶闸管	Ebers	9
1954	太阳能电池 ^a	Chapin, Fuller 和 Pearson	10
1957	异质结双极型晶体管(HBT)	Kroemer	11
1958	隧道二极管 ^a	Saki	12
1960	金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)	Kahng 和 Atala	13
1962	激光 ^a	Hall 等	15
1963	异质结激光 ^a	Kroemer; Alferov 和 Kazarinov	16, 17
1963	转移电子晶体管(TED) ^a	Gunn	18
1965	碰撞电离雪崩渡越时间二极管(IMPATT) ^a	Johnston, Deloach 和 Cohen	19
1966	金属半导体场效应晶体管(MESFET)	Mead	20
1967	非挥发性半导体存储器(NVSM)	Kahng 和 施敏	21
1970	电荷耦合元件(CCD)	Boyle 和 Smith	23
1974	共振隧穿二极管 ^a	张立纲, Esaki 和 Tsu	24
1980	调制掺杂场效应晶体管(MODFET)	Mimura 等	25
1994	室温单电子存储器(SEMC)	Yano 等	22
2001	15nm 金属氧化物半导体场效应晶体管	Yu 等	14

注: MOSFET, metal-oxide-semiconductor field-effect transistor; MESFET, metal-semiconductor field-effect transistor; MODFET, modulation-doped field-effect transistor

上标^a表示的是两端器件,其他的是三端或四端器件

对于先进的集成电路而言,最重要的器件是 MOSFET(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, 金属氧化物半导体场效应晶体管),它首先是由 Kahng 和 Atalla^[13]于 1960 年报道的。图 1.3 给出了使用热氧化硅衬底制成的第一个器件的照片。该器件的栅极长度为 $25\mu\text{m}$, 栅极氧化层的厚度为 100nm ($1\text{nm} = 10^{-7}\text{cm}$)。两个类似锁眼的孔是源

极和漏极的接触之处,表面狭长的区域是利用金属掩模淀积出的铝栅极。虽然当前 MOSFETs 器件已缩小到深亚微米的范围,但是第一个 MOSFET 所采用的硅衬底和热生长得到的硅氧化层,依然是最常用、最重要的选择。MOSFET 和与之相关的集成电路目前已占到整个半导体器件市场 90% 的份额。最近,一个沟道长度只有 15nm 的超小型的 MOSTET 已经被制造出来^[14],它将被使用在最先进的、集成度超过 1 兆($>10^{12}$)个晶体管的集成电路芯片上。

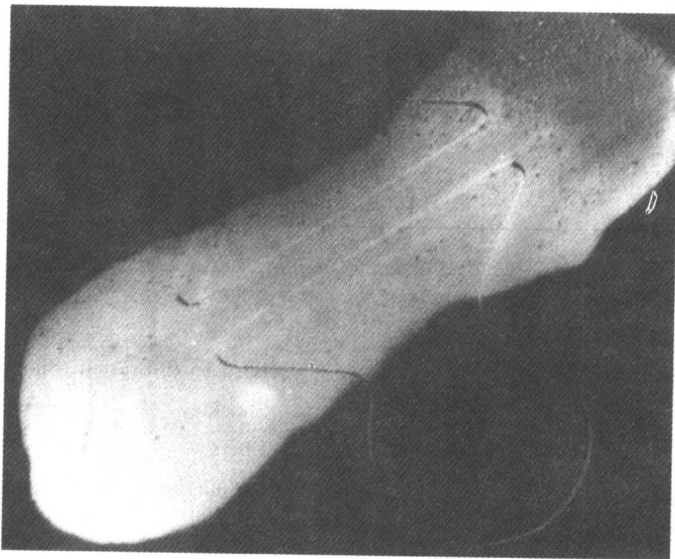


图 1.3 世界上第一个 MOSFET^[13](照片由 Bell 实验室提供)

1962 年,霍尔(Hall)^[15]等人第一次在半导体中成功获得受激辐射。1963 年,Kroemer^[16]、Alferov 和 Kazarinov^[17]提出了异质结构激光。这些提议奠定了现代激光二极管的基础,使得激光器可以在室温下持续工作。激光二极管是应用广泛的关键器件,可用于数字视频、光纤通信、激光影印和大气污染监测等。

在随后的几年中,三种重要的微波器件相继被发明或制造出来。第一种是由 Gunn^[18]于 1963 年发明的转移电子晶体管(TED,也称 Gunn 二极管)。TED 被广泛地应用于毫米波波段的领域中,比如检测系统、远程控制 and 微波测试仪器等。第二种器件是碰撞电离雪崩渡越时间二极管(IMPATT),它是由 Johnston 等人^[19]于 1965 年发明的。它是目前在所有半导体器件中能够在毫米波段下产生最大连续波功率的器件,被应用到雷达系统和警报系统上。第三种器件就是 MESFET(metal-semiconductor field-effect transistor,金属半导体场效应晶体管),它是 Mead^[20]于 1966 年发明的。这种器件是单片微波集成电路(MMIC)的关键器件。

Kahng 和施敏^[21]于 1967 年发明了一种非常重要的半导体存储器件。它是一种非挥发性半导体存储器(NVSM),能够在掉电后依然保持它所储存的信息。虽然它和传统的 MOSFET 非常相似,但是最大的区别在于它增加了一个“浮置栅”,能够半永久性地储存电荷。由于 NVSM 具有非挥发性、高器件密度、低功耗和电可重写性(即存储的电荷可通过控制栅极外加电压移除或获得)等突出的优点,它已经成为便携式电子系统诸如手机、笔记本

电脑、数码相机和智能卡等设备的主流存储器。

浮置栅非挥发性半导体存储器的极限是单电子存储器单元(SEMC),它是将浮置栅的长度缩小到极小的尺寸(比如 10nm)所获得的器件。在这种尺度下,当一个电子移入浮置栅,浮置栅的电压就会改变,并阻止其他电子进入。SEMC 是终极的浮置栅存储器单元,因为我们只需要一个电子就可以存储信息。1994 年,Yano 等人^[22]第一次发明了可在室温下工作的单电子存储器,它将成为可存储超过 1T 位信息的最先进的半导体存储器的基础。

电荷耦合器件(CCD)是由波义耳(Boyle)和史密斯(Smith)^[23]于 1970 年发明的,被广泛地应用于数字像机和光学传感器中。1974 年,张立纲等人^[24]第一次研究了共振隧穿二极管(RTD),它是大多数量子效应器件的基础。量子器件能够大量减少器件数目而完成给定的电路功能,因此它具有极高密度、超高速和更强的功能性。1980 年,Mimura 等人^[25]发明了 MODFET(modulation-doped field-effect transistor,调制掺杂场效应晶体管)。如果选用合适的异质结材料,MODFET 可望成为速度最快的场效应晶体管。

自从 1947 年发明双极型晶体管以来,由于先进技术、新材料和深入研究成果的应用,半导体器件的数量和种类以惊人的速度在增加。然而,一个显而易见的问题是:利用基本的半导体材料制造出那些令人惊奇不已的半导体器件需要什么样的工艺技术呢?

1.3 半导体工艺技术

1.3.1 一些关键的半导体技术

很多重要的半导体技术起源于几个世纪以前就发明出来的工艺技术。例如,早在 2000 多年以前^[26],居住在位于非洲西部海岸的 Lake Victoria 的人们就开始利用熔炉进行金属结晶体的生长,这种加工工艺是用来在预先加热的人工通风的熔炉中生产碳素钢的。另外一个例子是 1798 年就已经发明的平版印刷术,这种工艺最初是使用石片(又称为石版印刷)将模版上的图案转印过来^[27]。本节将关注各种首次被应用到半导体工艺或是专门为制造半导体器件而被研发出来的具有里程碑意义的工艺技术。

表 1.2 按年代顺序列出了 21 种关键的半导体技术。1918 年,Czochralski^[28]发明了一种液态—固态单晶生长的技术——Czochralski 晶体生长方法(直拉法),这种方法至今依然使用在大多数硅片生产的工艺中。另一种晶体生长技术是在 1925 年由 Bridgman^[29]发明的,称为 Bridgman 晶体生长技术,它被广泛应用于砷化镓以及其他一些化合物半导体的晶体生长过程中。尽管自 20 个世纪 40 年代起,人们就对硅半导体材料的特性进行了广泛深入的研究,但化合物半导体特性的研究却被忽视了很长时间,直到 1952 年,Welker^[30]发现砷化镓以及 III—V 族化合物也是半导体材料,并通过实验证明这些材料的半导体特性之后,这些化合物半导体的技术和器件才逐步被深入研究。

杂质原子在半导体中的扩散是一个重要的半导体器件加工工艺。1855 年,Fick^[31]提出了基本扩散理论。1952 年,Pfann^[32]在其一项专利中公开了他利用扩散技术改变硅的导电类型的思想。1957 年,Andrus^[33]将古老的平版印刷工艺应用到现代半导体器件的制造中,他使用具有感光特性、抗刻蚀的聚合物(光刻胶)将版图转印过来。平版印刷技术是半导体工业中的一项非常关键的技术,半导体工业之所以能够持续快速的成长,也主要归功于不断提高的半导体平版印刷技术。平版印刷技术也是集成电路制造的非常重要的经济因素,目