

集成电路工程

JICHENG DIANLU
GONGCHENG

〔日〕柳井久義 後川昭雄

机械工业出版社

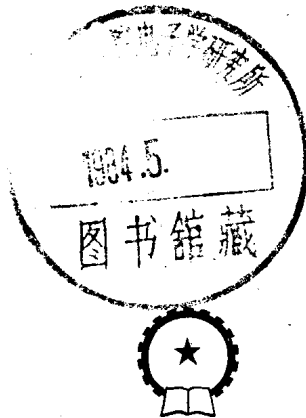
73.755
395
2

集成电路工程

〔日〕 柳井久義 後川昭雄

《集成电路工程》翻译组 译

黄振岗 陈昌存 校



机械工业出版社

1111422

本书内容丰富，实质上为集成电路大全。书中不但对集成电路中重要元器件的物理特性、工作原理等方面作了介绍，而且对各类集成电路的设计、制造、测试、应用等作了详尽的叙述，如第3、4章的单片集成电路和膜集成电路工艺，第5、6章的集成电路设计原理和方法，第8章的芯片键合技术，第11章的应用实例都是有实用价值的经验总结，最后还对集成电路的可靠性进行了专题论述。

本书主要供半导体专业从事集成电路设计和制造的科技人员阅读，高等院校有关专业的师生也可参考。

集積回路工学

柳井久義 後川昭雄 共編

コロナ出版社

* * *

集成电路工程

〔日〕 柳井久義 後川昭雄 共編

《集成电路工程》翻译组 译

黄振岗 陈昌存 校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第117号）

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 18 · 字数 474 千字

1984年3月北京第一版·1984年3月北京第一次印刷

印数 00,001—13,300 · 定价 2.90 元

*

统一书号：15033·5526

译 者 的 话

本世纪六十年代初期，在硅平面工艺的基础上相继诞生了双极型和 MOS 型集成电路，使电子工业发生了革命性的变化。二十年来，集成电路以其旺盛的生命力日新月异地向前发展。在科学技术发达的国家里，集成度以每年翻一番的速度激增，很快就由中小规模电路发展成为大规模和超大规模电路，由零部件发展成为子系统乃至中小系统，并且产品种类繁多，数量巨大，在国民经济中占有极其重要的地位，可以毫不夸张地说，集成电路的触角已经伸进现代生活的一切领域，小至日常生活中的玩具、手表、收音机、电视机，大至大型通用数字计算机、人造卫星，无一没有集成电路的踪影。昔日连做梦也不敢想象的 64K 位随机存取存储器、功能齐全的微处理机今天已成为现实。目前，超大规模集成电路已进入实用化阶段，正在电子工业中酝酿着另一场更为深刻的革命。

本书内容丰富，从集成电路中重要元器件的物理特性开始，到基本电路的工作原理、设计、制造工艺、测试方法和可靠性分析等方面都作了详尽的介绍，并结合每章内容给出行之有效的实例，是一本全面而系统的经验总结。

本书共分 12 章。第 1 章为概论，叙述了集成电路的发展史、分类、各类超小型电路特点的比较和大规模集成电路的现状与发展预测。

第 2 章为以后各章的预备知识，对双极型晶体管和 MOS 型晶体管的工作原理作了介绍，并对这两类晶体管的工作模型进行了分析。

第 3、4 章为半导体单片集成电路和膜集成电路的制造工艺，而关于这两种集成电路的设计方法以及大规模集成电路阶段的制造工艺则在第 5、6 章里介绍。

IV

第7章是关于大规模集成电路设计和计算机辅助设计等新问题的探讨。

第8章详细介绍了包括有线键合和无线键合在内的半导体芯片的键合技术。

第9章总结了大规模集成电路和单片集成电路的组装和密封方法。第10章从结构分析开始综述了各种测试方法。

第11章列举了集成电路在民用设备、通讯设备直至各种系统中的应用，还介绍了大规模集成电路在电子计算机、集成化存储器 and 固体摄像装置中的应用。

最后，第12章阐述了集成电路的可靠性问题，对于集成电路可靠性设计、试验、失效分析等都有所介绍。

本书由《集成电路翻译组》译出，具体分工如下：陈昌存译第1、3、4章；王宏成译第2章；郑姗姗、陈瑞藻译第5章；高金生译第6章；张沪光译第7、9章；严蕊琪译第8章；秦启佑译第10章；陈国华译第11章；卢鲜译第12章。

本书的第5、7、9、10、11、12章经陈昌存初校，最后，全书由黄振岗总校。

由于水平所限，错误和不妥之处在所难免，敬请读者指正。

《集成电路工程》翻译组

目 录

第1章 集成电路与大规模集成电路概论	1
1.1 集成电路发展史	1
1.2 超小型电路的分类	6
1.3 集成电路的定义	10
1.4 各种集成电路方式的比较及其特点	12
1.5 向大规模集成电路发展的趋向和大规模集成 电路方式	17
1.5.1 从集成电路向大规模集成电路的发展	17
1.5.2 集成度的提高	19
1.5.3 大规模集成电路方式	21
第2章 集成电路中半导体器件的基础	26
2.1 双极晶体管的基础	26
2.1.1 pn结的特性	26
2.1.2 晶体管工作的基础	29
2.2 双极晶体管模型	33
2.2.1 Ebers-Moll模型	34
2.2.2 电荷控制模型	38
2.2.3 集总参数模型	40
2.2.4 非线性四层晶体管模型	43
2.2.5 利用简化表示法的集总参数模型	49
2.3 MOS晶体管	52
2.3.1 前言	52
2.3.2 半导体表面的理论	54
2.3.3 MOS晶体管的工作原理	62
2.3.4 对特性有很大影响的参数	68
第3章 半导体单片集成电路的制造工艺	73
3.1 前言	73
3.2 单晶的制造方法	75
3.3 晶片的表面处理	77

3.3.1 机械抛光	77
3.3.2 气相腐蚀	78
3.4 氧化	78
3.4.1 氧化膜的生长方法	78
3.4.2 二氧化硅膜的生长机理	80
3.5 光刻工艺	81
3.6 掩模制作法	82
3.7 选择扩散和埋层	84
3.8 外延生长	87
3.8.1 生长方法	87
3.8.2 自掺杂	88
3.8.3 无缺陷结晶	90
3.9 CVD工艺	90
3.10 隔离扩散	93
3.11 基区扩散	94
3.12 发射区扩散	95
3.13 金扩散	96
3.14 布线	96
3.14.1 布线方法	96
3.14.2 蒸发膜的制法和图形的形成	97
3.14.3 多层布线	98
3.15 MOS集成电路的制造工序	101
3.16 晶片检测和键合	103
3.17 密封与测试	104
3.18 离子注入法	105
3.18.1 离子注入法的特点	105
3.18.2 离子注入装置	107
3.18.3 应用举例	110
第4章 膜集成电路的制造工艺	113
4.1 前言	113
4.2 膜元件及电路设计	113
4.2.1 电阻元件的设计	113
4.2.2 电容器的设计	115

4.2.3	导体的设计	116
4.2.4	电路设计	117
4.3	薄膜元件和材料	118
4.3.1	基片材料	118
4.3.2	薄膜有源元件	124
4.3.3	薄膜无源元件	130
4.4	薄膜元件的制造工艺	138
4.4.1	薄膜淀积工艺	138
4.4.2	薄膜加工工艺	154
4.4.3	薄膜无源电路的制造方法	156
4.5	厚膜元件及材料	159
4.5.1	厚膜基片材料	159
4.5.2	厚膜有源元件	160
4.5.3	厚膜无源元件	162
4.6	厚膜元件的制造工艺	175
4.6.1	厚膜元件的印刷方法	177
4.6.2	烧结工序	180
第5章	双极型集成电路的设计	182
5.1	双极型集成电路元件的基本设计	182
5.1.1	晶体管	182
5.1.2	二极管	202
5.1.3	电极结构	206
5.1.4	电阻	210
5.1.5	电容器	214
5.1.6	金扩散工艺	218
5.1.7	肖特基势垒二极管	222
5.2	元件隔离工艺	229
5.2.1	前言	229
5.2.2	p _n 结隔离	236
5.2.3	绝缘层隔离	238
5.2.4	空间隔离(台面腐蚀型隔离)	240
5.2.5	集电极扩散隔离(CDI)	240
5.2.6	选择氧化隔离(等平面隔离)	242

5.3	双极型数字集成电路的特性和设计	245
5.3.1	双极型数字集成电路的逻辑功能	245
5.3.2	数字集成电路的分类	250
5.3.3	双极型数字集成电路的一般特性	251
5.3.4	基本电路的设计和特性	254
5.4	双极型线性集成电路的特性和设计	274
5.4.1	前言	274
5.4.2	差动放大电路的基本特性	274
5.4.3	运算放大器的电路结构	286
5.5	双极型集成电路的版图布局方法	297
5.5.1	前言	297
5.5.2	元件的版图布局方法	298
5.5.3	互连线	299
5.5.4	经济设计	302
第6章	MOS集成电路的设计	305
6.1	MOS器件和MOS电路	305
6.1.1	MOS器件的种类	305
6.1.2	MOS电路方式	305
6.1.3	静态电路和动态电路	307
6.2	直流特性的设计	311
6.2.1	传输特性	311
6.2.2	导通电平和截止电平	313
6.2.3	噪声容限	315
6.3	过渡特性设计	316
6.3.1	截止时间	316
6.3.2	导通波形	319
6.3.3	关于过渡特性的其他效应	320
6.4	版图布局方法	321
6.4.1	电路的版图布局	321
6.4.2	寄生MOS晶体管和栅保护电路	323
6.5	新技术	325
6.5.1	ED型MOS电路	325
6.5.2	互补型MOS (C-MOS) 电路	325

6.5.3	n 沟道MOS电路	326
6.6	MOS和双极型集成电路的比较	327
6.6.1	引言	327
6.6.2	制造工序和组装	328
6.6.3	互连	328
6.6.4	集成密度和集成注入逻辑 (IIL)	329
6.6.5	工作比较	331
第7章	单片型大规模集成电路的设计	337
7.1	大规模集成电路的设计方式	337
7.1.1	大规模集成电路的问题	337
7.1.2	固定布线方式	338
7.1.3	选择布线方式	339
7.2	大规模集成电路的成本	339
7.3	大规模集成电路的设计顺序	342
7.3.1	系统设计	342
7.3.2	大规模集成电路的设计	343
7.4	计算机辅助设计的引入	345
7.4.1	计算机辅助设计引入的必要性	345
7.4.2	电路设计用的计算机辅助设计	345
7.4.3	逻辑设计用计算机辅助设计	346
7.4.4	版图布局设计用计算机辅助设计	348
第8章	混合集成电路和大规模混合集成电路 的组装技术	351
8.1	前言	351
8.2	半导体芯片的键合技术	351
8.2.1	合金键合技术	352
8.2.2	固相键合技术	353
8.2.3	熔焊技术	362
8.3	混合大规模集成电路用的芯片	367
8.3.1	软引线型	368
8.3.2	芯片端点型	370
8.3.3	传统的芯片	375

8.3.4 其它的芯片	376
8.4 芯片的键合方法	376
8.4.1 背面键合法	377
8.4.2 倒装键合法	381
8.4.3 其它的键合方法	390
8.5 用于混合大规模集成电路的实例	396
第9章 大规模集成电路及单片式集成电路的组装	400
9.1 晶片的测试和分割	400
9.1.1 晶片抽样检验	401
9.1.2 晶片探针测试	401
9.1.3 晶片的分割	402
9.1.4 外观检查	402
9.2 键合	403
9.2.1 小片键合	403
9.2.2 引线键合	404
9.2.3 面朝下键合	406
9.3 封装	409
9.3.1 电阻熔焊法	409
9.3.2 低熔点焊锡及玻璃法	410
9.3.3 树脂模塑法	412
第10章 集成电路、大规模集成电路的测试方法	414
10.1 前言	414
10.2 结构分析	415
10.3 构成元件的电学特性测试	416
10.4 数字集成电路的特性	417
10.4.1 直流特性	417
10.4.2 开关特性	422
10.5 线性集成电路的特性	424
10.5.1 直流特性	424
10.5.2 交流特性	428
10.6 集成电路自动测试仪	431
10.6.1 集成电路测试仪的选择标准和必要性	434

10.6.2	集成电路测试仪的功能	434
10.6.3	集成电路测试仪的程序方式	436
10.6.4	集成电路测试仪功能的扩大	436
10.6.5	集成电路测试仪的实例	437
第11章	集成电路及大规模集成电路的应用	441
11.1	线性仪器	441
11.1.1	民用设备	441
11.1.2	通信设备	449
11.2	大规模集成电路系统	460
11.2.1	逻辑门电路及大规模集成电路系统	461
11.2.2	电子计算机与大规模集成电路	464
11.2.3	集成化存储器	473
11.3	固体成象技术	491
11.3.1	矩阵型固体摄象装置	492
11.3.2	采用电荷耦合器件 (CCD) 的摄象装置	497
11.3.3	文字和数字显示装置	499
第12章	集成电路的可靠性	502
12.1	前言	502
12.2	可靠性概述	503
12.2.1	失效率	503
12.2.2	失效率的分布图	504
12.2.3	串并联系统的置信度	505
12.3	系统可靠性的设计和预测	507
12.4	集成电路的可靠性设计	508
12.4.1	电路设计时的考虑	508
12.4.2	结构设计时的考虑	509
12.5	集成电路的可靠性保证	510
12.5.1	概述	510
12.5.2	筛选试验	511
12.5.3	可靠性试验	512
12.5.4	抽样检验与批允许不合格率	519
12.5.5	制造工艺的管理	524

12.5.6 科学卫星上所用集成电路的质量保证试验实例	525
12.6 集成电路的失效分析	527
12.6.1 集成电路的失效模式	527
12.6.2 pn结和表面退化	527
12.6.3 互连线的失效	529
12.6.4 键合不良	531
12.6.5 树脂模塑型集成电路的失效	532
12.7 可靠性数据	532
参考文献	535

第1章 集成电路与大规模集成电路概论

1.1 集成电路发展史

让我们来考察一下目前的集成电路是应何种社会要求而产生，又是经由怎样的发展过程才达到现阶段水平的？电子学的一般发展趋向，起初是：要求超高速或超高频；要求低功耗和超小型化；后来是为实现复杂系统要求高可靠性；用户要求大幅度降低价格和提高性能。在信息处理和脉码调制领域内，除上述要求外，基本电路的标准化和易于数字化也是引人注目的发展方向。

1) 要在短时间内处理大量信息，就必须大力缩短载流子的渡越时间，这必然要求元件的小型化。超小型化起源于第二次世界大战中飞机上所用的电子装置，战后，出于研制导弹和探索宇宙等目的，超小型化有了很大的进步。首先是在电子管和电路元件的几何尺寸超小型化的基础上从高密度组装入手，但散热不良，功耗也大。后来明白，要同时实现超小型化和低功耗，必须向半导体化的方向发展，结果出现了高可靠性的电子系统。

2) 随着电子系统的大型化，元件数和结点数会不断增加，这些元件和结点处的寿命对系统的可靠性有很大影响。现在，可靠性的设计方向是使复杂系统本身具有发现故障所在的自诊断功能，并且冗余度高，即使局部出了故障，整机仍可正常工作。

如果要求这样高的可靠性，就需要研究构成器件和组装材料的物质的基本性质（例如半导体的物理性质）并提高其性能。

3) 当电子技术广泛渗透到社会生活时，经济性自然就变得重要了，如何降低“单位功能的价格”也就成了一个课题。集成化的目标，当初是超小型化，但随着系统的大型化，重点移到了高可靠性和经济性方面。

下面回顾一下集成电路和大规模集成电路的发展史。

1) 以第二次世界大战为转机, 通讯、航空和雷达等方面的电子装置, 无论在质方面还是在量方面都有长足的进展, 特别是航空机载电子装置, 由于冲击厉害和受容积的限制, 小型化尤其迫切。第一步是电子从标准管(ST)向玻璃管(GT)、小型管(MT)和超小型管(SMT)发展, 电阻和电容之类的无源元件也小型化了, 但工艺操作变得困难起来, 复杂电路的装配尤其如此, 这就限制了小型化的进一步发展。于是开始把电子装置的最小单位从单个元件发展到单元电路, 首先产生了微型组件的想法。也就是汇集一定数量的元件构成单元电路, 犹如用元件装配成整机那样。图 1.1 所示的典型例子是积木式微型组件, 其结构是在两块绝缘板之间排列着许多元件; 为谋求装配工作机械化, 把各元件的基片, 因而也就是把管壳的面积大小规格化, 仅高度不受限制, 这就产生了微型组件。这些微型组件是把许多分立元件汇集在一个管壳内的, 随着元件数目的增加, 结点数也越来越多。

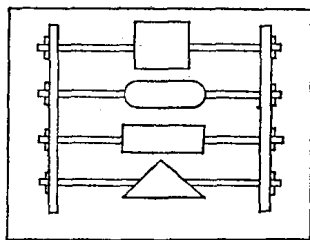


图1.1 积木式微型组件

2) 为了解决结点数增多的问题, 出现了把分立的无源元件和连线同时作成的方法。这种方法叫二维电路方式或二维方式, 是用薄膜或厚膜技术, 在底面把电阻、电容和连线同时淀积出来(参考图 1.2)。从 1950 年前后起, 复合电路的雏型是用电阻膜和导体膜夹住陶瓷基片而形成的电阻和电容器的复合电路。后来更进一步, 在一块半导体片上, 制作了很多点接触晶体管。

3) 自 1952 年 G. W. A. Dummer 在华盛顿学会上发表集成电路的概念以来, 出现了嵌入生长结晶晶体管的达林顿电路的专利和在一块大片上嵌入的二极管矩阵电路等。1953 年, 美国无线电公司发表了只用半导体制成的相移振荡器, 其结构如图 1.3 所示,

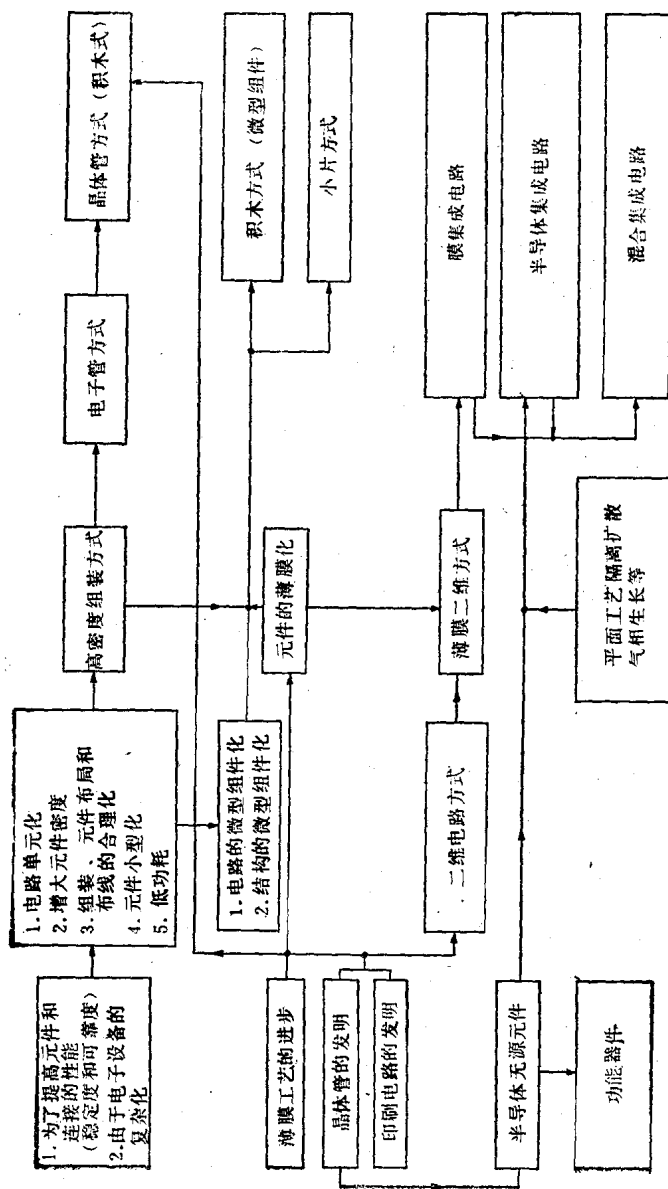


图1.2 朝集成电路方向的发展过程

晶体管的基区电阻和 pn 结电容也组合到电路中去。上述这些，可以说是半导体集成电路的开端。

1958 年，美国无线电公司的 Wallmark 等人发表了 pn 结隔离的基本思想；在理论上，西屋公司的分子电子学的概念也是重要的，而在实际上，德克萨斯仪器公司的 J. Kilby 于 1959 年提出了一种极为灵活的方案：利用台面管和硅的体电阻，使半导体晶体内的各元件在电气上互相绝缘，再在半导体表面布线构成电路。紧接着，仙童公司

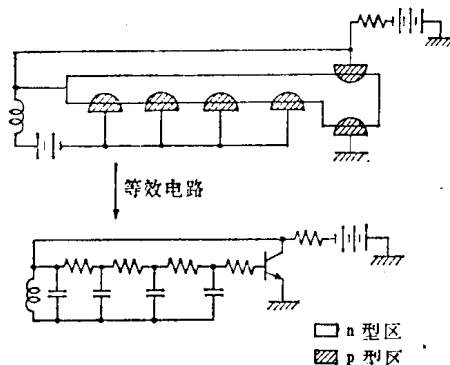


图1.3 相移振荡器

发表了在半导体内制作有源元件时，反复进行光刻和选择扩散、并在氧化膜上蒸铝进行布线的平面工艺。这样，在五十年代后期就出现了现在半导体集成电路的全部基本工艺，这一点颇为引人注目。

4) 以后，集成电路以其特有的元件隔离工艺为中心而得到发展，1960 年，出现了同时采用外延工艺的隔离技术以及介质隔离法。在膜集成电路方面，1965 年，有两种颇受注意，一种是 IBM[⊖] 公司用于 360 计算机的著名的厚膜集成电路固体逻辑工艺（简称 SLT），另一种是贝尔电话研究所的氮化钽系薄膜集成电路。在此期间，出现了和双极型集成电路不同的另一类集成电路，即金属-氧化物-半导体集成电路（简称 MOS 集成电路）。MOS 集成电路的特点是：电路中的电阻等无源元件均由 MOS 晶体管构成，其集成度为双极型集成电路的 4 倍。1965 年，通用微电子学公司，以构成电路为中心，发表了许多与 MOS 集成电路有关的专利。

⊖ IBM 公司即美国国际商业机器公司——译者注。