

国外电子与通信教材系列

微电子制造科学 原理与工程技术 (第二版)

The Science and Engineering of
Microelectronic Fabrication

Second Edition

[美] Stephen A. Campbell 著

曾莹 严利人 王纪民 张伟 等译

朱钧 林发永 审校



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry
www.phei.com.cn

微电子制造科学 原理与工程技术 (第二版)

The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication, Second Edition

《微电子制造科学原理与工程技术》(第二版)对微电子制造领域进行了全面的介绍。本书不仅可以作为高年级本科生或一年级研究生的教材,也是相关专业技术人员理想的参考书。本书在第一版的基础上进行了修订和扩充,内容覆盖了集成电路制造所涉及的所有基本单项工艺,包括光刻、等离子体和反应离子刻蚀、离子注入、扩散、氧化、蒸发、气相外延生长、溅射和化学气相淀积等。本书还介绍了各种先进的工艺技术,如快速热处理、下一代光刻、分子束外延和金属有机物化学气相淀积等。对每一种单项工艺,不仅介绍了它的物理和化学原理,还描述了用于集成电路制造的工艺设备。此外,本书讨论了如何将这些单项工艺集成为各种常见的集成电路工艺技术,如CMOS技术、双多晶双极型技术和GaAs MEFET技术等。本书除了介绍代表当前技术水平的器件外,还对各种技术的工艺复杂程度与器件性能之间的折衷进行了评估。每一章都讨论了各项工艺技术存在的问题及其解决方案。书中还利用流行的工艺模拟软件包——SUPREM,对实际工艺中存在的杂质再分布问题提供了多种有意义的范例,而这正是从事微电子制造行业的工程师们必须面对的一个课题。

新版本专门用一章的篇幅介绍了微电子制造的一个新领域:微机电系统(MEMS)。有关的讨论范围包括机械基础知识、薄膜中的应力、机械量到电量的变换、常见MEMS器件的力学性质、体微机械制造中的刻蚀技术、体微机械工艺流程、表面微机械制造基础、表面微机械工艺流程、MEMS执行器和大高宽比的微系统技术(HARMST)。

作者简介

Stephen A. Campbell: 明尼苏达大学电子与计算机工程系教授兼明尼苏达大学微技术实验室主任。无论是在工业界还是在大学实验室,他在半导体器件制造领域都有着广泛的经验。他的研究领域主要包括快速热化学气相淀积、高性能栅介质、磁MEMS和纳米结构等。

ISBN 7-5053-8313-2



9 787505 383135 >



责任编辑:杨丽娟
特约编辑:叶林
封面设计:毛惠庚

本书贴有激光防伪标志,凡没有防伪标志者,属盗版图书
ISBN 7-5053-8313-2/TN·1729 定价:59.00元

201

TK40E-43

1221

国外电子与通信教材系列

微电子制造科学原理与工程技术

(第二版)

The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication

Second Edition

[美] Stephen A. Campbell 著

曾莹 严利人 王纪民 张伟 等译

朱钧 林发永 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍了微电子制造科学原理与工程技术,覆盖了集成电路制造所涉及的所有基本单项工艺,包括光刻、等离子体和反应离子刻蚀、离子注入、扩散、氧化、蒸发、气相外延生长、溅射和化学气相淀积等。对每一种单项工艺,不仅介绍了它的物理和化学原理,还描述了用于集成电路制造的工艺设备。本书还介绍了各种先进的工艺技术,如快速热处理、下一代光刻、分子束外延和金属有机物化学气相淀积等。在此基础上本书讨论了如何将这些单项工艺集成为各种常见的集成电路工艺技术,如CMOS技术、双极型技术和砷化镓技术,还介绍了微电子制造的新领域,即微机械电子系统及其工艺技术。

本书可作为高等学校微电子专业本科生和研究生相应课程的教科书或参考书,也可供与集成电路制造工艺技术有关的专业技术人员学习参考。

Copyright © 2001 by Oxford University Press, Inc.

This reprint of *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*, 2nd edition originally published in English in 2001, is published by arrangement with Oxford University Press, Inc.

本书英文版由 Oxford University Press, Inc. 授予电子工业出版社出版。未经许可,不得以任何方式复制和抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2002-2105

图书在版编目(CIP)数据

微电子制造科学原理与工程技术: 第二版/ (美)坎贝尔(Campbell, S.A.)著; 曾莹, 严利人, 王纪民等译.
—北京: 电子工业出版社, 2003.1

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*(Second Edition)

ISBN 7-5053-8313-2

I. 微... II. ①坎...②曾...③严...④王... III. 微电子技术—教材 IV. TN405

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第101092号

责任编辑: 杨丽娟 特约编辑: 叶林

印刷: 北京兴华印刷厂

出版发行: 电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

经销: 各地新华书店

开本: 787×1092 1/16 印张: 39.75 字数: 1018千字

版次: 2003年1月第1版 2003年1月第1次印刷

定 价: 59.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010)68279077

前 言

本书意在向广大读者介绍微电子工艺技术，可作为四年级本科生和/或一年级研究生的教科书，也可作为专业工程技术人员的参考书，写书的目的是为读者提供一本易读易懂的书。书中同时覆盖了硅基和砷化镓工艺技术，但重点放在硅基技术上。本书假定读者已学过一年物理，一年数学（包括简单的微分方程）和一门化学课。大多数具有电机工程背景的学生也一定学过至少一门包含 PN 结和 MOS 晶体管内容的半导体物理与器件课程，这些知识对于本书最后五章是非常有用的。对于以前从未接触过这些知识或现已感到有点生疏的学生，本书第 16, 17 和 18 章的第一节将会复习这些内容。鼓励读者可以先学一门基础统计学的课程，但它对本课程并不是必需的。

微电子学教科书有必要把制造工序划分成许多单项工艺，重复这些单项工艺就可以制成集成电路。因此本书具有综述的特点：它包含许多联系并不紧密的题材，每个题材都有各自的基础材料。对于大多数学生来说，回顾所有这些基础材料是有困难的，他们只是在两年或三年前及在许多次期末考试前看过这些材料。在学习新知识之前重新列出这些基础材料十分重要，为此本书每一章中都包含了工程技术所基于的科学原理，这些章节标有“°”符号以便区分永远不变的科学规律和这些规律在现有技术中的应用，并附有所有近似及适用范围的说明。例如，光刻技术具有有限的生命期，而衍射规律却始终成立。

讲授本类课程时会遇到的第二个问题是描述工艺的方程常常不能得到解析解。以扩散为例，费克定律具有解析解，但它们只是在一个非常有限的参数范围内成立。沉淀积扩散是在很高浓度下完成的，在这样高的浓度下，求解时所作的简化假设根本就不成立。在光刻方面，甚至像 Fresnel 方程的最简解也超出了本书的范围。本书以普遍采用的称为 SUPREM III^① 模拟程序来提供微电子制造工程师可能面临的实际生产中掺杂剂再分布这样一类比较有意义的例子，但使用这一软件的目的是扩充而不是去替代学习描述微电子工艺的基本方程。这一软件通常可装载在包括 VAX-, SUN-, Apollo 和基于 DOS 的微型计算机上。本书为丰富基本内容还增加了有关章节介绍多项工艺技术集成和更先进的工艺技术，增加的章节标有“+”符号。如果时间不允许，这些章节可以不讲授而不会丢失本课程的基本内容。

第二版新增了许多题材以保持本书内容较新。最明显的是增加了新的一章来反映微制造工艺的新应用。微机电系统 (MEMS)，这一激励人心的领域有希望开辟许多微制造的新领域。新增的第 19 章是由 Gregory Cibuzar 博士写的，他主持明尼苏达大学的微工艺实验室并已在 MEMS 方面工作了许多年。如果读者对于这一领域有什么问题或评论，可以通过电子邮件 (cibuzar@ece.umn.edu) 直接和他联系。

最后，必须承认，无论这些材料被检查过多少遍，都不能保证（但希望）没有一点小错。以往，当错误足够多或错误很明显的时候，出版社会提供勘误表。但甚至当勘误表出版时，把它送到购书人那里也非常困难，这意味着一般读者在该书新版或修订版出版之前常无法知

^① SUPREM III 为 Leland Stanford 三年制大学理事会的标志

道大部分的修正。本书将提供一个勘误文件，任何人可以在任何时间去查看它。还将提供本书的一个小补充材料，但在本书出版时读者还不能得到。读者可以去牛津大学出版社网站有关本书的部分，即<http://www.oup-usa.org/isbn/0195136055.html>去看该文件。作者也将在这一网址随时增加其他小的更新内容。如果读者感到本书中有哪些需要改正或需要讲清楚的，请通过我的电子邮件（Campbell@ece.umn.edu）告诉我，并请一定附上你的理由和引证已发表的参考资料。

Stephen A. Campbell

目 录

第 1 篇 综述与题材

第 1 章 微电子制造引论	2
1.1 微电子工艺：一个简单的例子	4
1.2 单项工艺与工艺技术	6
1.3 本课程教程	7
1.4 小结	8
第 2 章 半导体衬底	9
2.1 相图和固溶度°	9
2.2 结晶学和晶体结构°	12
2.3 晶体缺陷	14
2.4 直拉法（Czochralski 法）单晶生长	19
2.5 Bridgman 法生长 GaAs	27
2.6 区熔法单晶生长	28
2.7 圆片的制备和规格	30
2.8 小结及未来趋势	32
习题	32
参考文献	33

第 2 篇 单项工艺 I: 热处理和离子注入

第 3 章 扩散	38
3.1 一维费克扩散方程	38
3.2 扩散的原子模型	40
3.3 费克定律的分析解	44
3.4 简单理论的修正	46
3.5 常见杂质的扩散系数	47
3.6 扩散分布的分析	51
3.7 SiO ₂ 中的扩散	58
3.8 扩散系统	59
3.9 扩散分布的 SUPREM 模拟	60
3.10 小结	63
习题	63
参考文献	64

第 4 章 热氧化	66
4.1 迪尔和格罗夫氧化模型	66
4.2 线性和抛物线速率系数	68
4.3 初始阶段的氧化	71
4.4 SiO_2 的结构	73
4.5 SiO_2 的特性	75
4.6 掺杂杂质对氧化和多晶氧化过程的影响	81
4.7 氧化诱生堆垛层错	85
4.8 替代的栅绝缘层 ⁺	86
4.9 氧化系统	88
4.10 SUPREM 氧化 ⁺	90
4.11 小结	92
习题	93
参考文献	94
第 5 章 离子注入	97
5.1 理想化的离子注入系统	97
5.2 库仑散射 ^o	103
5.3 垂直投影射程	104
5.4 沟道效应和横向投影射程	109
5.5 注入损伤	110
5.6 浅结的形成 ⁺	114
5.7 埋层介质 ⁺	116
5.8 离子注入系统的问题和关注点	117
5.9 用 SUPREM 模拟注入的分布 ⁺	120
5.10 小结	121
习题	121
参考文献	122
第 6 章 快速热处理	125
6.1 灰体辐射, 热交换和光吸收 ^o	126
6.2 高强度光源和反应腔设计	127
6.3 温度测量	131
6.4 热塑应力 ^o	134
6.5 杂质的快速热激活	136
6.6 介质的快速热加工	138
6.7 硅化物和接触的形成	140
6.8 其他的快速热处理系统	141
6.9 小结	142
习题	142
参考文献	143

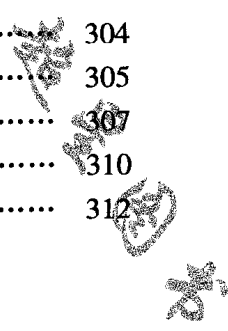
第3篇 单元工艺2: 图形转移

第7章 光学光刻	150
7.1 光学光刻概述	150
7.2 衍射°	154
7.3 调制传输函数和光学曝光	157
7.4 光源系统和空间相干	158
7.5 接触式/接近式光刻机	163
7.6 投影光刻机	166
7.7 先进掩模概念+	172
7.8 表面反射和驻波	174
7.9 对准	177
7.10 小结	178
习题	178
参考文献	179
第8章 光刻胶	181
8.1 光刻胶类型	181
8.2 有机材料和聚合物°	181
8.3 DQN 正胶的典型反应	184
8.4 对比度曲线	186
8.5 临界调制传输函数	189
8.6 光刻胶的涂敷和显影	189
8.7 二级曝光效应	194
8.8 先进的光刻胶和光刻胶工艺+	196
8.9 小结	200
习题	200
参考文献	201
第9章 非光学光刻技术+	204
9.1 高能束与物体之间的相互作用°	204
9.2 直写电子束光刻系统	207
9.3 直写电子束光刻概要和展望	215
9.4 X 射线源°	216
9.5 接近式 X 射线系统	219
9.6 薄膜型掩模版	222
9.7 投影式 X 射线光刻	225
9.8 投影电子束光刻 (SCALPEL)	226
9.9 电子束和 X 射线光刻胶	228
9.10 MOS 器件中的辐射损伤	230
9.11 小结	231

习题	232
参考文献	232
第 10 章 真空科学和等离子体	237
10.1 气体动力学理论°	237
10.2 气体流动及导率	239
10.3 压力范围和真空泵	241
10.4 真空密封和压力测量	248
10.5 直流辉光放电°	250
10.6 射频放电	252
10.7 高密度等离子体	253
10.8 小结	256
习题	256
参考文献	258
第 11 章 刻蚀	259
11.1 湿法刻蚀	260
11.2 化学机械抛光	265
11.3 等离子刻蚀基本分类	267
11.4 高压等离子刻蚀	267
11.5 离子铣	275
11.6 反应离子刻蚀	278
11.7 反应离子刻蚀中的损伤+	281
11.8 高密度等离子体 (HDP) 刻蚀	282
11.9 剥离技术	284
11.10 小结	285
习题	286
参考文献	286

第 4 篇 单项工艺 3: 薄膜

第 12 章 物理淀积: 蒸发和溅射	294
12.1 相图: 升华和蒸发°	295
12.2 淀积速率	296
12.3 台阶覆盖	300
12.4 蒸发系统: 坩锅加热技术	301
12.5 多组分薄膜	303
12.6 溅射简介	304
12.7 溅射物理°	305
12.8 淀积速率: 溅射产额	307
12.9 高密度等离子溅射	310
12.10 形貌和台阶覆盖	312



12.11	溅射方法	315
12.12	特殊材料溅射	317
12.13	淀积膜内的应力	320
12.14	小结	320
	习题	321
	参考文献	322
第 13 章	化学气相淀积	326
13.1	一种简单的硅淀积 CVD 系统	326
13.2	化学平衡和质量作用定律°	327
13.3	气体流动和边界层°	331
13.4	简单 CVD 系统评价	335
13.5	常压介质 CVD	337
13.6	热壁系统中的介质和半导体低压 CV D	338
13.7	介质的等离子体增强化学气相淀积 (PECVD)	344
13.8	金属 CVD ⁺	348
13.9	小结	352
	习题	352
	参考文献	353
第 14 章	外延生长	357
14.1	圆片清洗和自然氧化物去除	358
14.2	气相外延生长的热动力学	361
14.3	表面反应	365
14.4	掺杂剂的引入	366
14.5	外延生长缺陷	367
14.6	选择性生长 ⁺	369
14.7	卤化物输运 GaAs 气相外延	370
14.8	不共度和应变异质外延	371
14.9	金属有机物化学气相淀积 (MOCVD)	375
14.10	先进的硅气相外延生长技术	380
14.11	分子束外延技术	383
14.12	BCF 理论 ⁺	388
14.13	气态源 MBE 和化学束外延 ⁺	392
14.14	小结	393
	习题	393
	参考文献	394

第 5 篇 工艺集成

第 15 章	器件隔离、接触和金属化	401
15.1	PN 结隔离和氧化物隔离	401

15.2	LOCOS (硅的局部氧化) 技术	405
15.3	沟槽隔离	409
15.4	绝缘体上硅隔离技术	413
15.5	半绝缘衬底	414
15.6	肖特基接触	417
15.7	注入形成的欧姆接触	421
15.8	合金接触	426
15.9	多层金属化	427
15.10	平坦化和先进的互连工艺	432
15.11	小结	436
	习题	438
	参考文献	439
第 16 章	CMOS 技术	444
16.1	基本长沟道器件特性	444
16.2	早期 MOS 工艺技术	447
16.3	基本的 3 μm 工艺技术	448
16.4	器件等比例缩小	453
16.5	热载流子效应和漏极工程	461
16.6	用于坚固氧化物的工艺	465
16.7	闩锁效应	466
16.8	浅源/漏和特定沟道掺杂	469
16.9	小结	471
	习题	471
	参考文献	474
第 17 章	GaAs 工艺技术	478
17.1	基本的 MESFET 工作原理	478
17.2	基本的 MESFET 工艺技术	479
17.3	数字电路工艺技术	481
17.4	单片微波集成电路技术	487
17.5	调制掺杂场效应晶体管 (MODFETs)	491
17.6	光电子器件	492
17.7	小结	495
	习题	495
	参考文献	496
第 18 章	硅双极型工艺技术	498
18.1	双极型器件回顾: 理想与准理想特性	498
18.2	二阶效应	499
18.3	双极型晶体管的性能	501
18.4	早期的双极型工艺技术	505

18.5	先进的双极型工艺技术	508
18.6	双极型晶体管中的热载流子效应	517
18.7	双极-CMOS 兼容工艺技术 (BiCMOS)	518
18.8	模拟双极型工艺技术	522
18.9	小结	524
	习题	524
	参考文献	526
第 19 章	微机电系统	530
19.1	力学基础知识	531
19.2	薄膜中的应力	533
19.3	机械量到电量的变换	534
19.4	常见 MEMS 器件力学性质	539
19.5	体微机械制造中的刻蚀技术	542
19.6	体微机械工艺流程	550
19.7	表面微机械制造基础	555
19.8	表面微机械加工工艺流程	559
19.9	MEMS 执行器	562
19.10	大高宽比的微系统技术	566
19.11	小结	568
	习题	569
	参考文献	570
第 20 章	集成电路制造	574
20.1	成品率的预测和追踪	575
20.2	颗粒控制	580
20.3	统计过程控制	582
20.4	全因素试验和 ANOVA	584
20.5	试验设计	587
20.6	计算机集成制造	590
20.7	小结	592
	习题	593
	参考文献	593
附录 A	缩写与通用符号	595
附录 B	部分半导体材料性质	602
附录 C	物理常数	603
附录 D	单位转换因子	605
附录 E	误差函数的一些性质	608
附录 F	F 数	612
附录 G	SUPREM 指令	614

第 1 篇 综述与题材

本课程与读者可能上过的许多课程有所不同，它所包含的题材主要是许多彼此间非常不同的单项工艺。因此本书的特点是综述所包含的题材而不是平铺直叙，本书第 1 篇将为后面理解各种制造工艺建立必要的基础。

第 1 章将介绍本课程的教程及集成电路制造引论，定性简述本书所包含的工艺并讨论不同题材之间的关系。以一种半导体工艺技术即集成电阻制造为简单例子来说明我们称为工艺的这些过程的流程，并将讨论扩展到包括电容和 MOSFET 在内的工艺技术。

第 2 章将介绍晶体生长和圆片生产。这一章包含了基本材料方面的知识，这些知识将运用在全书的其余部分，包括晶体结构和晶体缺陷，相图，以及固溶度的概念。与以后几章中将要介绍的其他单项工艺不同，几乎没有什么集成电路制造厂实际生长它们自己需要的圆片。然而，圆片生产的题材将说明半导体材料的某些重要特性，这些特性无论在制造过程中还是对集成电路的最终成品率和性能都非常重要。本章还将讨论硅片和砷化镓片生产中的差别。

第 1 章 微电子制造引论

电子工业在过去 40 年间迅速增长，这一增长一直为微电子学革命所驱动。20 世纪 60 年代初，在一片半导体上制作一个以上的晶体管被看成是划时代的，包含有几十个器件的集成电路则闻所未闻。当时的数字计算机体积大，速度慢，价格昂贵。在此 10 年前发明晶体管的贝尔实验室并不接受集成电路的概念，其理由是：为使一个电路能正确工作，所有器件都必须正确工作。因此，为使一个含 20 个晶体管的电路有 50% 正确工作的概率，器件正确工作的概率必须达到 $(0.5)^{1/20} = 0.966$ ，即 96.6%。这在当时被认为乐观得可笑，虽然当今的集成电路已包含有几十亿个晶体管。

早期的晶体管用锗制造，但现在大多数电路都做在硅衬底上，因此本书将重点放在硅上。第二个最普遍用于制造集成电路的材料是砷化镓 (GaAs)，为此本书在适当场合将讨论制造砷化镓集成电路所需要的工艺。虽然砷化镓的电子迁移率比硅高，但它有几个严重的局限，包括空穴迁移率低，在热处理过程中较不稳定，热氧化层较差，成本高等，也许最严重的是它的缺陷密度高得多。因此，硅被选为制造高集成度电路的材料，而砷化镓则专门用于非常高速但具有低和中等集成度的电路，目前它最常用于工作速度超过吉赫兹 (10^9 Hz) 的模拟电路。近期微电子制造技术已被用来制造各种各样的结构，包括微磁性元件，光器件以及微机械结构，在某些情形中这些结构也被集成到含有电子电路的芯片中。微电子机械系统 (MEMS) 结构是一个很普遍的非电子应用，将在本书后面介绍。

为了描述硅微电子学的进展，比较容易的做法是去跟踪同一种类型的芯片。存储器芯片多年来一直具有基本相同的功能，这使这类分析具有意义。而且，它们极其规则并被大量销售，使针对这一芯片设计的专门工艺十分经济。因此，存储器芯片在所有的集成电路中密度最高。图 1.1 为动态随机存取存储器 (DRAM) 集成度的发展情形，垂直轴为对数坐标。图中存储器电路的密度按四倍递增，每次递增大约需要三年时间。使这一工艺进展成为可能的制造过程的最主要变化是芯片上能印制的最小特征尺寸。它不仅增加了集成电路的密度，而且也使电子和空穴必须通过的距离缩短从而提高了晶体管的速度。集成电路性能的改善一部分来自于晶体管性能的这一提高，一部分则来自于能把晶体管布置得更加密集，从而减小了寄生电容。图 1.1 右边表明集成电路最小特征尺寸已从 $10\mu\text{m}$ ($1\mu\text{m}=10^{-4}\text{cm}$) 减小到远低于 $1\mu\text{m}$ 。图 1.2 为同时显示一个硅基集成电路和一根人发的电子微缩照片作为参照。照片中垂直线和水平线是互连晶体管的金属线，晶体管本身在金属线下面，在这一微缩照片中看不出来。如以这样的速度发展下去，读者在看到这本书的时候将可以见到 $0.25\mu\text{m}$ 的特征尺寸 (译者注：在本书译本出版时，我们已经可以看到 $0.13\mu\text{m}$ 的集成电路规模生产)。

初看起来，这些不可思议的高密度和与之相联系的设计复杂性似乎令人生畏。但本书将集中描述这些电路如何被制造而不是它们如何被设计或这些管子是如何工作的。无论在芯片上有多少个晶体管，制造过程是类似的。本书的前半部分将介绍制造集成电路所要求的基本操作，这些基本操作类似于机械制造中的锻造、切割、弯曲、钻孔和焊接等步骤，它们在本

书中将被称为“单项工艺”。如果人们对于某种材料（例如钢）知道如何去完成这些步骤中的每一步，那么只要有所需要的机器和材料，它们就可以被用来制造梯子、高压汽缸或小船。显然，这些步骤需要进行多少次以及前后次序如何将取决于制造什么，但基本的单项工艺仍是一样的。而且，一旦生产一条好船的工序获得成功，其他类似设计的船多半也可以采用相同的工序来建造。船的设计，亦即把什么东西装到什么地方去，则是一个单独的任务。船的建造者接受一套蓝图，他们必须按这一蓝图建造。

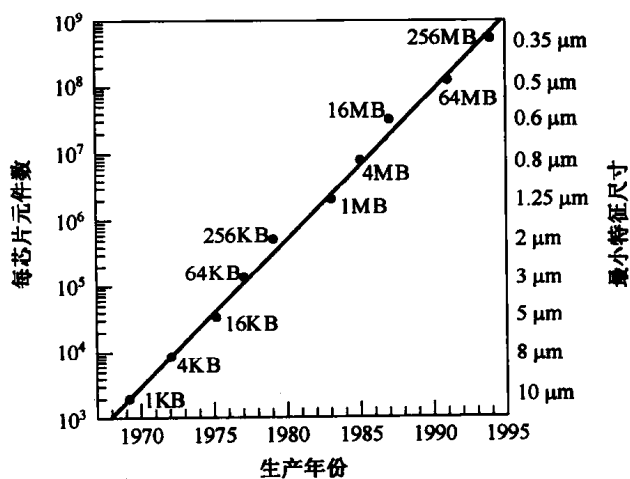


图 1.1 DRAM 存储容量与最小特征尺寸的进展

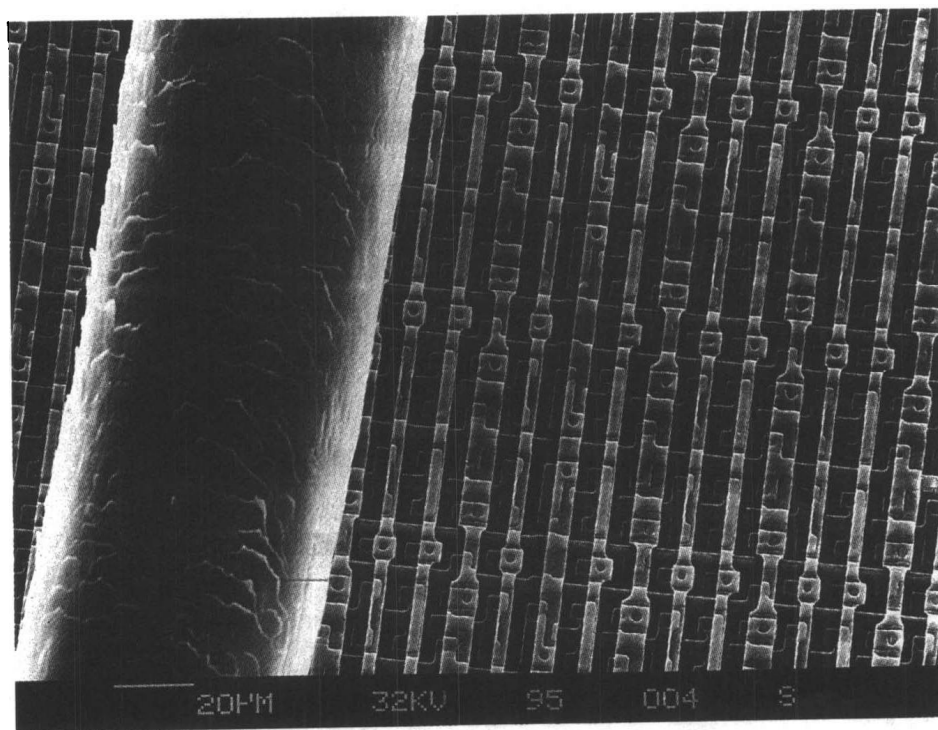


图 1.2 20 世纪 80 年代中期的一个集成电路的扫描电镜 (SEM) 的微缩照片。照片中可见的线条为连接晶体管的金属线

制造一个有用产品的这些单项工艺的集合和次序称为工艺技术。本书第 5 篇将介绍某些基本的制造工艺技术。究竟这一工艺技术是用来制造微处理器，输入输出控制器，还是实现其他数字功能对于制造过程基本上不重要，甚至许多模拟电路也可以用与制造大多数数字电路非常类似的工艺技术来制造。因此，一个集成电路起始于对某种电子器件的需求，一个设计者或者一组设计者把这些需求转化为电路设计；也就是需要用多少个晶体管、电阻和电容，它们应当具有什么数值以及它们是如何互连的。设计者也必须从制造者那里得到某些信息。例如在造船中，蓝图应当反映出造船者不能把铆钉铆在焊接缝处，或运用小的铆钉而仍然期望它们能耐受住非常高的压力。因此，建造者必须提供给设计者一个文档告诉什么能做，什么不能做。在微电子学中这个文档称之为设计规则或版图规则，它们规定某些特征尺寸允许多小或多大或者两个不同的特征尺寸间允许靠得多近。如果设计与这些规则一致，那么芯片就可以用这一给定的工艺技术来制造。

1.1 微电子工艺：一个简单的例子

电路设计者提供给集成电路制造者的不是蓝图而是一组光掩模。光掩模是根据版图规则制造的这一设计的实体代表。作为设计与制造之间接口的一个例子，假设需要一个集成电路包含一个简单的分压器，如图 1.3 所示。实现这一设计的工艺技术显示在图 1.4 中。将采用硅片作为衬底，因为它们很平整，相当便宜，并且大多数集成电路工艺设备都是为处理硅片而制造的。衬底的制备将在第 2 章中讨论。由于硅片多少有点导电，因此必须首先淀积一层绝缘层以防止在相邻电阻间漏电。另一种绝缘方法是热生长出一层二氧化硅，因为它是一种绝好的绝缘层。硅的热氧化将在第 4 章中介绍。接着淀积一层导电层用来作为电阻。在第 12~14 章中将讨论淀积绝缘层和导电层的几种工艺技术。

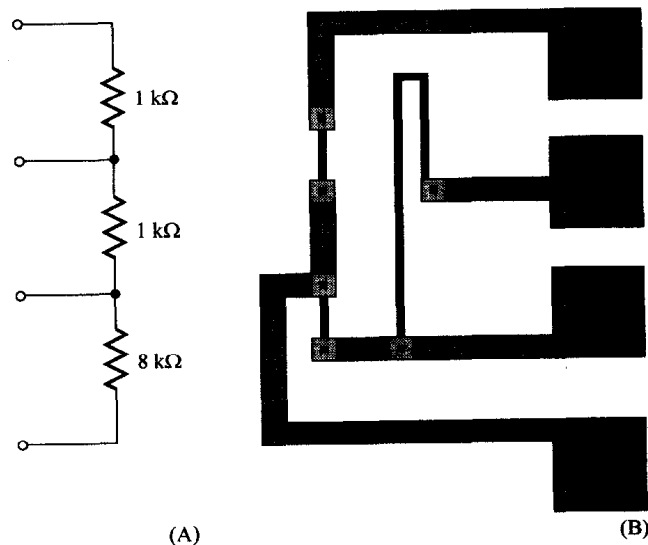


图 1.3 一个简单的电阻分压器。左图为电路图，右图为物理版图。右图所示的各层为电阻、接触及低阻金属