

集成电路工程 设计·制造与应用

【美】A·B·格拉塞尔 G·E·苏巴克—夏普 著 黄善煥 李建中 达杰 译

INTEGRATED CIRCUIT ENGINEERING

Design, Fabrication
and Applications

Arthur B. Glaser

Gerald E. Subak-Sharpe

Addison-Wesley Publishing Company

1977

内 容 提 要

本书是美国的大学教科书,也是集成电路工程方面的一本综合性著作,内容全面,取材丰富。它主要讲述硅集成电路、薄膜和厚膜集成电路的设计、制造和应用等方面的课题。全书共十六章,内容涉及集成电路的基本原理,设计、制造工艺、材料器件的测试技术,模拟和数字集成电路的设计原理、模拟和数字系统的组成与应用,以及大规模集成电路的经济性分析、器件的故障和失效机理、成品率分析等。二至十六章各章都附有参考资料目录和一定数量的习题。

本书适合大专院校半导体技术、电子电信技术、自动控制、计算机硬件等专业的师生和研究生,以及有关专业的科技人员阅读。

集 成 电 路 工 程

设计、制造与应用

[美] A. B. 格拉塞尔 著
G. E. 苏巴克-夏普

黄善焕 李建中 达杰 译

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 850×1168 1/32 1985年4月第 一 版
印张: 26 16/32 页数: 424 1985年4月河北第一次印刷
字数: 703 千字 印数: 1—10,000 册

统一书号: 15045·总2933—有5380

定价: 4.80 元

译 者 的 话

集成电路工程是当代科学技术和工业发展的重要标志之一，它集中了物理学、化学、微电子技术、超纯材料、自动控制及计算技术等方面的最新成就，是一门新兴的工程技术，至今仍在迅速地发展，并取得了新的突破。它的出现及不断地更新换代确已起了革新科学技术，社会经济以及人们日常生活整个面貌的作用。故世界各国均将集成电路作为现代化进程的优先领域。为此，我们特意将美国出版的“集成电路工程”一书译成中文，以飨国内广大读者。

本书对集成电路技术的论述比较系统，全面、深入而清晰。全书共十六章，包括了硅集成电路、薄膜集成电路和厚膜集成电路的设计原理，器件模拟方法、制造和封装工艺、材料与器件测试、模拟与数字集成电路的设计和系统应用，集成电路的成品率和可靠性分析等内容。凡重要论点均引述了相当数量的参考文献，对一些重要概念则列有思考题，以助读者深入理解，融会贯通。这是一部颇具权威的教科书、而对集成电路的研制，生产及应用亦有着普遍的指导意义。

作者格拉塞尔 (Arthur B. Glaser) 和舒巴克夏普 (Gerald E. Sufak-Sharpe) 曾在纽约市立大学、贝尔实验室以及美国海军研究生院讲授过这部书。它至今仍在美国一些大学用作基本教材。

凡原书中文字或图表错漏之处，在译本中均用“*”标注，并予以补正。

本书内容新颖、篇幅较大。我们限于水平及时间，不妥或错误在所难免，敬希广大读者批评指正。

译 者

1983年于北京

目 录

前言	(1)
第 1 章 绪言	(6)
1.1 集成电路—梗概	(7)
1.2 历史的回顾—精致的计算机为什么用上了小芯片	(10)
1.3 展望未来	(18)
第 2 章 二极管和双极型晶体管	(21)
2.1 耗尽宽度和耗尽电容	(21)
2.2 $p-n$ 结的电流—电压特性	(25)
2.3 $p-n$ 结电流的温度关系	(28)
2.4 扩散电容	(29)
2.5 $p-n$ 结击穿	(30)
2.6 $p-n$ 结的瞬态特性	(33)
2.7 集成电路二极管	(36)
2.8 肖特基势垒二极管	(37)
2.9 欧姆接触	(41)
2.10 结型晶体管	(42)
2.11 冈姆尔—普尼模型	(45)
2.12 基区扩展电阻	(59)
2.13 混合 π 模型	(61)
2.14 电压限制	(63)
2.15 离子注入的双极型晶体管	(64)
2.16 二维晶体管的分析	(66)
2.17 横向 $p-n-p$ 晶体管	(70)
第 3 章 场效应器件	(79)

3.1	引言	(79)
3.2	结型场效应晶体管	(79)
3.3	MOS电容器	(88)
3.4	MOS晶体管	(102)
3.5	等效电路	(109)
3.6	复合介质的场效应晶体管	(113)
3.7	势阱和电荷耦合器件 (CCD)	(115)
第4章	无源元件.....	(125)
4.1	电阻器的几何形状	(125)
4.2	电阻器的容差	(129)
4.3	半导体电阻器	(132)
4.4	扩散半导体电阻器的设计	(135)
4.5	薄膜电阻器	(138)
4.6	分布的RC结构	(140)
4.7	微波带状电路 (微带)	(145)
4.8	单块电容器	(149)
4.9	薄膜电容器	(152)
4.10	交指电容器	(154)
4.11	电感器	(156)
4.12	耦合器	(157)
4.13	循环器与隔离器	(159)
第5章	工艺过程的物理与化学.....	(165)
5.1	蒸发	(165)
5.2	溅射	(179)
5.3	外延生长	(191)
5.4	扩散	(206)
5.5	离子注入	(230)
5.6	硅的氧化	(237)
5.7	氮化硅的淀积	(247)

5.8	硅晶片的清洁处理	(248)
5.9	硅中杂质的特性	(249)
5.10	光刻胶	(252)
第 6 章	硅集成电路.....	(261)
6.1	结隔离双极电路	(261)
6.2	梁式引线技术	(267)
6.3	倒锥氧化层隔离	(271)
6.4	V形槽隔离	(274)
6.5	介质隔离	(276)
6.6	倒装芯片	(278)
6.7	集电区扩散隔离	(279)
6.8	埋层集电区结隔离双极型集成电路中的复合掩模	(281)
6.9	互补双极型电路	(282)
6.10	厚氧化硅金属栅MOS场效应晶体管电路	(283)
6.11	复合绝缘栅结构	(286)
6.12	离子注入在硅集成电路工艺中的应用	(287)
6.13	自对准金属栅结构	(289)
6.14	自对准多晶硅栅NMOS工艺	(290)
6.15	互补MOS结构	(292)
6.16	DMOS和VMOS.....	(296)
6.17	蓝宝石上的硅电路	(298)
6.18	第二代I ² L工艺.....	(299)
第 7 章	硅集成电路的设计.....	(303)
7.1	引论	(303)
7.2	图形制作	(304)
7.3	掩模对准容差	(312)
7.4	最小布图间隔	(314)
7.5	最小面积晶体管	(329)

7.6	硅集成电路的版图	(332)
7.7	集成电路的计算机辅助布图	(339)
第8章	薄膜电路.....	(359)
8.1	引言	(359)
8.2	金属膜的导电机理	(359)
8.3	衬底	(362)
8.4	薄膜电路制造工序	(365)
8.5	电阻器的设计	(374)
8.6	电容器的设计	(379)
8.7	导体薄膜	(383)
8.8	薄膜电路的布图	(384)
第9章	厚膜电路.....	(390)
9.1	引论	(390)
9.2	厚膜工艺的定性描述	(391)
9.3	导电浆料	(392)
9.4	电阻浆料	(398)
9.5	介质浆料	(402)
9.6	厚膜电阻器的设计与版图	(406)
9.7	厚膜电容器的设计与版图	(412)
9.8	电路的分割	(412)
9.9	衬底	(413)
9.10	芯片及其它分立元件的组装	(415)
第10章	组装技术.....	(420)
10.1	芯片的焊接	(420)
10.2	丝焊	(423)
10.3	梁式引线	(426)
10.4	载带封装	(427)
10.5	倒扣	(429)
10.6	封装	(431)

10.7	散热问题	(434)
第11章	集成电路的中间测试及试验	(437)
11.1	引言	(437)
11.2	电阻率四探针测试法	(437)
11.3	电阻率和载流子迁移率	(440)
11.4	薄膜厚度—干涉法	(441)
11.5	结深的测量	(448)
11.6	杂质分布曲线的测量	(449)
11.7	测试项目简介	(459)
11.8	数字电路的测试	(460)
11.9	存储器的测试	(461)
11.10	模拟电路的测试	(464)
11.11	混合模拟电路的功能测试	(465)
11.12	自动测试设备	(467)
11.13	集成电路测试的经济学	(468)
第12章	模拟集成电路	(475)
12.1	运算放大器的参数	(475)
12.2	双极型差分放大器	(479)
12.3	电路不平衡的影响	(485)
12.4	场效应晶体管差分放大器	(492)
12.5	差分放大器的频率响应	(496)
12.6	电流源	(499)
12.7	改进差分放大器的共模抑制比	(509)
12.8	单端放大器	(512)
12.9	直流电平移动	(520)
12.10	由差动至单端的变换—电流镜	(523)
12.11	超 β 增益级和共射共基差分放大器	(528)
12.12	输出级	(530)
12.13	参考电压	(533)

12.14	运算放大器—直流条件	(535)
12.15	运算放大器的小信号频率响应	(540)
12.16	运算放大器的大信号响应特性	(545)
12.17	运算放大器的大模型	(549)
第13章	模拟系统	(562)
13.1	用运算放大器作信号调节	(562)
13.2	频率选择性—双二次式	(570)
13.3	非线性放大	(575)
13.4	比较器	(576)
13.5	模拟—数字变换	(578)
13.6	模拟乘法器	(582)
13.7	锁相环	(588)
13.8	锁相环的应用	(594)
13.9	输入、输出隔离的放大器	(598)
13.10	用电荷传感器作延时元件的滤波器	(601)
第14章	数字电路	(613)
14.1	逻辑电路的特性	(613)
14.2	发射极耦合逻辑门	(622)
14.3	有补偿的ECL	(636)
14.4	晶体管—晶体管逻辑	(641)
14.5	集成注入逻辑	(671)
14.6	金属氧化物半导体 (MOS) 逻辑	(682)
14.7	发射极功能逻辑	(707)
14.8	阈逻辑门	(709)
第15章	数字系统	(718)
15.1	系统术语及结构问题	(718)
15.2	做存储元件的触发器	(722)
15.3	定时问题及时钟时滞	(731)
15.4	中规模集成的复杂电路	(733)

15.5	大规模集成的复杂电路: I 存储器	(742)
15.6	大规模集成的复杂电路: II 可编程序的逻辑矩阵	(755)
15.7	大规模集成的复杂电路: III. 微处理机和微计算机	(759)
15.8	集成电路的经济性	(767)
第16章	集成电路的失效、可靠性和成品率.....	(776)
16.1	集成电路的失效率	(776)
16.2	集成电路的失效机理	(781)
16.3	早期失效—可靠性筛选程序	(785)
16.4	有用寿命区	(787)
16.5	加速应力寿命试验	(791)
16.6	集成电路的成品率	(800)
16.7	缺陷密度	(804)
16.8	可辨认的点缺陷	(805)
16.9	不可辨认的点缺陷	(810)
16.10	若干实验结果	(813)
16.11	M 的随机性	(817)
16.12	多道工序工艺的成品率	(820)
16.13	假想的成品率模型	(824)

前 言

本书叙述有关硅集成电路以及薄膜和厚膜集成电路的设计、制作和应用等课题。所有这些课题构成了所谓的“集成电路工程”。在过去十年间，由于集成电路的使用不断增长，使得电子设备的结构和性能发生了重大的变化。对于从事硬件设计的每个技术人员来说，了解这类课题中的每项内容，以便掌握各种类型集成电路的优点与其局限性是很必要的。

本书是本专业第一部真正的综合性著作。其内容涉及到所有三种集成电路的电路设计、版图设计和制造工艺、集成电路在整机中的某些应用、集成电路中有源和无源器件模型的建立、组装技术、各种材料特性的测定和成品电路工作性能的检测以及集成电路的成品率和可靠性等问题。这些课题所概括的范围实际上是无限限制的，本书对所选择的每一个课题，大都作了较详尽的叙述。

本书主要是电机工程研究生第一年课程的教科书，因此读者应该读过一年电子电路课程，具有密尔曼（Millman）和霍尔凯斯（Halkias）所著的“电子器件和电路”（*Electronic Devices and Circuits*, Mc Graw-Hill, 1967）*以及电路和系统理论、物理和数学等方面的一般基础水平。各个课题的叙述方式也有所不同，因为有些课题，比如组装技术，用定性的方式来叙述就足够了；而对于电路设计或各种工艺操作中的物理和化学问题则需要定量的叙述。

书中所包含的材料十分丰富，足够三个学期课程之用，因而教员可根据需要来选用课题。下表是为选用本书的部分章节内容作大

- 密尔曼，霍尔凯斯所著的《集成电子学模拟，数字电路和系统》（*Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and Systems*—McGraw-Hill, 1972）一书，似更适合作本书的先修课程，该书已有人民邮电出版社翻译出版的中译本，分上、下册出版，一编著。

学高年级一学期课程（每周三小时）而编写的教学大纲：

高 年 级 一 学 期 课 程

课时	课 题	章节
1	概论	1.1~1.3
2, 3, 4	$p-n$ 结隔离双极工艺的基本流程, 外延技术, 光刻工艺和氧化过程的定性描述, 扩散的定性处理 (5.4.1节至5.4.3节的有关结论)	5.4.1~5.4.3
5	埋层、钻透氧化隔离、氧化硅和氮化硅的化学气相淀积	6.1.1, 6.3, 5.6.5, 5.7
6	介质隔离、补偿的双极集成电路	6.5, 6.9
7, 8, 9	MOS 电路	6.10, 6.14
10	金属栅CMOS工艺, CMOS的封闭	6.15
11, 12, 13	薄膜电路	8.4~8.8
14, 15, 16	厚膜电路	9.1~9.10
17, 18	运算放大器特性参数、双极差分放大器、电路的不平衡性	12.1~12.3 (无完整来源)
19, 20	电流源和共发射极放大器	12.6, 12.8
21	电平移动器、电流镜	12.9, 12.10
		前部
22	输出级	12.2
23, 24	电压参考、运算放大器的直流条件	12.3, 12.4
25	小信号和大信号下运算放大器工作特性小结	12.5和12.6 中的概括
26, 27	信号调整	13.1
28	逻辑电路特性	14.1
29, 30	埃柏尔斯—莫尔(Ebers—Moll)晶体管模型、发射极耦合逻辑、二极管—	2.10, 14.21 14.4.1

三极管逻辑		
31~33	晶体管—晶体管逻辑	14.4.2和 14.4.3的概 括;14.4.5, 14.4.6; 14.4.7的概括
34, 35	注入逻辑、MOS的初步	14.5, 14.6.1
36, 37	MOS	14.6.2;14.6.3 和14.6.4的概括
38	CMOS、或门和与门	14.6.5;14.6.8

教员也可根据需要而减少或略去薄膜和厚膜电路部分,以便增加第13章和第15章的有关整机应用的内容。

对于研究生一年的课程(每周三小时)的教学大纲如下:

研 究 生 一 年 课 程

课时	课 题	章节
1	概论	1.1~1.3
2~5	蒸发和溅射	5.1, 5.2
6, 7	外延	5.3
8~11	扩散和离子注入	5.4, 5.5
12~16	氧化、淀积氮化硅、清洗片子、光刻 胶、硅中杂质的特性	5.7~5.10
17, 18	p - n 结隔离双极电路、埋层、梁式引 线技术	6.1, 6.2
19	钻透氧化隔离、V形沟道隔离	6.3, 6.4
20	介质隔离、倒扣、集电极扩散隔离、 复合掩蔽	6.5~6.8
21	补偿型双极集成电路、厚氧化层MOS	6.9~6.13

	电路、自对准金属栅, 复合介质栅结构, 离子注入的应用	
22	自对准多晶硅栅, CMOS	6.14, 6.15
23	DMOS, VMOS, SOS, 注入逻辑	6.16~6.18
24	工艺流程中的检测	11.1~11.6
25~28	掩模对准容差、设计间隔、最小面积晶体管、无源元件	7.3~7.5, 4.5, 4.8, 4.9
29, 30	半导体集成电路的版图	7.6
31	版图的计算机辅助设计	7.7
32~35	薄膜电路	8.3~8.8
36~38	厚膜电路	9.1~9.10
39	组装	10.1~10.7
40~42	运算放大器特性参数、双极差分放大器	12.1, 12.3
43~45	场效应晶体管差分放大器、频率响应、电流源、共模抑制比的改善	12.4~12.7
46~48	单端放大器、电平漂移、电流镜、超增益级	12.8~12.11
49~51	输出级、电压参考、运算放大器一直流条件	12.12~12.14
52~54	运算放大器的小信号频率响应和大信号响应	12.5, 12.6
55	运算放大器的宏观模型	12.17
56, 57	逻辑电路的特性、埃伯尔斯—莫尔和冈姆尔—普尼(Gummel-Poon)的晶体管模型	14.1, 2.10, 2.11
58, 59	发射极耦合逻辑	14.2
60~65	晶体管—晶体管逻辑	14.4
66, 67	注入逻辑	14.5

68~72	MOS逻辑电路	3.5, 4.6
73	发射极功能逻辑和阈逻辑	14.7, 14.8
74	触发器	15.2
75~77	中规模集成电路, 存贮器, 可调程序 逻辑列阵, 微处理机	15.4~15.7

上述教学大纲中没有包括第2章和第3章, 但若认为有必要增加基础知识, 也可列入。

由于本书课题较广, 论述又有一定的深度, 故可作为一本实用的参考教材。

A. B. 格拉塞尔

G. E. 苏巴克—夏普

1977年8月

第1章 绪 言

自从贝尔实验室 (Bell Laboratories) 的巴丁 (Bardeen)、布拉顿 (Brattain)、和肖克莱 (Shockley) 于1947年发明双极型晶体管, 至今差不多经历了三十个年头。而自从第一个能工作的金属—氧化物—半导体场效应晶体管问世以来, 还不到二十年。本书所叙述的中心内容, 即硅集成电路, 是德克萨斯公司 (Texas Instruments) 的杰克·基尔比 (Jack Kilby) 于1958年所发明的。三十年前, 平均每个家庭大概拥有五个有源器件, 就是一台超外差收音机中的五个电子管。而今天, 平均每个家庭在收音机和电视机、立体声电唱机和磁带录音机, 也许还有计算器或电子表中, 已拥有几百个晶体管。经历了大约一代沧桑, 这些器件已使我们的生活起了根本性的变化。再过几年, 平均每个家庭将拥有几千个器件。而很可能到本世纪末, 每个家庭将拥有几百万个晶体管。

半导体工业直至本世纪50年代初期才兴起, 而现在则已经是年产五十亿美元的工业了。集成电路于1962年首次出现于市场, 而去年集成电路的销售额已达到二十五亿美元左右。

这种进展是许多人在不断前进的潮流中突破了很多技术难关和不断改进的结果。总的说来, 这些成果已经引起了较大地区的全球性革命, 它正在影响, 并将继续影响到每个角落人们的生活。

本书广泛地探讨了器件制作过程和工艺、器件特性、数字和模拟集成电路设计以及集成电路在整机中的应用等。在开始上述探讨之前, 回顾一下我们当初的境遇和这个工业是如何脱颖而出的, 并预测我们今后应往何处去, 这是很有意义的, 也许还是颇有趣味的。

1.1 集成电路一梗概

一个集成电路是将一组不可分割而彼此连接的电路元件按一定的位置制作在一块衬底的表面及其内部。通常用硅作衬底，所以又称之为硅集成电路，或简称为SIC。双极型集成电路是由那些具有电子和空穴特性的器件所组成。而组成单极硅集成电路的每个器件则只依赖于一种载流子。但是，在电路同时采用单极和双极晶体管的情况下，这种界限就变得不那么明显了。硅集成电路是采用所谓的平面工艺而制成的。其过程是首先在硅晶片表面生长一层二氧化硅，然后采用光刻技术在二氧化硅上刻出图形，以便有选择地在某些区域往硅材料内掺入杂质，这样就可以改变其电学特性。原则上，连续三次这样的引进杂质即足以形成相互隔离的双极型晶体管。MOS（金属—氧化物—半导体）晶体管则是自隔离的，只需要引进一种杂质。这两种类型电路的元件之间的互连，都是首先在硅片表面的二氧化硅绝缘层上淀积一层金属膜，然后将金属薄膜按一定要求腐蚀成连结各个电路元件的连线网路。

制作硅集成电路的“标准”工艺流程必须是能够制作其所有的元件，同时又能把它们连接起来。就是说，必须是能够选取总的工艺流程中的某些部分流程来作出电路中的每个元件。否则就需要重新设计一个能采用此工艺流程的新电路结构，或者得改变工艺流程，以便能作出原电路中所需要的各种元件。至于这后一种方法，通常只有当所附加的元件在很多应用中显示出有优点，或者可以证实若要满足电路性能，这些附加元件是非要不可时才会采用。

一个大的硅集成电路的典型边长为4到6毫米，而硅晶片的直径通常是7.6厘米（3英寸）。因此一个工艺过程所用的图形可在同一晶片上重复多次。含有一个电路的硅片称为芯片。工艺流程的特点是能够很方便地将批量为10至25个晶片同时流转。因此这里所谈论的是批量制作技术，即可以同时制作几百个或几千个电路。能够