

半导体科学与技术丛书

# 集成电路制造工艺 技术体系

严利人 周 卫 著  
刘道广 审



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

半导体科学与技术丛书

# 集成电路制造工艺技术体系

严利人 周 卫 著

刘道广 审

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书从三个方面系统地论述集成电路的制造技术。首先是制造对象,对工艺结构及结构所对应的电子器件特性进行深入的分析与揭示。其次是生产制造本身,详细讨论集成电路各单步作用的本质性特征及各不同工艺技术在成套流程中的作用,讨论高端制造的组织、调度和管理,工艺流程的监控,工艺效果分析与诊断等内容。最后是支撑半导体制造的设备设施,该部分的论述比较简明,但是也从整体和系统的角度突出了制造设备的若干要素。

本书适合于生产线上的高级工艺技师或管理专家,有助于其从系统和宏观的角度把握动态和复杂的制造过程。尽管涉及微电子制造的高端技术环节,但是本书的具体叙述并不艰深,多结合实例来进行,实用性较强。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

集成电路制造工艺技术体系/严利人,周卫著. —北京:科学出版社,2016.10  
(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-050157-8

I. ①集… II. ①严… ②周… III. ①集成电路工艺 IV. ①TN405

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第243562号

---

责任编辑:周 涵/责任校对:张凤琴

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>

**北京京华虎彩印刷有限公司**印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年1月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017年1月第一次印刷 印张:16

字数:304 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《半导体科学与技术丛书》编委会

名誉顾问: 王守武 汤定元 王守觉

顾 问: (按姓氏拼音排序)

陈良惠 陈星弼 雷啸霖 李志坚 梁骏吾 沈学础  
王 圩 王启明 王阳元 王占国 吴德馨 郑厚植  
郑有焯

主 编: 夏建白

副 主 编: 陈弘达 褚君浩 罗 毅 张 兴

编 委: (按姓氏拼音排序)

陈弘毅 陈诺夫 陈治明 杜国同 方祖捷 封松林  
黄庆安 黄永箴 江风益 李国华 李晋闽 李树深  
刘忠立 鲁华祥 马骁宇 钱 鹤 任晓敏 邵志标  
申德振 沈光地 石 寅 王国宏 王建农 吴晓光  
杨 辉 杨富华 余金中 俞育德 曾一平 张 荣  
张国义 赵元富 祝宁华

## 《半导体科学与技术丛书》出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用，它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新，并在许多技术领域引起了革命性变革和进步，从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动 21 世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后，在国际上对中国禁运封锁的条件下，我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下，自力更生，艰苦奋斗，从无到有，在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果，为我国半导体科学技术事业的发展，为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前，在改革开放的大好形势下，我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统，正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我们国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套《半导体科学与技术丛书》的目的是总结我们自己的工作成果，发展我国的半导体事业，使我国成为世界上半导体科学技术的强国。

出版《半导体科学与技术丛书》是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域，包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作，总结自己的研究经验，吸引更多的年轻人投入和献身到半导体研究的事业中来，为他们提供一套有用的参考书或教材，使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究，为发展我国的半导体事业做出自己的贡献。

《半导体科学与技术丛书》将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展，力求覆盖较广阔的前沿领域，展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题，而不求面面俱到。在写作风格上，希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点，深入浅出，图文并茂，文献丰富，突出物理内容，避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能为国内半导体领域的学者提供一个机会，将他们的累累硕果奉献给广大读者，又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

夏建白

2005 年 3 月 16 日

# 序 言

半导体科学与技术是信息产业的基础和支柱。微电子技术诞生五十多年来，丰富多样的半导体器件与集成电路推动了半导体产业的迅速发展，也推进了全世界信息化与工业化深度融合。与此同时，集成电路自身也面临着进一步发展新技术和提升生产效率的双重难题。

多年以来，能够从制造的宏观体系和微观技术的角度系统论述集成电路制造的学术著作不多，这是由于集成电路产业属于极端复杂的先进制造，一般容易讲清楚制造技术具体细节，但难以形成对于整个制造过程的完整把控。

通过阅读本书，我感到这本书是作者长期从事集成电路技术研发工作的体会和总结。尤其在当前集成电路产业逐渐接近于技术极限的发展转折之际，对集成电路制造所涉及的技术细节进行梳理，形成较为合理的框架体系并说明集成电路制造究竟是怎样的，具有哪些鲜明的技术特点，这是一项值得鼓励的工作。

该书保持了一种风格，在各章节的起始段都有一个概论，之后再引导读者进入具体而复杂的技术细节，各项细节特征并不散乱。这一风格对于讲清楚集成电路这类复杂制造的技术过程和原理是适当的。

该书还有一个特点，就是对集成电路制造工艺技术体系进行了较为深入的挖掘，对技术内容的处理带有明显的机器化风格。随着一系列概念的提出，如微结构描述语言及算法处理，集成电路制造流程的自动生成，I类和II类工艺问题诊断等，使集成电路制造系统的人工智能化有了一定的可行基础。

当前，我国集成电路产业迎来了高速发展时期，该产业对于高端工艺技术人员有很大的需求。相信该书的出版，无论是对于高等学校的学生，还是对于半导体器件和集成电路生产线的技术工人和工程师，都会有助于知识的提升和专业本领的提高，特别地，有助于优秀人才的脱颖而出。

中国科学院院士  
西安电子科技大学教授

2016年3月28日

## 前 言

集成电路制造涉及众多工业技术领域，其制造特征充分体现了高端制造的技术难度与复杂性。我国在该领域的制造实力与国际相比是比较薄弱的，在很多环节上，从原材料、制造装备、工艺技术到 IC 产品，都还要依赖于国外。

本书内容是作者在该领域长期从事相关技术工作的总结，写作初衷是希望在既有 IC 制造领域成果和现状的基础上，能够更进一步梳理、归纳相关的经验和规律，使之成为体系。

本书的内容叙述以电子器件为切入点，各种半导体器件和 IC 产品是 IC 制造的出发点和归宿。一个制造流程，如果是有意义和实际可行的，就必然要以某个或者某一组器件作为产出的结果；器件结构上的不同，将导致不同的加工工艺，有时还会引入特殊的工艺处理。简言之，器件的结构形式是生产线上各类生产活动如何依序进行的决定性的因素。制造活动的多种多样，包括很多不公开的技术秘诀，本质上是由于现实中对于器件及其性能的多样化的要求而产生的，这种多样化直接决定了制造过程的复杂性、高技术含量的特性等。

通常对于半导体器件，有两种考察的角度。一个是电子器件工程师的角度，从器件内在的结构、电性能的角度来处理器件，最终将器件优化成特定的结构形式、尺寸等，然后以此为蓝图，对器件制造的具体实施者提出要求，由后者制造实现；另一种角度是从制造者角度来看待器件，制造者原则上不一定必须关心器件的工作机理。从制造角度来看，器件或者集成电路，无论结构上多么复杂（因而对对应到制造工艺流程的复杂）都可以看成一些结构单元的有机结合体，例如，对于 MOS 管，从纵向看，为“M(金属)-O(氧化物)-S(半导体)”的结构叠层；从横向看，则是由“源区-沟道区-漏区”这样的不同有源区组成。当器件制造专注于器件的分解结构和各结构单元的具体工艺技术时，往往能够取得“专与精”的效果。在 IC 制造这种特殊的高端制造领域，如果缺乏专精的精神，则很难生产制造出高端的电路产品。

本书重点是面向集成电路制造人员，因此对于器件（作为加工制造的目标）的描述在文字上是简明的，但是仍突出了一些本质性的特征。书中这一部分内容，很多是其他相同题材书籍所不具备的，例如，从能量角度（能级-能带角度）对器件进行的分类，三极管收集极作用的说明（在于分辨电子流与空穴流，两种成分电流的比值由制造过程中的掺杂水平决定，是三极管电流放大特性本领的真正来源）等。

历来人们处理事物的方式都是实事求是的，具体问题具体分析；而对于过于

复杂化的事物，一般会进行分解，分而治之。这样的思想也体现在集成电路的制造中。当器件分解至各结构单元后，接下来的问题就是各结构单元如何制备，有哪些工业技术和装备可以支撑这些制造步骤具体执行，本书关于这些内容的描述构成了单步工艺技术（工艺库）、工艺设备两章的内容，叙述体例和技术内容远多于同题材其他书籍。

半导体器件可理解为由结构单元构建而成。对应各结构单元制作的是各适当的工艺单步，而对应着由结构单元构建起整体器件过程的，就是工艺流程了。工艺流程是一种工艺单步的排序和有机组合，如何获取这种序列，为本书对于工艺流程原理的阐述内容。

给定一款器件或者 IC 的结构，如果读者已经掌握了上述工艺流程的原理，学会了导引出其所适用的加工制造流程，进一步所面临的问题将是：如何去组织、实施这些连串的工艺步骤，生产安排和作业调度如何进行，产品质量和成品率如何监控，以及当工艺遭遇挫折时，如何进行工艺状态的诊断等。这样的一系列与具体的生产制造直接相关的技术管理问题，在本书最后一章进行了讨论。

IC 制造领域涉及纷繁复杂的各项因素，各项技术细节，很多都是作者所不熟悉或不完全掌握的。在本书撰写过程中，与工作在一线的科研人员进行了许多有益的讨论，得到了韩冰、窦维治、曹秉军、钟燕等工艺工程师的很多帮助；在本书写作和出版阶段，中国科学院院士郝跃教授，清华大学刘道广博士，科学出版社周涵、鲁永芳两位编辑，对于本书内容漏误之处都给出了详尽改进意见，对此表示诚挚的感谢。另外，第 5 章测试设备部分，承蒙浙江绍兴宏邦电子科技有限公司提供大量写作素材，并允许使用其测试设备照片，在此也一并致谢。

作 者

2016 年 8 月



# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 IC 制造的技术特点与发展趋势        | 1  |
| 1.1 IC 产业的发展历史与趋势            | 1  |
| 1.2 IC 制造技术的特点               | 4  |
| 1.2.1 以复杂的物理-化学过程为主, 技术门槛高   | 4  |
| 1.2.2 生产效率高                  | 6  |
| 1.2.3 能够实现异常复杂的电路功能          | 7  |
| 1.2.4 应用极为广泛                 | 7  |
| 1.2.5 微电子加工技术可延伸应用于相近的其他产业制造 | 8  |
| 1.3 本书的线索和章节内容安排             | 8  |
| 第 2 章 半导体器件与工艺结构             | 10 |
| 2.1 总论                       | 10 |
| 2.1.1 器件: 基于能级               | 12 |
| 2.1.2 器件: 基于能带               | 16 |
| 2.2 集成电路中的常规器件               | 19 |
| 2.2.1 PN 结                   | 19 |
| 2.2.2 双极晶体管                  | 26 |
| 2.2.3 MOS 晶体管                | 31 |
| 2.3 工艺结构                     | 37 |
| 2.3.1 双极工艺                   | 37 |
| 2.3.2 NMOS                   | 38 |
| 2.3.3 CMOS                   | 39 |
| 2.3.4 BiCMOS                 | 39 |
| 2.4 其他器件及工艺结构                | 40 |
| 2.4.1 微机电系统器件                | 41 |
| 2.4.2 太阳能电池                  | 43 |
| 2.5 新材料与新器件                  | 44 |
| 2.5.1 FinFET                 | 44 |
| 2.5.2 无结器件                   | 49 |
| 2.5.3 纳米器件                   | 52 |
| 2.5.4 SiGe 材料及 SiGe HBT      | 55 |

|              |                    |           |
|--------------|--------------------|-----------|
| 2.5.5        | SiC 与 GaN          | 58        |
| 2.6          | 微电子器件的表示           | 68        |
| 2.6.1        | 结构单元               | 70        |
| 2.6.2        | 单元链、截面和微结构体        | 76        |
| 2.6.3        | 器件结构分析             | 80        |
| 2.7          | 总结                 | 91        |
| <b>第 3 章</b> | <b>IC 制造单项工艺技术</b> | <b>92</b> |
| 3.1          | 半导体材料的加工处理         | 93        |
| 3.1.1        | 外延                 | 93        |
| 3.1.2        | 掺杂扩散               | 94        |
| 3.1.3        | 离子注入               | 96        |
| 3.2          | 介质/绝缘材料的加工处理       | 99        |
| 3.2.1        | 氧化                 | 99        |
| 3.2.2        | LPCVD              | 101       |
| 3.2.3        | PECVD              | 102       |
| 3.3          | 互连工艺               | 103       |
| 3.3.1        | Al 金属化             | 104       |
| 3.3.2        | Cu 金属化             | 106       |
| 3.3.3        | 多晶硅                | 107       |
| 3.3.4        | 接触                 | 108       |
| 3.4          | 位置与几何形状定义          | 109       |
| 3.4.1        | 光刻                 | 109       |
| 3.4.2        | 刻蚀                 | 118       |
| 3.4.3        | 剥离                 | 122       |
| 3.5          | 辅助性工艺技术            | 123       |
| 3.5.1        | 化学清洗               | 123       |
| 3.5.2        | 热处理                | 124       |
| 3.5.3        | 平坦化与 CMP           | 124       |
| 3.5.4        | 工艺质量监控             | 127       |
| 3.6          | 新工艺技术举例            | 127       |
| 3.6.1        | ALD 原子层淀积技术        | 127       |
| 3.6.2        | 激光加工技术             | 128       |
| 3.7          | 工艺库                | 130       |
| 3.8          | 总结                 | 132       |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| <b>第 4 章 IC 制造工艺原理</b> .....   | 134 |
| 4.1 工艺模块与流程 .....              | 134 |
| 4.1.1 LOCOS 工艺模块 .....         | 135 |
| 4.1.2 用于铜互连的大马士革工艺 .....       | 135 |
| 4.1.3 CV 测试短流程 .....           | 136 |
| 4.1.4 CMOS 工艺 .....            | 136 |
| 4.1.5 BiCMOS 工艺 .....          | 137 |
| 4.2 工艺结构加工制造排序 .....           | 137 |
| 4.2.1 单元加工的排序及规则 .....         | 138 |
| 4.2.2 CMOS 结构工艺顺序 .....        | 142 |
| 4.2.3 工艺流程的全展开 .....           | 145 |
| 4.2.4 工艺流程优化 .....             | 149 |
| 4.3 工艺过程仿真 .....               | 152 |
| 4.3.1 仿真软件简介 .....             | 153 |
| 4.3.2 流程仿真实例 .....             | 153 |
| 4.4 正交实验设计 .....               | 154 |
| 4.5 总结 .....                   | 155 |
| <b>第 5 章 IC 制造工艺设备</b> .....   | 156 |
| 5.1 IC 制造设备总论 .....            | 156 |
| 5.2 IC 制造设备 .....              | 158 |
| 5.2.1 热处理 .....                | 159 |
| 5.2.2 LPCVD .....              | 164 |
| 5.2.3 离子注入机 .....              | 171 |
| 5.2.4 等离子体加工设备 .....           | 179 |
| 5.2.5 光刻及辅助工艺装备 .....          | 185 |
| 5.2.6 电学测试 .....               | 195 |
| 5.3 总结 .....                   | 198 |
| <b>第 6 章 IC 制造的实施与优化</b> ..... | 199 |
| 6.1 IC 制造的生产规划和作业调度 .....      | 199 |
| 6.1.1 IC 设备的产能匹配 .....         | 203 |
| 6.1.2 IC 制造单流程作业调度 .....       | 205 |
| 6.1.3 IC 制造多流程作业调度 .....       | 208 |
| 6.1.4 生产过程的状态跟踪 .....          | 208 |
| 6.2 成品率控制技术 .....              | 211 |
| 6.2.1 统计控制 .....               | 211 |

---

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 6.2.2 动态工艺条件技术 .....         | 214 |
| 6.2.3 工艺诊断分析 .....           | 220 |
| 6.3 总结 .....                 | 231 |
| 参考文献 .....                   | 232 |
| 附录 多晶发射极 NPN 晶体管工艺仿真代码 ..... | 235 |

# 第 1 章 IC 制造的技术特点与发展趋势

## 1.1 IC 产业的发展历史与趋势

对于集成电路 (integrated circuit, IC) 技术, 可进行如下的定义: 大批量地制作基本的电子器件, 各器件在实体结构/电学特性上实行必要的隔离, 并且在芯片层级将这些基本的元器件进行电学互连, 从而形成功能复杂、性能优越的电子电路系统。这样的电路系统称为集成电路; 具体实现集成电路的加工制造的行为为集成电路制造。

集成电路产业起始于 20 世纪 50 年代末。1958 年 9 月, 美国德州仪器公司的 J. Kilby 展示了世界上第一款可工作的集成电路样品 (图 1.1); 约在半年后, 仙童半导体公司的 R. Noyce 也独立地提出了集成电路的概念, 与 J. Kilby 不同, R. Noyce 更多地解决了很多实践中的工艺问题, 因而也更接近于现代意义上的集成电路, 例如, 器件之间采用 PN 结隔离方案的具体实现, 器件之间采用片上引线互连 (在图 1.1 所示的 J. Kilby 样品中, 互连通过压焊引线实现) 等。J. Kilby 的电路是基于半导体锗片的, R. Noyce 则开辟了硅基集成电路的发展历程。

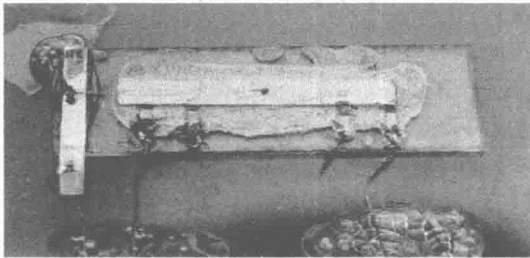


图 1.1 J. Kilby 所制作的第一块集成电路<sup>[1]</sup>

集成电路制造产业在诞生之后, 随即开始了持续的快速增长。表 1.1 总结了迄今为止几十年中微电子领域所取得的部分标志性的成果。

随着集成电路技术的不断进步, 各类具有强大功能的集成电路产品不断面世, 这些集成电路产品的应用反过来促使人们的生产和生活面貌发生了巨大的改变。表 1.1 的左栏, 按时间顺序列出了一些重要的电子产品。早期以高性能器件的研究和实现为主, 逐步转变至中小规模集成电路, 以后是计算机芯片组类的产品, 最后转变至移动通信和互联网应用类电子产品, 发生这些转变的节点在表 1.1 中作了

标示。

表 1.1 微电子领域中的重大历史事件

| 年份   | 器件或集成电路                          | 工艺技术                            |
|--|----------------------------------|---------------------------------|
| 1926   | J. Lilienfeld 提出场效应晶体管专利         |                                 |
| 1934   | O. Heil, 另一个场效应晶体管专利             |                                 |
| 1939   | R. Ohl 研究了 PN 结势垒的机理             |                                 |
| 1946   | R. Ohl 提出基于半导体结的太阳能电池            |                                 |
| 1947   | W. Shockley 等发明点接触式晶体管           |                                 |
| 1948   | W. Shockley 等发明结型晶体管             |                                 |
| 1955   | R. Braunstein 报道了基于 GaAs 的 LED   |                                 |
| 1956   | G. Hall 及 F. Gutzwiller 实现晶闸管    | H. Yourke 发明了 ECL 工艺            |
| 节点 A: 1958~1959 年, J. Kilby 和 R. Noyce 发明集成电路  |                                  |                                 |
| 1960   | D. Kahng 和 M. Atalla 发明了 MOSFET  |                                 |
| 1962   |                                  | J. Hoerni 发明了平面工艺               |
| 1963   |                                  | F. Wanlass 和 C. Sah 提出了 CMOS 工艺 |
| 1964   |                                  | G. Moore 提出了 IC 发展的摩尔定律         |
| 1967   | D. Kahng 和 S. Sze 提出浮栅晶体管        |                                 |
| 1968   | D. Fullagar 设计了第一款 $\mu$ A741 运放 |                                 |
| 1971   | Intel 公司推出了 DRAM 动态存储器           |                                 |
| 1971   | Intel 公司推出第一款微处理芯片 4004          |                                 |
| 1978   | G. Perlegos 开发了 EEPROM           |                                 |
| 节点 B: 1978 年, Intel 推出了 8086 微处理器芯片; 1981 年 IBM 推出了基于 Intel 8088 微处理器的个人计算机, 开启了个人计算机 (微机) 普及的时代 |                                  |                                 |
| 1980   | F. Masuoka 发明了闪存 (flash memory)  |                                 |
| 1982   | Baliga 等报道了可实用的 IGBT 器件          |                                 |
| 1980s 初  |                                  | 步进式光刻技术开始应用                     |
| 节点 C: 1980 年代初期至中期, 因特网已经开始建立, 并且逐步扩张。1979 年在日本, 1981 年在北欧, 直至 1980 年代中期, 移动通信已经组网并实用化 (1G 时代)   |                                  |                                 |
| 1985   | Intel 推出 80386 处理器               |                                 |
| 1989   |                                  | IBM 引入 SiGe 技术                  |
| 1990   | Qualcomm 开始其 CDMA 基站及终端业务        | BiCMOS 工艺实用化                    |
| 1991   | 芬兰推出 GSM 数字移动终端                  |                                 |
| 1992   | 64MB RAM                         |                                 |
| 1993   | Intel 推出 Pentium 处理器             |                                 |
| 1997   |                                  | IBM 引入铜互连工艺                     |
| 1999   | Intel 推出 Pentium III 处理器         |                                 |
| 2000   | 1GB RAM                          |                                 |
| 2006   |                                  | 65nm 工艺 (Intel 酷睿 II 处理器)       |
| 2008   |                                  | 步进光刻升级至扫描-步进式光刻技术               |
|  |                                  | SiC 技术进入实用化 (SiC JFET)          |
| 2012   | Intel 推出酷睿 III 处理器               | 22nm 工艺 (Intel 酷睿 III 处理器)      |

表 1.1 的右栏,列出了主要的工艺技术方面的进步。多数的单项工艺技术,如氧化、扩散、LPCVD、刻蚀、光刻、离子注入、蒸发与溅射等,隶属于一般性的工业基础性的技术,不仅在微电子加工中,在其他工业部门中也有应用,并且都有一定的历史。这些技术引入半导体制造中,并且进行一定的适应性的改造,都要经过一定的过程,很难确定一个统一的时间点,故在表中省略了。工艺技术发展的几个阶段大致划分如下:①早期是手工操作,图 1.2 显示了 1947 年发明的第一个晶体管,手工制作的特征非常明显;②随着集成电路的发明,各单项工艺技术逐步被引入半导体制造,绝大多数的单步工艺都涉及复杂的物理-化学过程,故需要大量应用专用的半导体制造设备;③开始形成成套工艺技术,如平面工艺、Bipolar 工艺(双极工艺)、CMOS 工艺等;④以硅 CMOS 工艺为主的技术持续进步,特征尺寸不断缩小,集成度不断提高。

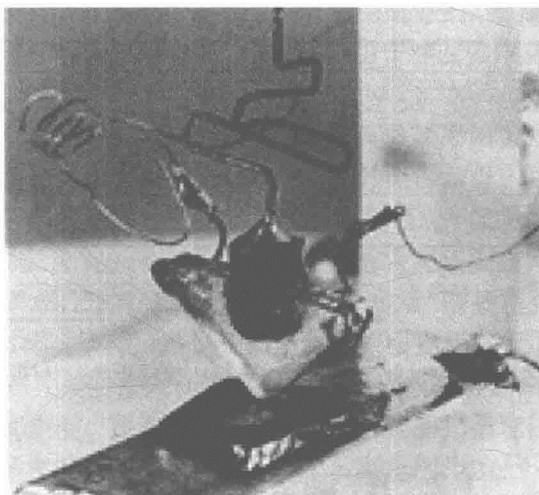


图 1.2 W. Shockley 等制作的第一个晶体管<sup>[1]</sup>

集成电路制造业在几十年中都保持了高速的增长趋势,其集成度不断提高的发展历程一般认为可以由摩尔定律来描述。摩尔定律由英特尔公司创始人之一的 G. Moore 提出,其最初的主要内容为:集成电路的集成度(一定的芯片面积上所制作的晶体管数目),大约每隔 18 个月便增加一倍,性能亦提升一倍。随着集成度的日益提高,电路的特征尺寸线条,其宽度不断缩小。上述趋势在近年来已经有所放缓。图 1.3 以处理器 MPU(及专用集成电路 ASIC)中的几个关键层线条尺寸为例,显示了集成电路产业中尺寸缩小的情况以及未来若干年中进一步缩小的预测。

硅 CMOS 工艺的技术分代,是通过特征尺寸线宽来表示的。例如,90nm 工艺节点,65nm 工艺节点等,下代工艺的线宽约为其上一代的 0.7 倍。对于长、宽均为特征尺寸的正方形来说,正方形面积为其前一代面积的  $1/2$ ,故集成度提高了 1

倍。当前的先进工艺处于 22nm 工艺节点，粗略估算，如果存在一种“22 $\mu\text{m}$ ”的技术节点，则这两种工艺相差约 20 代。如前所述，早期的集成电路产业，一代技术的生存周期为 18 个月（由图 1.3，当前的周期为 2~3.8 年），这种每隔一段时间集成度呈几何级数式的增长，在人类历史上尚不曾有其他产业能够达到。

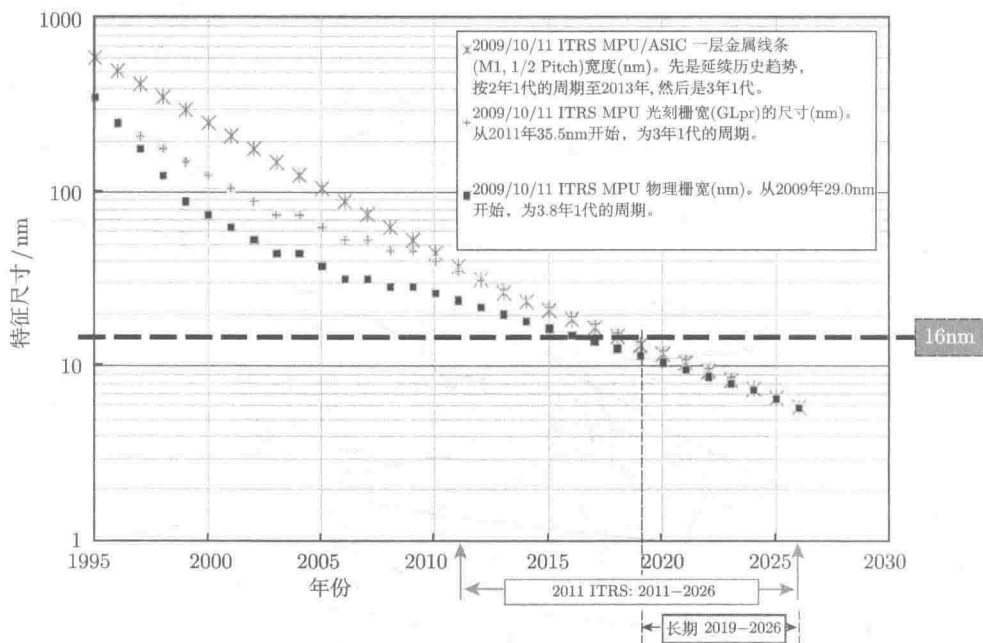


图 1.3 近年来集成电路尺寸按比例缩小的趋势<sup>[2]</sup>

## 1.2 IC 制造技术的特点

与其他加工制造相比，集成电路的制造呈现出如下的技术特点。

### 1.2.1 以复杂的物理-化学过程为主，技术门槛高

不同的集成电路加工遵循各自特定的流程进行，而这些流程又是由若干工艺步骤相互衔接组成的，当前先进的硅 CMOS 加工工艺可以包含几百步的工艺单步。

工艺单步即通常所说的工艺技术，常见的单项工艺技术有氧化、扩散、LPCVD、刻蚀、光刻、离子注入、蒸发、溅射、化学机械抛光 (CMP) 等。这些工艺步骤通常涉及所谓的“极端制造”，工艺体现为物理的、化学的或者物理-化学联合的作用，过程极其复杂。

具体考察一些单项工艺，可以对“极端制造”的技术含量产生一个初步的认识。



**氧化-扩散工艺:**该工艺步骤在加热炉管中进行,工艺目的是在半导体硅片的表面形成一层致密和均匀的二氧化硅薄膜(氧化),或者令气相、固相中的掺杂杂质,借由热动力学驱动,扩散进入体硅材料中特定的位置。氧化-扩散工艺步的典型炉温为 1000℃(对于氧化尚需要干氧或者湿氧气氛;对于扩散需要扩散性气体气氛;对于杂质再推进需要惰性气体气氛),尽管这不是一个绝对高值的工业生产温度,相较于一般性的产业,也可以算得上是一种极端性的环境了。

**LPCVD 工艺:**该工艺在较低的炉管压强和中段温区温度下进行,气相环境中的材料分解后,在硅片表面组合堆积,形成器件结构中的各种薄膜。典型的炉管压强为 100 毫托,典型的加工温度为 650℃,同样地,是一种非常规条件下的加工。

**刻蚀工艺:**该工艺主要借助等离子体轰击和反应离子腐蚀的方式进行,目的是去除硅片表面特定面积范围内的某种或某几种材料的薄层。除需要真空环境之外,更为突出的特点在于,该工艺是在等离子体环境中进行的。等离子体一般由射频功率源激发,典型的射频源为 2.45GHz,1500W。由于涉及强电磁场,这样的加工制造环境是极端性的。

**光刻工艺:**早期的光刻机光源为高压汞灯,典型功率如 1500W,提供一种强光环境;当前主流的曝光光源采用准分子激光(紫外至深紫外)仍然是一种很强的光源。光刻工艺中应用到的空间定位技术,特别是在七八个数量级范围(亚纳米至几十厘米)内所具备的长度测控的长程精度,是当前人类工程技术的精华。

**光/激光退火:**此类工艺用于掺杂杂质的退火激活,需要用到更强的强光作用。

**离子注入工艺:**将离子源所产生的带电离子束引出后进行加速,获得较高能量的离子束,最后达到并轰击进入体硅材料,这是一种对半导体材料进行掺杂的技术。重要特征是高真空度。其他类似装备,如在线式的扫描电镜、真空溅射、超高真空外延等,也都是在高真空环境下进行的,典型范围为  $10^{-4}\sim 10^{-7}$ Pa,是一种极端性的加工条件。

上述这些工艺单步,除了本身需要专门的设备和装置来造成特定的加工环境之外,全套工艺流程需要在超净环境中来运行,流程控制从整体上要求工艺步骤的稳定性,加工质量的均匀性、重复性,因而引入了更为强悍的极端制造色彩。要想比较顺利地运行集成电路的加工制造,即便是不考虑电路复杂性和性能优化要求,单从工艺角度来说其技术门槛也是很高的,这些通常意味着需要大量的投入。

进行微电子制造的原材料,除了硅片等半导体材料自身之外,尚需要种类繁多的工艺气体、化学药品等,这些原材料无一例外都要求较高的纯度。硅材料是迄今为止经过人类技术加工所能得到的最纯的物质,纯度可达 11~12 个 9(99.999999999%~99.999999999%)。

在工厂级别的其他一些考虑,有动力支持,工艺过程调和监控,人身伤害防护,环境无害化处理等。工艺过程的自动化的调度与监控是集成电路制造流程本身