

TURING

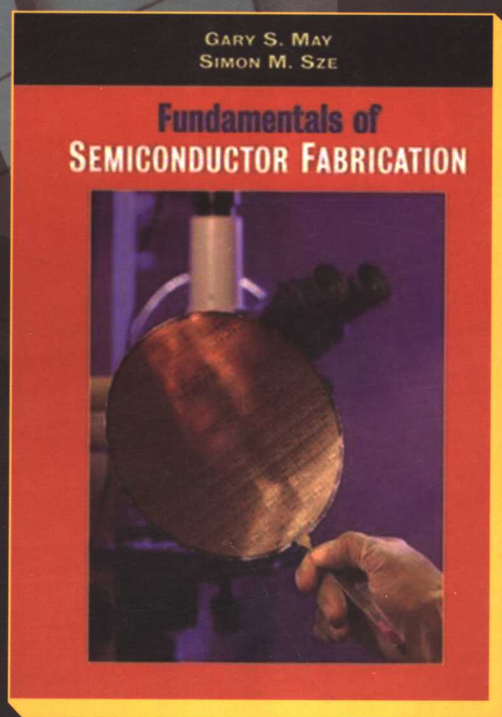
图灵电子与电气工程丛书

WILEY

半导体制造基础

Fundamentals of Semiconductor Fabrication

[美] Gary S. May 施敏 著
代永平 译



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

TURING

图灵电子与电气工程丛书

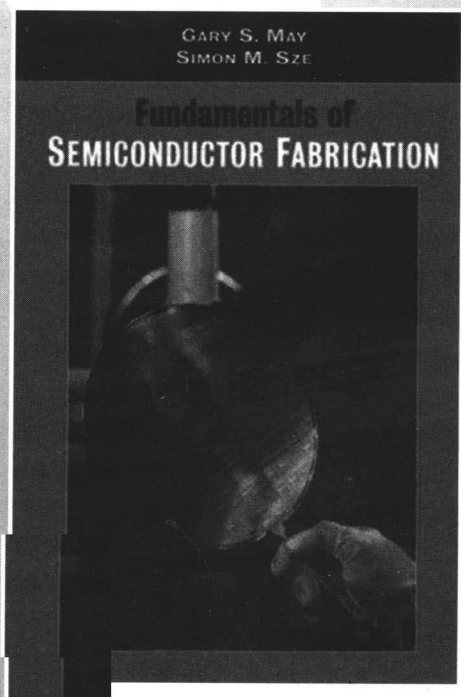
TN305/11

2007

半导体制造基础

Fundamentals of Semiconductor Fabrication

[美] Gary S. May 施敏 著
代永平 译



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

半导体制造基础 / (美) 梅 (May, G. S.), (美) 施敏 (Sze, S. M.) 著; 代永平译. —北京: 人民邮电出版社, 2007.11
(图灵电子与电气工程丛书)
ISBN 978-7-115-16639-5

I. 半… II. ①梅…②施…③代… III. 半导体工艺—高等院校—教材 IV. TN305

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 119050 号

内 容 提 要

本书在简要介绍半导体制造流程的基础上,着力从理论和实践两个方面对晶体生长、硅氧化、光刻、刻蚀、扩散、离子注入和薄膜淀积等主要制备步骤进行详细探讨。本书所有内容的讲解都结合了计算机仿真和模拟工具,并将工艺模拟作为问题分析与讨论的工具。

本书可作为高等院校微电子和材料科学等专业高年级本科生或者一年级研究生的教材。

图灵电子与电气工程丛书

半导体制造基础

-
- ◆ 著 [美] Gary S. May 施 敏
译 代永平
责任编辑 朱 巍
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销
 - ◆ 开本: 700 × 1000 1/16
印张: 17.5
字数: 380 千字 2007 年 11 月第 1 版
印数: 1—4 000 册 2007 年 11 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2007-3047 号

ISBN 978-7-115-16639-5/TN

定价: 45.00 元

读者服务热线: (010)88593802 印装质量热线: (010)67129223

版 权 声 明

Original edition, entitled *Fundamentals of Semiconductor Fabrication* by Gary S. May and Simon M. Sze, ISBN 0-471-23279-3, published by Wiley Publishing, Inc. Copyright © 2003 John Wiley & Sons, Inc. .

All rights reserved. This translation published under license.

Translation edition published by POSTS & TELECOM PRESS Copyright 2007.

本书简体中文版由 Wiley Publishing, Inc. 授权人民邮电出版社独家出版。
版权所有,侵权必究。

译者序

目前,以集成电路为核心的电子信息产业超过了以汽车、石油、钢铁为代表的传统工业成为第一大产业,并成为改造和拉动传统产业向数字时代迈进的强大引擎。21 世纪集成电路技术的发展仍然需要依靠制备工艺技术的不断改进,使得器件的特征尺寸不断缩小,从而集成度不断提高,功耗降低,器件性能得到提高。在微电子学领域,尽管砷化镓等化合物用作半导体材料的研究及在某些领域的应用方面取得了很大进展,但还远不具备替代单晶硅工艺的条件。单晶硅集成电路技术发展至今,已经吸纳了全世界数以万亿美元计的设备 and 科技投入,形成了非常强大的产业规模和制备能力。同时,长期的科研投入已使人们对硅及其衍生物各种属性的了解达到十分深入、透彻的地步,这是非常宝贵的知识积累。

在传播半导体集成电路知识的历史上,本书作者之一施敏教授以其较高的学术造诣,相当长时间以来耕耘在编纂教科书的园地上,而且硕果累累。他在 1969 年所编写的《半导体器件物理学》(*Physics of Semiconductor Devices*)一书成为近代工程及应用科学领域被引用最多的文献。随后,施敏教授又陆续撰写了 *VLSI Technology* 和 *Semiconductor Devices: Physics and Technology*,这两本书都及时反映了当时的半导体器件加工工艺水平。进入 21 世纪,施敏教授与 G. S. May 教授合作撰写了本书,及时反映了亚微米、深亚微米硅基器件制备中使用成熟的工艺和设备。实际上,20 世纪 80 年代中期我国集成电路的加工水平为 5 微米,其后,经历了 3、1、0.8、0.5、0.35、0.18 微米的发展,目前已达到了 0.13 微米的水平,而当前国际水平为 0.09 微米(90 纳米),我国仍与之相差约为 2~3 代。

本书提供了大量简明的物理描述和丰富的工艺过程数据,不仅适合作为大学本科和研究生教材,而且对在半导体器件领域从事实际工作的工程师和科研人员而言,也不失为一本有用的参考书。

最后我要特别感谢天津大学微电子中心的张为副教授,正是由于他对本书原著的热情推崇,才使我静心坐下来,认识到该书的实用价值并完成中文翻译。另外应当声明,由于译者水平所限,书中难免存在翻译不当甚至误译之处,恳请读者不吝教正。

译者

前 言

本书介绍了从晶体生长到器件和电路集成的半导体制造技术,覆盖制造工序中主要步骤的理论与实践的方方面面,旨在用作微电子和材料科学高年级本科生或者一年级研究生的教材。本书适用于长学期的集成电路制造课程,这类课往往配有一门并修实验室课程,亦可作为半导体工业中从事实际工作的工程科研人员的参考书。

第1章简要回顾了主要半导体器件和关键技术发展的历史,同时介绍了半导体制造的基本步骤;第2章介绍晶体生长技术。接下来几章按照典型制造工序来组织内容:第3章阐述硅氧化;光刻和刻蚀分别在第4章和第5章中讨论;第6章和第7章叙述杂质侵入的主要技术——扩散和离子注入;第8章为单次工艺介绍的最后一章,涵盖了各种薄膜淀积方法。最后3章把论述重心放在宽泛的总结性话题上:第9章通过阐明关键工艺技术、集成器件和微机电系统(MEMS)的工艺流程,把各道工艺步骤集合在一起;第10章介绍了高水平集成电路制造存在的问题,包括电学测试、封装、工艺控制和成品率等;最后,第11章讨论了半导体工业的前景和面临的挑战。

各章以简介开始并列学习重点及重要概念小结,同时章节中配有解析例题,并在各章结尾给出对应习题。在其中几章涉及的工艺模拟,采用流行的 SUPREM 和 PROLITH 软件包作为应用工具。掌握和使用这些软件旨在利用微电子工艺过程辅助基本概念学习,而并非代替学习。

所有各章结尾的习题均有完整答案(其中标注星号的是难度较高的习题),采纳该书的院系可以使用教师手册及书中图表的电子版,请通过以下网址获取:
<http://www.wiley.com/college/may>。

致 谢

我们衷心感谢中国台湾纳米器件实验室的 T. C. Chang 博士、T. S. Chao 博士、M. C. Chiang 博士、F. H. Ko 博士、M. C. Liaw 博士和 S. C. Wu 博士,以及中国台湾嘉义大学的 T. L. Li 教授所做的有益建议和讨论。同时,我们还要感谢 N. Erdos 先生对手稿所做的技术修订,Iris Lin 女士对多版修订稿的录入,以及中国台湾新竹大学半导体实验室的 Y. G. Yang 女士为本书配置了几百个技术图解。

感谢 John Wiley & Sons 公司的 W. Zobrist 先生对本书撰写工作的鼓励。施敏还要感谢中国台湾交通大学思源基金的资金支持,以及联华电子股份有限公司 (United Microelectronic Corporation) 提供的 UMC 讲座教授职位为本书创造的撰写环境;同样,G. S. May 也要感谢摩托罗拉基金会提供客座教授一职。

目 录

第1章 概述	1	第3章 硅氧化	36
1.1 半导体材料	1	3.1 热氧化方法	36
1.2 半导体器件	2	3.1.1 生长动力学	37
1.3 半导体工艺技术	5	3.1.2 薄氧化层生长	43
1.3.1 关键半导体技术	5	3.2 氧化过程中杂质再分布	43
1.3.2 技术趋势	8	3.3 二氧化硅掩模特性	45
1.4 基本制造步骤	10	3.4 氧化层质量	46
1.4.1 氧化	10	3.5 氧化层厚度表征	47
1.4.2 光刻和刻蚀	10	3.6 氧化模拟	49
1.4.3 扩散和离子注入	12	3.7 小结	51
1.4.4 金属化	12	参考文献	51
1.5 小结	12	习题	51
参考文献	13		
第2章 晶体生长	15	第4章 光刻	53
2.1 从熔体生长硅单晶	15	4.1 光学光刻	53
2.1.1 初始原料	16	4.1.1 超净间	53
2.1.2 Czochralski 法	16	4.1.2 曝光设备	55
2.1.3 杂质分布	17	4.1.3 掩模	58
2.1.4 有效分凝系数	19	4.1.4 光致抗蚀剂	60
2.2 硅悬浮区熔法	20	4.1.5 图形转移	61
2.3 GaAs 晶体生长技术	24	4.1.6 分辨率增强工艺	63
2.3.1 初始材料	24	4.2 下一代光刻方法	64
2.3.2 晶体生长技术	26	4.2.1 电子束光刻	65
2.4 材料特征	27	4.2.2 极短紫外光刻	68
2.4.1 晶片整形	27	4.2.3 X 射线光刻	69
2.4.2 晶体特征	29	4.2.4 离子束光刻	70
2.5 小结	33	4.2.5 各种光刻方法比较	70
参考文献	34	4.3 光刻模拟	71
习题	34	4.4 小结	73
		参考文献	74
		习题	74

第5章 刻蚀	76	7.2 注入损伤和退火	117
5.1 湿法化学腐蚀	76	7.2.1 注入损伤	117
5.1.1 硅的腐蚀	77	7.2.2 退火	118
5.1.2 氧化硅的腐蚀	78	7.3 与离子注入有关的工艺	120
5.1.3 氮化硅和多晶硅的腐蚀	78	7.3.1 多次注入和掩模	120
5.1.4 铝的腐蚀	78	7.3.2 倾角离子注入	122
5.1.5 砷化镓的腐蚀	79	7.3.3 高能注入和大束流注入	123
5.2 干法刻蚀	80	7.4 离子注入模拟	124
5.2.1 等离子体原理	80	7.5 小结	125
5.2.2 刻蚀机制、等离子体诊断和 刻蚀终点控制	81	参考文献	126
5.2.3 反应等离子刻蚀技术和 设备	83	习题	126
5.2.4 反应离子刻蚀应用	86	第8章 薄膜淀积	128
5.3 刻蚀模拟	89	8.1 外延生长工艺	128
5.4 小结	91	8.1.1 化学气相淀积	128
参考文献	91	8.1.2 分子束外延	132
习题	91	8.2 外延层结构和缺陷	135
第6章 扩散	93	8.2.1 晶格匹配和应变层外延	135
6.1 基本扩散工艺	94	8.2.2 外延层中的缺陷	137
6.1.1 扩散方程	94	8.3 电介质淀积	138
6.1.2 扩散分布	96	8.3.1 二氧化硅	139
6.1.3 扩散层测定	100	8.3.2 氮化硅	143
6.2 非本征扩散	101	8.3.3 低介质常数材料	144
6.2.1 与浓度相关的扩散系数	102	8.3.4 高介质常数材料	145
6.2.2 扩散分布	104	8.4 多晶硅淀积	146
6.3 横向扩散	105	8.5 金属化	148
6.4 扩散模拟	106	8.5.1 物理气相淀积	148
6.5 小结	108	8.5.2 化学气相淀积	149
参考文献	108	8.5.3 铝的金属化	150
习题	109	8.5.4 铜的金属化	153
第7章 离子注入	110	8.5.5 硅化物	155
7.1 注入离子的种类范围	110	8.6 淀积模拟	156
7.1.1 离子分布	111	8.7 小结	158
7.1.2 离子中止	112	参考文献	159
7.1.3 离子沟道效应	115	习题	160
第9章 工艺集成	162		
9.1 无源元件	163		
9.1.1 集成电路电阻器	163		

9.1.2 集成电路电容器.....	165	10.5 成品率	221
9.1.3 集成电路电感器.....	166	10.5.1 功能成品率	221
9.2 双极晶体管技术.....	168	10.5.2 参数成品率	225
9.2.1 基本制造过程.....	168	10.6 计算机集成制造	226
9.2.2 介质隔离.....	171	10.7 小结	228
9.2.3 自对准双层多晶硅双极 晶体管结构.....	172	参考文献	228
9.3 MOS 场效应晶体管技术	173	习题	228
9.3.1 基本制造工艺.....	174	第 11 章 未来趋势和挑战	230
9.3.2 存储器件.....	176	11.1 集成挑战	230
9.3.3 CMOS 技术	179	11.1.1 超浅结的形成	230
9.3.4 BiCMOS 技术.....	185	11.1.2 超薄氧化层	231
9.4 MESFET 技术	187	11.1.3 硅化物的形成	231
9.5 MEMS 技术	189	11.1.4 互连新材料	231
9.5.1 体形微加工.....	190	11.1.5 功耗极限	231
9.5.2 表面微加工.....	190	11.1.6 SOI 集成	232
9.5.3 LIGA 工艺.....	190	11.2 系统芯片	233
9.6 工艺模拟.....	193	11.3 小结	234
9.7 小结.....	197	参考文献	235
参考文献	198	习题	235
习题	199	附录 A 符号表	236
第 10 章 IC 制造	201	附录 B 国际单位制	237
10.1 电学测试	202	附录 C 单位词头	238
10.1.1 测试结构	202	附录 D 希腊字母表	239
10.1.2 终结测试	203	附录 E 物理常数	240
10.2 封装	204	附录 F 300K 时 Si 和 GaAs 的性质	241
10.2.1 芯片分离	204	附录 G 误差函数的一些性质	242
10.2.2 封装类型	205	附录 H 气体基本动力学理论	245
10.2.3 贴附方法学	206	附录 I SUPREM 命令	247
10.3 统计过程控制	210	附录 J 运行 PROLITH	250
10.3.1 品质控制图	210	附录 K t 分布的百分点	251
10.3.2 变量控制图	212	附录 L F 分布的百分点	252
10.4 统计实验设计	214	索引	257
10.4.1 比较分布	214		
10.4.2 方差分析	216		
10.4.3 因子设计	218		

第 1 章 概 述

半导体器件是电子产业的基石。自 1998 年以来,电子产业凭借其超过 1 万亿美元的全球销售额成为世界上最大的产业。图 1-1 显示了过去 20 年以半导体元器件为基础的电子产业的销售量和到 2010 年的销售预期,同时还给出在此期间全球生产总值(GWP)和汽车、钢铁、半导体产业的销售额^{1,2}。值得注意的是在 1998 年电子产业的销售额超过了汽车产业;如果保持这种趋势的话,到 2010 年电子产业的销售额将达到 3 万亿美元,并占到 GWP 的 10%。作为电子产业的一部分,半导体产业将会以更快的速度增长,并在 21 世纪初超过传统的钢铁产业,在 2010 年达到电子产业总份额的 25%。

几万亿美元的电子产业基本依赖半导体集成电路(IC)的生产。电子计算机、电信、航天、汽车和消费电子业都十分依赖这些集成电路元器件,掌握半导体材料、器件和工艺的基础知识对解读现代电子学至关重要。因此,虽然本书主要涉及 IC 制造过程中的基本工艺,仍将对上述三方面的内容进行简要的历史回顾。

1

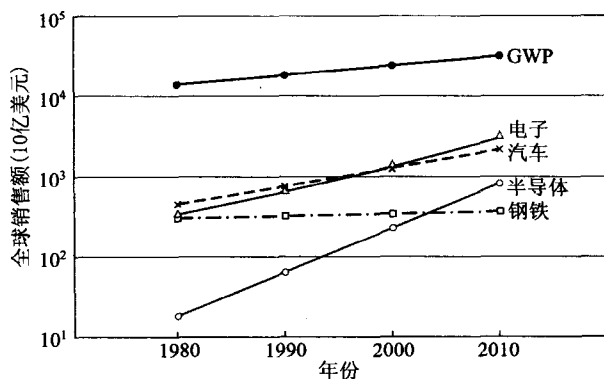


图 1-1 从 1980 年到 2000 年全球生产总值(GWP)和汽车、钢铁、半导体产业的销售额,以及到 2010 年的销售预期^{1,2}

1.1 半导体材料

锗是最早用于半导体器件制造的材料之一,实际上 Bardeen、Brattain 和 Shockley 在 1947 年制出的第一个晶体管就使用了这种材料。不过到了 20 世纪 60 年代初期,硅凭借其特有的优势迅速替代了锗,成为半导体器件制造的主流材料。首先,硅容易被

氧化形成高质量的二氧化硅绝缘层(SiO_2),在 IC 制造所需的选择扩散工艺步骤中, SiO_2 是一种出色的阻挡层;其次,硅的能带隙比锗大,这就意味着相对于锗器件,硅器件的工作温度可以更高;最后,也可能是最重要的一点,硅作为普通沙子的主要成分,在自然界中储量非常丰富,并且非常便宜,因此,硅除了所具备的加工工艺优势外还是一种低成本的原材料。

IC 制造中的另一种常见材料是砷化镓(GaAs)。虽然 GaAs 的电子迁移率高过硅,但却存在一些工艺局限,这当中包括热处理时低稳定性、低本征氧化度、高成本和高缺陷度,因此 IC 业选中了硅,本书也会更多偏重硅材料。 GaAs 多用在高速(超过 1GHz)工作、初等到中等规模集成度的电路中。

1.2 半导体器件

半导体材料独特的性能导致产生出各式各样改变着我们这个世界的集成器件,对这些器件的研究已有超过 125 年的历史³。时至今日,大约有 60 个主要器件,而相关器件有 100 多个变种⁴,表 1-1 按年代顺序列出部分主要半导体器件。

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*	Braun	5
1907	发光二极管*	Round	6
1947	双极晶体管	Bardeen 和 Brattain; Shockley	7, 8
1949	PN 结*	Shockley	8
1952	晶闸管	Ebers	9
1954	太阳能电池*	Chapin, Fuller 和 Pearson	10
1957	异质结双极晶体管	Kroemer	11
1958	隧道二极管*	Esaki	12
1960	MOSFET	Kahng 和 Atalla	13
1962	激光*	Hall 等人	15
1963	异质结构激光*	Kroemer; Alferov 和 Kazarinov	16, 17
1963	转移电子二极管*	Gunn	18
1965	IMPATT 二极管*	Johnston, DeLoach 和 Cohen	19
1966	MESFET	Mead	20
1967	非易失性半导体存储器	Kahng 和 Sze	21
1970	电荷耦合器件	Boyle 和 Smith	23
1974	共振隧道二极管*	Chang, Esaki 和 Tsu	24
1980	MODFET	Mimura 等人	25
1994	室温单电子记忆单元	Yano 等人	22
2001	15nm MOSFET	Yu 等人	14

MOSFET:金属—氧化物—半导体场效应晶体管;MESFET:金属—半导体场效应晶体管;MODFET:调制掺杂型场效应管。

标注“*”的是两端器件,其他的是三端或四端器件。

最早对半导体器件(金属—半导体接触物)进行系统研究应归功于 Braun⁵, 1874 年他发现金属和金属硫化物(如黄铜矿)之间的接触电阻与供给电压的大小和极性有关。1907 年 Round⁶发现了电致发光现象(应用于发光二极管), 他在给碳化硅晶体两端提供一个 10V 的正向电压时, 观察到晶体发出淡淡的黄光。

1947 年, Bardeen 和 Brattain⁷发明了点接触式晶体管, 接着 Shockley⁸于 1949 年发表了关于 PN 结和双极晶体管的经典论文, 图 1-2 所示为第 1 只晶体管的照片。图中三角形石英晶体底边上的两个点接触区是由两条间隔 50μ ($1\mu\text{m} = 10^{-4}\text{cm}$) 的金箔带形成, 再把它们压到一个半导体表面上, 这里用锗作为半导体材料。当一个接触正偏(即相对于第 3 端的

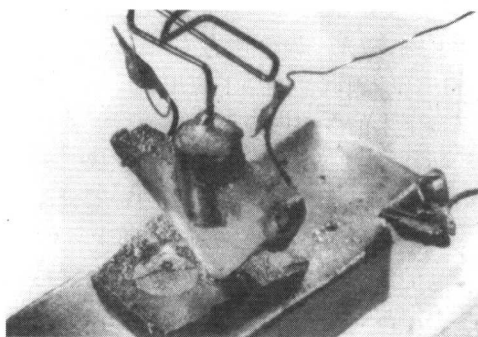


图 1-2 第 1 只晶体管⁷(照片使用由贝尔实验室惠允)

正电压)另一个反偏时, 可以观测到能把输入信号放大的晶体管效应。双极晶体管是非常关键的半导体器件, 它引领了现代电子时代。

1952 年, Ebers⁹研究出晶闸管的基本模型, 晶闸管是一种相当通用的开关器件。1954 年 Chapin¹⁰等人利用 PN 结研发出太阳能电池, 它能把太阳光直接转化成电能, 相当环保, 因此它成为从太阳获得能量的一种主要待选途径。1957 年, Kroemer¹¹主张用异质结双极晶体管来提高晶体管性能, 异质结双极晶体管是有潜力的快速半导体器件之一。1958 年 Esaki¹²在重掺杂 PN 结中观察到负阻特性, 导致了隧道二极管的发现。在欧姆接触和载流子通过薄膜传输过程中, 隧道二极管及其相关联的隧穿现象非常重要。

2

先进集成电路中最重要的器件应该是 MOSFET(金属—氧化物—半导体场效应晶体管), 这种器件由 Kahng 和 Atalla¹³于 1960 年正式提出。图 1-3 所示为使用热氧化硅衬底的第 1 个器件照片, 这个器件的栅长 $20\mu\text{m}$, 栅氧化层厚 100nm ($1\text{nm} = 10^{-7}\text{cm}$), 图中两个锁眼是源和漏接触区, 顶部拉长区域是透过金属网罩蒸镀的铝栅电极。尽管今日 MOSFET 的尺寸已缩小到深亚微米级范围, 但是仍然保留了第 1 只晶体管所使用的硅材料和热生长氧化硅的组合方式, 这种材料的组合非常重要。现在,

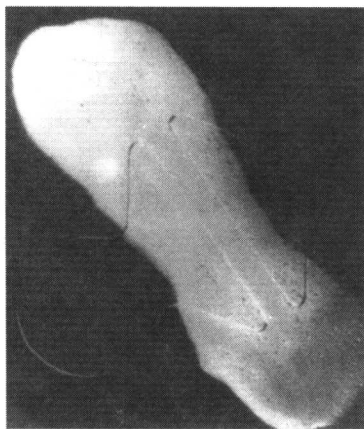


图 1-3 第 1 只金属—氧化物—半导体场效应晶体管¹³(照片使用由贝尔实验室惠允)

MOSFET 及其相关集成电路占到了半导体器件市场份额的 90%。最近公布的沟道长 15nm 的超小型 MOSFET¹⁴, 可以用作最先进集成电路芯片的基本单元, 该芯片将可容纳 1 万亿以上($>10^{12}$)的管子。

1962 年, Hall 等人¹⁵首次用半导体产生了激光。1963 年, Kroemer¹⁶、Alferov 和 Kazarinov¹⁷提出了异质结激光器, 这些构想奠定了可在室温下连续工作的现代激光二极管的基础, 激光二极管作为关键性的元件, 在 DVD、光纤通信、激光打印和大气污染监测等广泛的领域都得到了应用。

在接下来的 3 年内 3 种重要的微波器件问世了。第 1 种器件是 Gunn¹⁸ 于 1963 年发明的转移电子二极管(TED, 也称耿氏二极管), TED 广泛用在毫米波领域, 如探测系统、远程控制和微波测试仪等; 第 2 种器件是 IMPATT 二极管, Johnston¹⁹ 等人于 1965 年首次观察到其工作机理, 在所有的半导体器件中 IMPATT 二极管能以毫米波频率产生最高的连续波(CW)功率, 这样它就被用在雷达和预警系统中; 第 3 种器件是 Mead²⁰ 于 1963 年发明的 MESFET(金属—半导体场效应晶体管), 它是单片微波集成电路(MMIC)的关键元件。

Kahng 和 Sze²¹ 于 1967 年发明了一种重要的半导体存储器——非易失性半导体存储器(NVSM), 在关断电源的情况下它仍能保存信息。这种存储器类似传统的 MOSFET, 最大的差别在于多了个可以暂存电荷的“浮栅”。NVSM 因为拥有非易失特性、高器件密度、低功耗和电可擦写等特性, 成为了便携电子系统如手机、笔记本电脑、数码相机和智能卡的主流存储器。

浮栅非易失性存储器的一种限制性用途是作为单电子记忆单元(SEMC)应用, SEMC 通过缩小浮栅长度至超短尺寸空间(比如 10 nm)来获得, 在这个空间范围内, 每当有一个电子移进浮栅, 栅电压都会发生变化, 从而阻止另一个电子进入。因为我们只需要一个电子来存储信息, 所以 SEMC 就是最终的浮栅存储单元。Yano²² 等人在 1994 年首次展示了室温下 SEMC 的工作过程。SEMC 能够用作最先进的半导体存储器的基本单元, 这种存储器将可容纳 1 万亿位以上。

1970 年 Boyle 和 Smith²³ 发明了电荷耦合器件(CCD), CCD 广泛应用在视频摄像机和光学传感器领域。1974 年 Chang 等人²⁴ 首次研制出共振隧道二极管(RTD), 因为它可以大幅度削减器件来完成既定的电路功能, 所以成为大多数量子器件的基本要素, 量子器件能够提供超大密度、超高速度和超强功能。1980 年, Mimura 等人²⁵ 研发出 MODFET(调制掺杂型场效应管); 异质材料选择合适的话, MODFET 会是最快的场效应晶体管。

自 1947 年双极晶体管发明以来, 伴随着先进技术、新材料层出不穷, 半导体器件的数量和品种有惊人的发展, 并且对其理解的拓展已用于创造新器件。不过, 我们不禁会问: 什么样的工艺制程能使基本半导体材料构造出这些神奇的器件?

1.3 半导体工艺技术

1.3.1 关键半导体技术

很多重要的半导体技术可以追溯到几个世纪以前发明的工艺制程,比如,在熔炉里生成金属晶体的技术可追溯到 2000 多年前生活在维多利亚湖西岸的非洲人²⁵,他们用这种工艺制程在预热强制通风炉内生产碳钢。另一个例子是发明于 1798 年的平板印刷术,在最初的工艺中图案或者图像是用石板转印得到的(石板印刷)²⁷。本节讨论应用于半导体制程或特定半导体器件制造的技术的里程碑。

5

一些重大的半导体技术按照年代顺序列在表 1-2 中。1918 年,Czochralski 开发了一种液—固态单组分生长工艺(liquid-solid monocomponent growth technique),Czochralski²⁸生长法用在大多数晶体制备工序中,硅晶圆(silicon wafer)也是这样生产的。另一种生长工艺是 Bridgman²⁹在 1925 年开发出的,Bridgman 工艺已广泛用在砷化镓及其他化合物半导体晶体的生长制程中。虽然早在 1940 年就开始广泛研究硅的半导体特性,但是半导体化合物的研究工作却长期被忽视。直至 1952 年,Welker³⁰注意到

表 1-2 重大半导体技术

年 份	技 术	作者/发明者	参考文献
1918	Czochralski 法晶体生长	Czochralski	28
1925	Bridgman 法晶体生长	Bridgman	29
1952	III-V 族化合物	Welker	30
1952	扩散	Pfann	32
1957	平版光刻抗蚀剂(光刻胶)	Andrus	33
1957	氧化物掩模	Frosch 和 Derrick	34
1957	外延 CVD 生长	Sheftal,Kokorish 和 Krasilov	35
1958	离子注入	Shockley	36
1959	混合集成电路	Kilby	37
1959	单片集成电路	Noyce	38
1960	平面工艺	Hoerni	39
1963	CMOS	Wanlass 和 Sah	40
1967	DRAM	Dennard	41
1969	多晶硅自对准栅	Kerwin,Klein 和 Sarace	42
1969	MOCVD	Manasevit 和 Simpson	43
1971	干法刻蚀	Irving,Lemons 和 Bobos	44
1971	分子束外延	Cho	45
1971	微处理器(4004)	Hoff 等人	46
1982	沟槽隔离法	Rung,Momose 和 Nagakubo	47
1989	化学机械抛光	Davari 等人	48
1993	铜互连	Paraszczak 等人	49

CVD:化学气相沉积;CMOS:互补金属—氧化物—半导体场效应晶体管;DRAM:动态随机存取存储器;MOCVD:有机金属化学气相沉积。

砷化镓和 III-V 族化合物同样是半导体材料,在实验证明的基础上,他预言了这些材料的性能特征,从此这些化合物相关器件和技术的研究开始活跃起来。

在器件制程中,掺杂原子在半导体材料内的扩散非常重要。1855 年 Fick³¹ 就思考过基本的扩散理论,但在硅材料中采用扩散工艺来改变传导类型的想法,则是 1952 年 Pfann³² 在一份专利中提出来的。1957 年,Andrus³³ 把古老的平版印刷技术用于半导体器件制造,他在图形转移制程中使用了光敏材料、抗刻蚀聚合物(光刻胶)。应该说平版印刷技术是半导体工业的关键技术,半导体工业的持续发展就是平面光刻技术提高的直接结果。平版印刷技术还是一个很有影响力的经济因素,目前它占据 IC 制造成本的 35% 以上。

1957 年 Frosch 和 Derrick³⁴ 开发出氧化物掩模方法,他们发现氧化物能够阻挡大部分杂质原子扩散透过。同年,Sheftal 等人³⁵ 在化学气相沉积技术的基础上开发出外延生长制程,外延的词根是希腊词 *epi* 和 *taxis*, *epi* 的意思是“依附在……表面上”, *taxis* 的意思是“有序排列”,这描述了一种晶体生长工艺,即在有晶格结构的晶体表面形成一层同类型半导体薄膜,该方法对于器件性能的提高和新式器件结构的创建极其重要。1959 年 Kilby³⁷ 制出了集成电路的雏形,它包含 1 个双极晶体管、3 个电阻和 1 个电容器,所有器件都制备在锗材料上并且用金属丝焊接相连——这是一块混合电路。也是在 1959 年 Noyce³⁸ 提出了单片(monolith)IC 的构

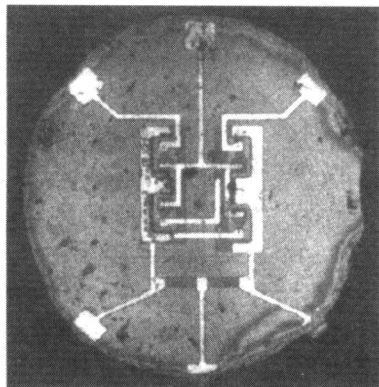


图 1-4 第 1 块单片式集成电路³⁶
(照片使用由 G. Moore 博士惠允)

想,即把所有器件都制作在同一块半导体衬底上,并用铝镀膜来连接器件。图 1-4 所示为第 1 块单片式 IC,它是一块包含 6 个器件的触发器电路,这里使用光刻技术刻蚀蒸镀在整个氧化层表面上的铝膜来获得铝连线。这些发明为微电子产业的迅猛发展奠定了基础。

平面制程工艺是 Hoerni³⁹ 在 1960 年开发的,在这个制程中半导体表面首先形成氧化层,然后借助光刻工艺剥离去部分氧化物,在氧化层中开出窗口,接着掺杂原子只能对暴露出来的半导体表面进行扩散,这样在氧化层的窗口区就形成了 PN 结。

随着 IC 越来越复杂,IC 技术从 NMOS(N 沟道 MOSFET)发展到了 CMOS(互补 MOSFET),CMOS 同时采用 NMOS 和 PMOS(P 沟道 MOSFET)来形成逻辑基元。1963 年 Wanlass 和 Sah⁴⁰ 提出了 CMOS 的概念,CMOS 技术的优势在于只有从一个状态过渡到另一个状态时(比如从 0 变成 1),逻辑基元才有明显电流消耗,而在两个过渡态间消耗的电流极小,这样就使得整个功耗非常低。CMOS 技术成为了先进 IC 的主流技术。

1967 年, Dennard⁴¹ 发明了一种重要的双元电路——动态随机存取存储器

(DRAM),它的存储单元包括1个MOSFET和1个电荷存储电容器,其中把MOSFET用作为对电容器进行充放电的开关。尽管DRAM既不稳定又功耗较高,但是针对非便携式电子系统,我们相信在可预计的未来DRAM仍继续是众多半导体存储器中的首选。

为了提高器件的性能,1969年Kerwin等人⁴²提出了多晶硅自对准栅工艺制程,这个制程不仅提高了器件的稳定性也减小了寄生电容。也是在1969年,Manasevit和Simpson⁴³开发出有机金属化学气相沉积(MOCVD)的方法,对于化合物半导体比如砷化镓而言,这是一种非常重要的外延生长工艺。

随着器件空间尺寸的缩小,为保证高精度图形转移,开发出干法刻蚀工艺替代湿法化学腐蚀工艺,Irving等人⁴⁴于1971年最初使用这种工艺,他们用 CF_4/O_2 的混合气体刻蚀硅片。同年,另一种重要的工艺是由Cho⁴⁵开发出的分子束外延,这种工艺具备的优势是对合成物垂向的控制近乎完美,且能掺杂到原子尺寸级。分子束外延肩负起了构造众多光子器件和量子效应器件的重任。

1971年Hoff⁴⁶等人制造出了第一个微处理器,他们把一个简单计算机的整个中央处理单元(CPU)放在了一块芯片上,那是一个如图1-5所示的4位微处理器(Intel 4004),它的芯片尺寸是 $3\text{mm}\times 4\text{mm}$,包括了2300个MOSFET,使用 $8\mu\text{m}$ 设计规则,采用P沟道多晶硅栅工序制备。这个微处理器性能与20世纪60年代早期价值300 000美元的IBM计算机中的CPU一样,但每台IBM计算机的CPU有一张桌子大。这无疑是半导体产业的重大突破,目前,微处理器构成了半导体产业的最大部分。

从20世纪80年代早期开始,为满足特征尺寸不断缩小的要求开发出了许多新技术,这当中三个重大技术分别是沟槽隔离、化学机械抛光和铜互连技术。1982年对CMOS器件进行隔离的Rung等人⁴⁷引入了沟槽隔离技术,该项技术最终替代了其他隔离方法。1989年Davari等人⁴⁸为了对垫置的绝缘层进行全局整平,开发出了化学机械抛光方法,这是实现多层金属镀法的关键工艺制程。在亚微米尺度范围,众所周知的失效机理是电迁移,所谓电迁移是指电流通道狭窄导致金属离子在电流的作用下发生流动的现象,虽然从20世纪60年代早期就使用铝作互连材料,但在大电流情形下铝会发生电迁移。1993年Paraszcak等

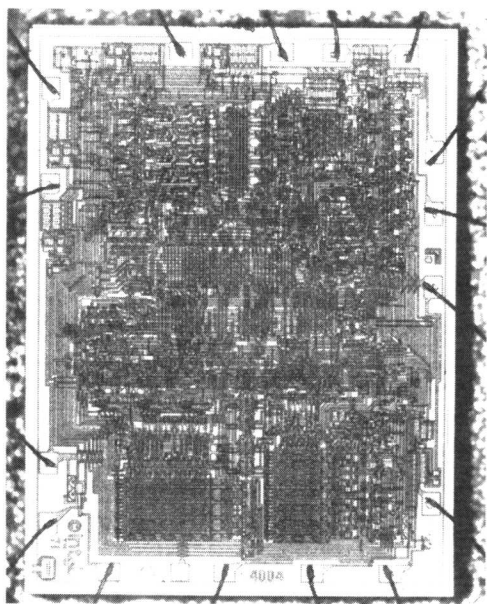


图1-5 第一块微处理器⁴⁶(照片使用由Intel公司惠允)