



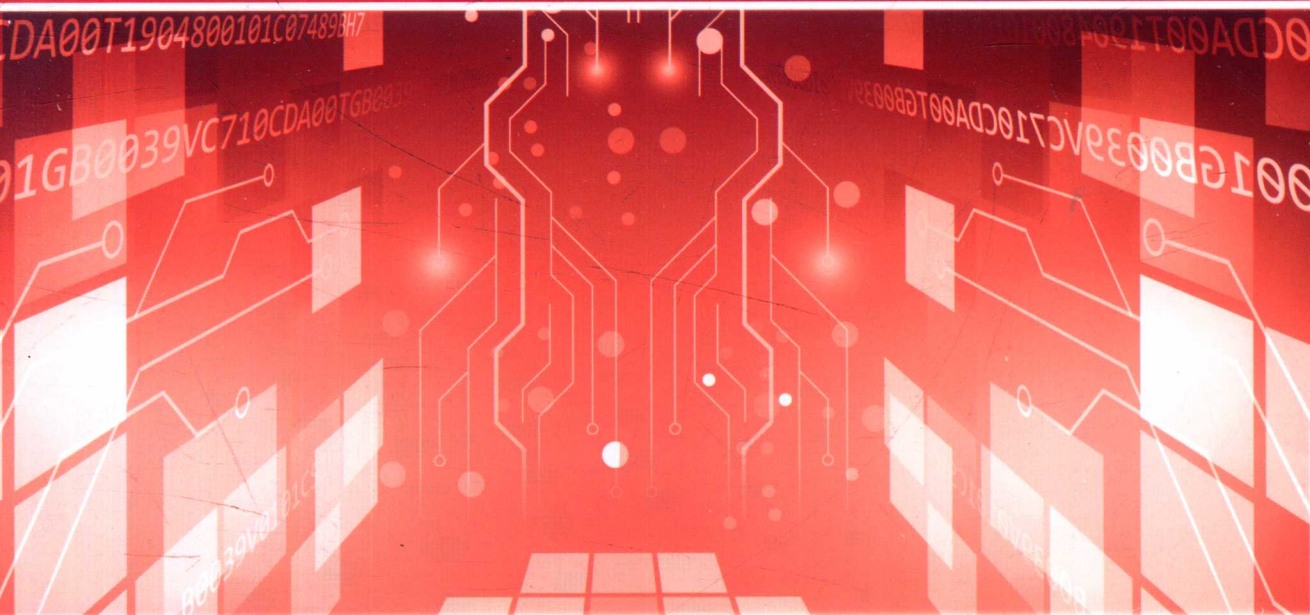
高等院校电工电子技术规划教材

普通高等院校“十三五”规划教材



THE PRINCIPLES AND DESIGN OF
ANALOG INTEGRATED CIRCUITS

模拟集成电路 原理及设计



王守国 编著

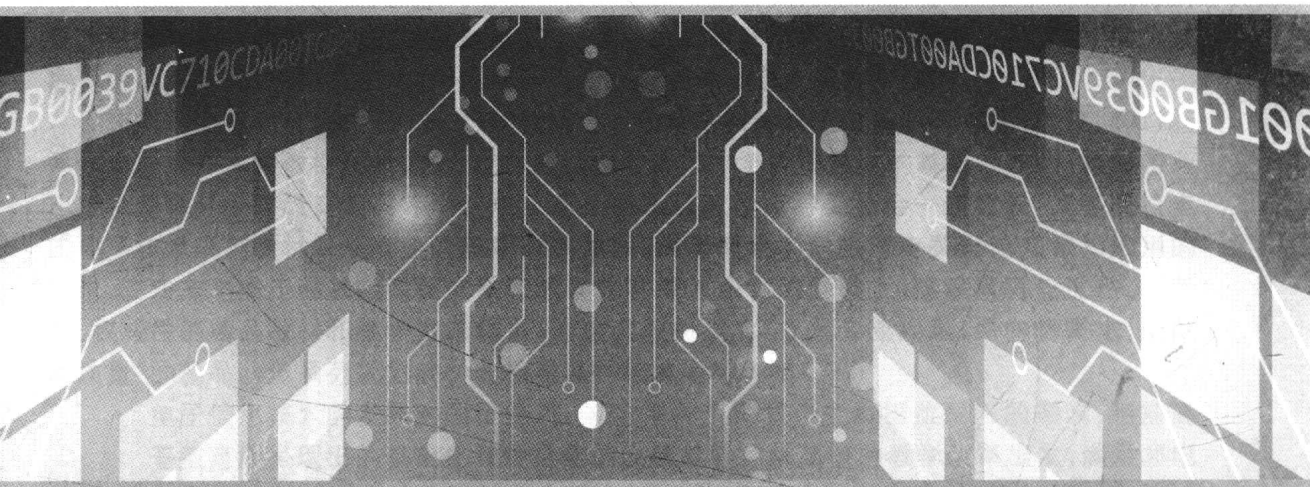


机械工业出版社
China Machine Press

高等院校电工电子技术规划教材

普通高等院校“十三五”规划教材

模拟集成电路 原理及设计



王守国 编著



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟集成电路原理及设计 / 王守国编著. —北京: 机械工业出版社, 2017.1
(高等院校电工电子技术规划教材)

ISBN 978-7-111-55802-6

I. 模… II. 王… III. ①模拟集成电路—理论—高等学校—教材 ②模拟集成电路—电路设计—高等学校—教材 IV. TN431.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 325746 号

全书共有 9 章内容。主要内容包括: 模拟集成电路中的无源元件、结型栅场效应晶体管、MOSFET、CCD、模拟集成电路器件的参数提取、CMOS 放大器、集成运算放大器、集成功率放大器和半导体制造技术。本书可以作为电子科学与技术、微电子、集成电路工程等专业本科生的模拟集成电路设计课程的教材, 也可以作为电子科学与技术专业研究生的教材。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 王颖 谢晓芳

责任校对: 董纪丽

印刷: 北京市荣盛彩色印刷有限公司

版次: 2017 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm×260mm 1/16

印张: 19.25

书号: ISBN 978-7-111-55802-6

定价: 45.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东

出版说明

随着科学技术迅猛发展,电子计算机和大规模集成电路广泛应用影响着相关行业的发展,信息化正在改造传统行业。工科院校的学生除了要熟练掌握本专业的知识外,还应具有跨学科合作及综合解决实际问题的能力,具有集成最新技术和全面驾驭现代企业的能力。电子信息技术的发展对国民经济、国防等各个领域产生着日益深入的影响,当前高等教育所呈现出的基础化和综合化的发展趋势,工程教育认证对非电类专业学生提出了要求:学生掌握电学的基本理论、知识技能,为后续各门专业基础课和专业课打下基础。

为贯彻落实教育部关于“十二五”普通高等教育本科教材建设的若干意见(教高[2011]5号),全面提升本科教材质量,充分发挥教材在提高人才培养质量中的基础性作用,机械工业出版社华章分社与教育部高等学校电工电子基础课教学指导委员会一起建设“高等院校电工电子技术规划教材”,从高校的教学改革出发,满足非电类学生对电类理论知识和应用的需求,在对非电类工程基础课程体系和教学内容深入研讨的基础上,建设具有先进性、创新性、权威性的精品教材和教学资源体系,使这套教材成为“立足专业规范,面向新需求,成就高质量”的精品。该系列规划教材的指导思想和编写特色如下:

- 电子信息技术的发展对国民经济、国防等各个领域产生着日益深入的影响,当前高等教育所呈现出的基础化和综合化的发展趋势。从高校的教学改革出发,满足非电类学生对电类理论知识和应用的需求,注重培养学生工程素质,注重知识的实用性和先进性的编写原则;反映国内最先进的教学成果;要求基础理论与工程实例、实践教学紧密结合。
- 本着体现现代电子科学技术的发展,依据不同专业的教学与就业需求、学时需求及实践环节的需求,既体现电类技术基础课程的特点,注重概念原理的物理实现,又与学科的最新发展动向和先进应用技术结合,力求适于教师教学、便于学生学习,体现现代化教学手段。

为做好该系列规划教材的编写出版工作,在教育部高等学校电工电子基础课教指委指导下,成立了“高等院校电工电子技术规划教材编审委员会”,力图从根本上保证教材的质量。我们将在今后的出版工作中广泛征询和听取一线教师的反馈意见和建议,逐步改进和完善该系列规划教材,积极推动高等院校教学改革和教材建设。

机械工业出版社华章分社

编审委员会

主任委员:王志功(东南大学)

副主任委员:

吴建强(哈尔滨工业大学)

陈后金(北京交通大学)

王 萍(天津大学)

张晓林(北京航空航天大学)

田作华(上海交通大学)

史国栋(常州大学)

邓建国(西安交通大学)

曾孝平(重庆大学)

孟 桥(东南大学)

戴先中(东南大学)

委 员(按姓氏笔画排序)

王成华(南京航空航天大学)

王黎明(中北大学)

冯文全(北京航空航天大学)

田慕琴(太原理工大学)

史仪凯(西北工业大学)

刘 晔(西安交通大学)

朱如鹏(南京航空航天大学)

李 辉(西北工业大学)

姚纓英(浙江大学)

姚福安(山东大学)

贾民平(东南大学)

殷瑞祥(华南理工大学)

谢明元(成都信息工程学院)

潘 岚(中国计量学院)

颜秋蓉(华中科技大学)

黎福海(湖南大学)

梅雪松(西安交通大学)

王 颖(机械工业出版社华章分社)

前 言

集成电路的制备已经进入纳米时代，随着集成电路技术的发展，器件问题、电路问题和整机系统问题已经结合在一起，使整机、电路与元器件之间的明确认知界限被突破，集成电路的设计越来越体现出在一块芯片上对整个系统的集成架构，这就形成了固体物理、器件工艺与电子学三者紧密联系和交叉的学科发展方向。

相较于数字集成电路，模拟电路的设计具有时间长、与元器件关系紧密、辅助工具不足和依靠长期工作经验积累等特点。模拟集成电路的初级设计者往往把大量时间用在无实际依托的仿真上，而认为仿真的结果是可靠的，并以此进行设计。实际上，模拟集成电路的功能实现与元器件参数、工作特性、寄生效应、版图布局、电路分析等有密切关系，仿真和模拟与实际测试情况有巨大差异。

模拟集成电路的设计是一个从参数设计、电路仿真到版图设计、制程设计等多次循环的过程。设计者首先要对使用的器件性能、在芯片上组成电路后的特性有充分的了解，学会使用辅助工具，并熟悉版图设计对电路的影响、半导体制造工艺对电路设计的限制等因素。其次，设计者需要熟悉从元器件设计开始到模拟集成电路流片结束的各个环节，清楚了解设计的全过程，这样模拟集成电路的设计者才能事半功倍、得心应手，提高工作效率和设计的成功率。

模拟集成电路设计涉及的内容包括材料制备、器件物理、电路设计、工艺技术、测试以及封装、组装等一系列技术。

全书共有 9 章内容。

第 1 章讲述模拟集成电路中的无源元件，综述在芯片上无源元件的所有可能实现方式及其特点。

第 2 章讲述结型栅场效应晶体管，包括 JFET 和 MESFET，分析器件工作原理和应用特性，这也是第 8 章相关内容的基础。

第 3 章讲述 MOSFET，讨论其工作原理和应用特性，这是后续章节的基础，提供模拟集成电路设计中器件的模型。

第 4 章讲述 CCD，CCD 是目前应用较广的一种模拟集成电路器件。

第 5 章分析模拟集成电路器件参数的提取，这是集成电路设计者进行实际设计工作的依据。

第 6 章讨论 CMOS 放大器，它是模拟集成电路的基本组成模块，详细介绍从器件特性出发如何分析电路的功能。

第 7 章讲述集成运算放大器，分析其组成模块和基本工作原理，详细讨论电路设计、版图设计、封装设计和测试等完整过程。

第 8 章讲述集成功率放大器，分析不同的工作类型和特点，同时讨论一个完整的设计

和实现过程。

第9章讲述半导体制造技术，从设计者的角度，给出在设计中必须考虑的制程、工序特点和参数设计等内容。

本书编写时，力争做到内容自成体系且前后响应，使学习者不再借助其他书籍就能看懂、学会。为了便于学习，在内容上加入一些例题的讨论，并加入实际工作过程的考虑和论述。鉴于这一领域的飞速发展，本书还加入了对新材料、新器件和新技术的论述。

本书主要为学习模拟集成电路设计的学生编撰，学生从中可学习到器件理论、电路设计、版图设计和工艺制程等内容，提高设计能力；电子信息类专业的电路设计和集成电路的使用者也可学习本书，以提高芯片级分析能力。本书可以作为电子科学与技术、微电子、集成电路工程等专业本科生的相关教材，也可以作为电子科学与技术专业研究生的教材。

对于高等院校的本科学生，参考课时可以是40~60学时。

由于水平有限，书中难免有错误，欢迎读者批评指正。

编者

教学建议

本书适用于电子科学与技术专业、微电子专业和集成电路工程专业的“模拟集成电路设计”或“集成电路设计”等相关课程，全书讲述了无源元件理论与制备、结型场效应晶体管、MOSFET 和 CCD 的原理和应用、模拟集成电路器件参数的提取、单级 CMOS 放大器原理、集成运算放大器和集成功率放大器的原理和设计，最后讲述半导体制造技术。与本书有关课程的教学目的、教学目标以及教学建议等分述如下。

一、教学目的

(1) 了解模拟集成电路的工艺特点、CMOS 工艺的优势；掌握无源元件(包括电阻、电容、电感)的种类及其优缺点；了解片上电感的制备方法和特性。

(2) 熟悉 JFET、MESFET 和 MOSFET 的基本工作原理、应用特性(包括频率特性、功率特性、噪声特性和温度特性)；学习高场迁移率、静电偶极层、雪崩注入理论和短沟道效应；了解新型单极型器件的种类、原理和发展趋势。

(3) 学习 CCD 的工作原理和应用；熟悉 TLM 测试结构设计、MESFET 和 MOSFET 参数的提取方法；掌握 MOS 结构肖特基接触的分析方法。

(4) 熟悉共源级放大器(包括电阻负载、二极管负载、电流源负载)的工作原理；重点掌握互补推挽放大器的工作原理和特性；熟悉共源共栅级放大器的特性；掌握差分放大器的基本特性、分析方法。

(5) 熟悉集成运算放大器和集成功率放大器的工作原理、种类、参数等概念；熟悉集成运算放大器的基本模块设计；熟悉集成功率放大器的设计方法；了解集成运算放大器和集成功率放大器的实现过程，包括版图设计、制程设计和测试过程；学习半导体制造工艺的流程和参数设计方法。

二、教学目标

模拟集成电路的设计是一个从参数设计、电路仿真到版图设计、制程设计等多次循环的过程。设计者首先要对使用的器件性能、在芯片上组成电路后的特性有充分的了解，学会使用辅助工具，并熟悉版图设计对电路的影响、半导体制造工艺对电路设计的限制等因素。其次设计者需要熟悉从器件设计开始到模拟集成电路流片结束的各个环节，清楚设计的全过程，这样，模拟集成电路的设计者才能事半功倍、得心应手，提高工作效率和设计的成功率。

总之，教学要强调理论性、实际性和技术性，希望学生通过课程的学习，熟悉模拟集成电路设计的基本分析方法，掌握整个模拟集成电路实现的全过程，提高实际的操作技能和解决实际问题的能力。

三、学时安排

教学内容	教学要点	课时安排	
		多学时	少学时
第 1 章 模拟集成电路中的无源元件	<ul style="list-style-type: none"> • 模拟集成电路的工艺基础 • 模拟集成电路中的电阻 • 模拟集成电路中的电容 • 模拟集成电路中的电感 	2	2
第 2 章 结型栅场效应晶体管	<ul style="list-style-type: none"> • JFET 的基本原理 • JFET 的伏安特性 • JFET 的直流和交流参数 • MESFET 特性 • 场相关迁移率特性 • 结型栅场效应管的频率特性 • 器件的噪声特性 • JFET 和 MESFET 的结构举例 	8	8
第 3 章 MOSFET	<ul style="list-style-type: none"> • MOSFET 的结构和类型 • MOSFET 的阈值电压 • MOSFET 的伏安特性 • MOSFET 的交流小信号特性 • MOSFET 的交流小信号等效电路和频率特性 • MOSFET 的噪声特性 • MOSFET 的击穿特性 • MOSFET 的功率特性和功率 MOS 器件的结构 • MOSFET 的温度特性 • 短沟道效应 • 场效应晶体管的设计 	8	6
第 4 章 CCD	<ul style="list-style-type: none"> • CCD 的工作原理 • CCD 的基本参数 • 成像原理 • CCD 的改进方式 • CCD 在模拟电路中的应用 	5	3
第 5 章 模拟集成电路器件参数的提取	<ul style="list-style-type: none"> • 欧姆接触的有关参数 • MOSFET 的有关参数提取 • MESFET 的有关参数提取 	7	5
第 6 章 CMOS 放大器	<ul style="list-style-type: none"> • 模拟电路中的 MOS 器件模型 • 共源级放大器 • 共源共栅级 • 差分放大器 	6	4
第 7 章 集成运算放大器	<ul style="list-style-type: none"> • 集成运算放大器的构建 • 集成运算放大器基本模块分析 • 集成运算放大器的设计 • 集成 CMOS 运算放大器版图设计 • 集成 CMOS 运算放大器的实现 	10	5
第 8 章 集成功率放大器	<ul style="list-style-type: none"> • 功率放大器的特性和典型电路 • 集成功率放大器实现的制约分析与设计 • 全集成 CMOS 功率放大器的实现 • 功率放大器的尽限问题 • 功率放大器研制的新进展 	10	5
第 9 章 半导体制造技术	<ul style="list-style-type: none"> • 半导体工艺的发展及 CMOS 工艺流程 • 半导体工艺主要工序 	4	2
教学总学时建议		60	40

四、说明

(1)本教材为电子科学与技术专业、微电子专业和集成电路工程专业相关课程的教材,授课学时数为40~60学时,不同专业方向可根据不同的教学要求和计划教学学时酌情对教材内容进行适当取舍。例如,对于电子科学与技术专业本科学生,教材中的主要内容基本上可全讲,如果是40学时,部分内容可课外自学(如第4、9章);对于微电子专业本科学生,如果学习过半导体器件,可减少第2、3章的课时;对于相关专业专科、研究生类学生,可以按需要选择应用方面的章节学习。

(2)集成电路技术的发展很快,半导体制造水平日新月异,教学中要紧密切合半导体工艺的发展水平、计算机模拟水平,让没有工作经验的学生更准确地掌握设计方法,增强实际动手能力。

(3)建议教师为本校的“专业实验室”引入设计软件,加强学生模拟设计练习。

目 录

前言	
教学建议	
第 1 章 模拟集成电路中的无源元件	1
1.1 模拟集成电路的工艺基础	1
1.2 模拟集成电路中的电阻	8
1.3 模拟集成电路中的电容	16
1.4 模拟集成电路中的电感	24
习题	35
第 2 章 结型栅场效应晶体管	36
2.1 JFET 的基本原理	36
2.2 JFET 的伏安特性	40
2.3 JFET 的直流和交流参数	43
2.4 MESFET 的特性	46
2.5 场相关迁移率特性	48
2.6 结型栅场效应管的 频率特性	53
2.7 器件的噪声特性	58
2.8 JFET 和 MESFET 的 结构举例	61
习题	66
第 3 章 MOSFET	67
3.1 MOSFET 的结构和类型	68
3.2 MOSFET 的阈值电压	72
3.3 MOSFET 的伏安特性	80
3.4 MOSFET 的交流小信号 特性	87
3.5 MOSFET 的交流小信号 等效电路和频率特性	96
3.6 MOSFET 的噪声特性	101
3.7 MOSFET 的击穿特性	104
3.8 MOSFET 的功率特性和 功率 MOS 器件的结构	111
3.9 MOSFET 的温度特性	117
3.10 短沟道效应	120
3.11 场效应晶体管的设计	129
习题	134
第 4 章 CCD	136
4.1 CCD 的工作原理	136
4.2 CCD 的基本参数	144
4.3 成像原理	148
4.4 CCD 的改进方式	150
4.5 CCD 在模拟电路中的应用	151
习题	153
第 5 章 模拟集成电路器件参数 的提取	154
5.1 欧姆接触的有关参数	154
5.2 MOSFET 的有关参数提取	159
5.3 MESFET 的有关参数 提取	168
习题	175
第 6 章 CMOS 放大器	176
6.1 模拟电路中的 MOS 器件 模型	177
6.2 共源级放大器	182
6.3 共源共栅级	198
6.4 差分放大器	204
习题	211
第 7 章 集成运算放大器	212
7.1 集成运算放大器的构建	212

7.2	集成运算放大器基本模块 分析	217	8.3	全集成 CMOS 功率放大器的 实现	255
7.3	集成运算放大器的设计	223	8.4	功率放大器的尽限问题	261
7.4	集成 CMOS 运算放大器 版图设计	227	8.5	功率放大器研制的 新进展	265
7.5	集成 CMOS 运算放大器 的实现	232	习题	268	
习题	237	第 9 章 半导体制造技术	269		
第 8 章 集成功率放大器	238	9.1 半导体工艺的发展及 CMOS 工艺流程	269		
8.1 功率放大器的特性和 典型电路	238	9.2 半导体工艺主要工序	280		
8.2 集成功率放大器实现的 制约分析与设计	251	习题	291		
		附录 常用物理参数	292		
		参考文献	293		

模拟集成电路中的无源元件

集成电路(integrated circuit, IC)是 20 世纪人类的伟大发明之一,当代科技的高度发展得益于此。

如果把高频集成电路包含到模拟集成电路中,那么从功能的角度分类,集成电路可以简单地分为模拟集成电路和数字集成电路两大类。从器件类型的角度分类,半导体器件的制备工艺可以简单地分为双极(bipolar)工艺和互补金属-氧化物-半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)工艺两大类。当然,目前把两者的优点合并起来的工艺称为 Bi-CMOS 工艺。

一个性能卓越可靠性高的模拟集成电路,除了需要各种性能良好的有源器件外,同时还需要大量性能优良的电阻、电容、电感等无源元件。长期以来,由于版图、性能、成本等因素的制约,无源元件的制备较为落后,是设计者和使用者进行设计的难题之一。但是随着工艺技术的提高,及市场的需求,越来越多的无源元件如雨后春笋般应用到了模拟集成电路中。如今一个射频模拟集成电路不仅可以集成电阻和电容等无源元件,甚至把变压器都设计到了芯片当中。

本章首先简述模拟集成电路和数字集成电路的区别,然后给出三种半导体制备工艺技术,其中,以 CMOS 工艺技术为重点,并给出其主要的参数特性,最后以 CMOS 工艺技术为器件制备的主要方法,详细论述模拟集成电路的各种无源元件的基本结构、性能特点和工艺实现等问题,为模拟集成电路的设计者建立无源元件设计的思路。

1.1 模拟集成电路的工艺基础

虽然是最基本的知识,但是为了后文中方便论述元件的结构、制备工艺过程等问题,首先简述半导体工艺基础,以此给出各种半导体工艺技术的芯片结构、流片特点,尤其是 CMOS 工艺的特征参数。

1.1.1 模拟集成电路的特点

通俗地讲,广义的集成电路就是我们常说的芯片,它是将若干电子元器件制作在一块单晶硅片上,并用金属或多晶硅互连线将它们连接起来的具有一定功能的电路。这些半导体电子元器件包括:双极型晶体管、场效应管、二极管、电阻、电感、电容等。世界上第一块 IC 是由仙童半导体公司的 Robert Noyce 和德州仪器公司的 Jack Kilby 于 1959 年分别独自发明的。

集成电路按照不同的标准可以有很多分类方法。最常见的是,按照处理信号的连续性,集成电路可分为模拟集成电路和数字集成电路:模拟集成电路处理的是时间连续的模拟信号;数字集成电路处理的则是时间与幅度取值都离散的数字信号。

还有一种分类方法是按构成集成电路的有源器件的种类来划分的:(1)双极型(bipolar)集成电路,其中构成电路的有源器件只有双极型晶体管,通过双极型工艺在硅片上制备双极型晶体管,由空穴和电子两种载流子共同参与导电;(2)CMOS 集成电路,其

中构成电路的有源器件只有 MOS 管(场效应晶体管),通过 CMOS 工艺制备,只以空穴或电子中的一种作为载流子导电;(3)双极型-CMOS(Bi-CMOS)集成电路,电路中既有双极型晶体管,又有 MOS 管,通过 Bi-CMOS 工艺制备双极型晶体管和 MOS 电路混合构成的集成电路,一般前者作为输出级,后者作为输入级。

模拟 IC 处理的信号都具有连续性(即其幅值可以是任何模拟电信号的值),并将其转换为正弦波进行研究,如光、声音、速度、温度等自然模拟信号。按技术类型,模拟 IC 分为:线性 IC(只处理模拟信号)和混合 IC(可以同时处理模拟信号与数字信号)。按应用,模拟 IC 分为:标准型模拟 IC 和特殊应用型模拟 IC。标准型模拟 IC 包括:放大器(amplifier)、比较器(comparator)、稳压器(voltage regulator)、信号界面(interface)、数据转换器(data converter)等产品。特殊应用型模拟 IC 主要应用在 4 个领域(分别是通信、汽车、电脑外围设备和消费类电子)中,如收录机、音响专用集成电路、电视机集成电路、录放像机和摄像机集成电路等。

数字 IC 用来产生、放大和处理各种数字信号(即在时间上和幅度上离散取值的非连续性信号),如 VCD 和 DVD 的音频信号和视频信号,计算机里的二进制数、八进制数等数据。数字 IC 以开关状态进行运算,具有精度高、适合复杂的计算的特点。数字 IC 产品的种类很多种,其构成了各种逻辑电路,如门电路、编译码器、触发器、计数器、寄存器等,广泛地应用在各种电子电路当中,小至电子表,大至计算机。

模拟 IC 具有如下四大特点。

(1) 辅助工具少,测试周期长。

模拟 IC 工作在晶体管的功率放大区,信号的频率范围往往从直流一直可以延伸到高频段,除了应用于低电压电器的电路外,大多数模拟 IC 的电源电压较高,输出级模拟 IC 的电源电压甚至可达几十伏以上。所以要求模拟 IC 设计者既要有全面的基础理论知识,又要有长时间工作经验的积累。模拟 IC 设计者既要熟悉电子器件的电特性和物理特性,又要熟悉电子器件制造工艺与流程。目前由于国内专业设置的特点,通常电路设计和使用很少熟悉电子器件底层的知识。而在工作经验方面,模拟 IC 设计师需要至少 3 年至 5 年的历练,优秀的模拟 IC 设计师需要 10 年甚至更长时间的设计经验。

模拟 IC 设计的辅助工具比数字 IC 的少,其可以借助的 EDA(电子设计自动化)工具远不如数字 IC 设计的多。由于模拟 IC 既要在功耗、速度等方面综合考虑,又要保持高度稳定性,因此模拟 IC 的设计认证周期长,测试周期也很长,并且过程复杂。

当模拟 IC 产品需要采用特殊工艺和封装,必须与工厂联合开发工艺,如 BCD (Bipolar-CMOS-DMOS)工艺和 30V 高压工艺,必须联合拥有此项技术的封装厂来生产。

(2) 与器件关系紧密。

模拟 IC 在整个线性工作区内需要具备良好的电流放大特性、小电流特性、频率特性等性能,所以在设计中因技术特性的需要,常常要考虑器件布局的结构对称性和器件参数的相互匹配性。模拟 IC 还要具备低噪声和低失真性能,由于电阻、电容、电感都会产生噪声或失真,因此设计者必须考虑到这些元件的影响。而数字 IC 设计者完全不用考虑噪声和失真这些因素的影响,因为其对电路性能的影响微小。

模拟 IC 中使用的元器件种类繁多,除了数字 IC 中大量采用的 NPN 晶体管及电阻外,还采用 PNP 晶体管、场效应晶体管、高精度电阻等。由于工艺技术的限制,模拟 IC 设计时应尽量控制无源元器件的使用,如电阻和电容,特别是高阻值电阻和大容量电容,只有这样才能提高集成度和降低成本。某些射频 IC 在印制电路板中的布局也必须考虑在内,而这些是数字 IC 设计所不用考虑的。因此模拟 IC 的设计者必须熟悉所有的电子元器件。

(3) 生命周期可长达 10 年。

模拟 IC 强调的是高信噪比、低失真度、低功耗、高可靠性和稳定性。产品一旦达到

设计目标就具备长久的生命力,生命周期长达10年以上的模拟IC产品也不在少数。如音频运算放大器NE5532,自20世纪70年代末推出直到现在还是最常用的音频放大模拟IC之一,几乎50%的多媒体音箱都采用了NE5532,其生命周期超过35年。因为生命周期长,所以模拟IC的价格通常偏低。

数字IC强调的是运算速度与成本的比值,数字IC设计的目标是在尽量低的成本下达到目标运算速度。设计者必须不断采用更高效率的算法来处理数字信号,或者利用新工艺提高集成度降低成本。因此数字IC的生命周期很短,大约为1年到2年。

(4) 制备工艺多样性及新工艺新材料的蓬勃发展。

模拟IC具有内繁外简的电路特点,可以充分发挥IC的工艺技术和便于应用的特点,目前模拟IC的制备工艺从CMOS工艺、双极工艺到Bi-CMOS工艺发展迅速,并且各具特色。

最初,模拟IC使用双极工艺,但是双极工艺功耗大,因此模拟IC尝试采用数字IC已经使用的CMOS工艺。然而,模拟IC通常要输出高电压或者大电流来驱动其他元器件,而CMOS工艺的驱动能力很差,不考虑这些因素的数字IC可以迅速使用最新的CMOS工艺,而模拟IC需要技术的进一步完善和成熟后使用,所以数字IC较早采用最新CMOS工艺,而模拟IC总是晚两年时间。此外,模拟IC最关键的是低失真度和高信噪比,这两者在高电压下都是比较容易做到的,而CMOS工艺主要用在低电压环境,并且持续朝低电压方向发展,所以这些课题总是CMOS模拟IC的研究热点。

然后出现了Bi-CMOS工艺,它结合了双极工艺和CMOS工艺两者的优点。另外还有CD工艺,即将CMOS工艺和DMOS(双重扩散MOS)工艺结合在一起的工艺。而BCD工艺则结合了双极工艺、CMOS工艺、DMOS工艺三者的优点。而数字IC设计者基本上不用考虑工艺问题。在高频领域还有SiGe和GaAs工艺,这些特殊工艺需要芯片工厂的配合,同时也需要设计者加以熟悉。

1.1.2 模拟CMOS工艺

1. 发展简况

半导体概念虽然早在20世纪30年代初期就已经提了出来。但是因为当时对半导体表面的认识不足和对实际工艺控制不良,所以真正的场效应器件一直未能付诸实现。一直到了20世纪60年代,随着平面型晶体管的发展,以及人们对于半导体表面性质认识的深化,特别是具有优良性能的热生长二氧化硅薄膜的成功生长,才促使绝缘栅MOS场效应晶体管和MOS集成电路的问世。互补金属-氧化物-半导体集成电路是IC中于20世纪60年代后期才发展起来的后起之秀。

CMOS集成电路首先由万勒斯(F. M. Wanlass)和萨(C. T. Sah)在1963年的一个国际固体电路会议上提出,文章的标题为“使用场效应金属-氧化物-半导体晶体管的毫微瓦逻辑”。这表明采用硅平面工艺制成的一对增强的P沟道和N沟道CMOS场效应晶体管可以组成一个基本反相器。上方为一个N沟道MOS场效应晶体管,下方为一个P沟道场效应晶体管。最后以这种反相器组成的三级环形振荡器测量了电路的延迟时间。这样的逻辑电路具有极低的静态功耗、高的输入阻抗和较快的工作速度。同时它还用互补电路形式组成其他逻辑电路(如“或非”门、置位复位触发器)的可能性。他们的工作为CMOS集成电路奠定了基础。但是因为要在同一硅片上制作两种沟道的MOS场效应晶体管,并且都要保证增强型工作状态,其工艺难度比单沟道电路的大得多。所以直到20世纪60年代末期才由美国无线电公司生产出CMOS集成电路。

CMOS集成电路由于性能优异,立刻备受关注,发展极为迅速。美国、日本等国家的主要半导体厂家竞相生产。电路产量成倍增长,电路品种日新月异,电路规模逐步加

大。例如 1973 年在美国半导体通用逻辑电路的生产中, CMOS 电路仅占第四位, 次于 TTL(transistor-transistor logic, 晶体管-晶体管逻辑)电路, ECL(emitter coupled logic, 发射极耦合逻辑)电路, 以及 DTL(diode transistor logic, 二极管晶体管逻辑)电路。但是自 1975 年以来, 它就大大地超过了 ECL 电路和 DTL 电路而跃居第二位。它不但取代了速度慢、功耗大的 PMOS 电路, 而且压倒了除去 TTL 电路以外的一切双极型电路。

CMOS 电路的发展如此迅速是与它本身具有的优良性能分不开的。由 CMOS 电路与其他类型逻辑电路的比较可以看出, CMOS 电路的静态功耗极低, 动态功耗正比于工作频率。其逻辑摆幅大, 抗干扰能力很强, 特别适宜在噪声环境等恶劣条件下工作。它的工作速度也较快, 一般工艺的 CMOS 电路比单沟道的 MOS 电路要快, 而 SOS(半导体-氧化物-半导体)工艺的 CMOS 电路可以与双极型的 TTL 电路媲美, 但功耗要低几个数量级。此外, CMOS 电路的工作电压范围很宽, 只需要单一电源工作, 对电源的稳定度要求不高, 方便与其他类型电路的连接。

但是因为 CMOS 电路隔离工艺采用的隔离环占用面积较大, 从而影响集成度的提高, 所以改进 CMOS 电路的隔离工艺以提高集成度, 是它的一个主要问题。由于 CMOS 电路的工艺难度较高, 成本较贵, 故初期发展的 CMOS 电路大多仅应用于功耗的特殊领域中, 如一般电子仪器和电子手表等。但是随着工艺水平的不断提高, CMOS 电路的成本在逐步下降。目前, 对于功能和集成度与 TTL 电路相当的 CMOS 电路, 其成本已接近或略低于 TTL 电路, 这为 CMOS 电路的广泛应用开辟了极好的前景。

2. 工艺结构

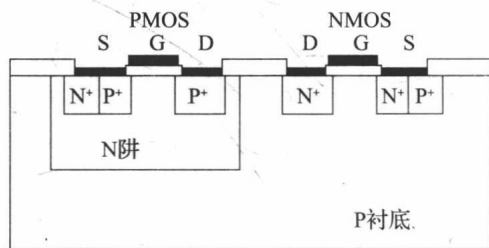
根据阱的导电类型, CMOS 工艺可以分为 P 阱 CMOS 工艺、N 阱 CMOS 工艺和双阱 CMOS 工艺, 分别如图 1.1 所示。P 阱 CMOS 管(P 阱上制备 NMOS 管)与 NMOS 器件有良好的兼容性。N 阱 CMOS 管(N 阱上制备 PMOS 管)与 PMOS 器件有良好的兼容性。双阱工艺是在衬底上制备 P 阱和 N 阱, 在 P 阱上制备 NMOS 管和 N 阱上制备 PMOS 管, 这样可以独立调节两种沟道 MOS 器件的参数, 使 CMOS 电路达到最优的特性。

典型的 P 阱硅栅 CMOS 工艺需要 50 多道工序和 10 次光刻。

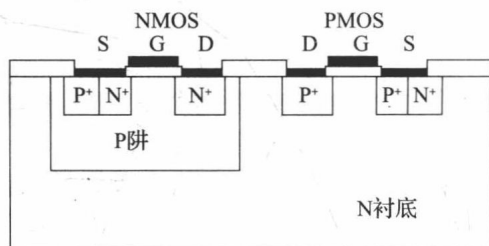
CMOS 电路中为了使阱与衬底之间的 PN 结处于反偏状态, 起到隔离作用, 需要将 P 阱连接到电路中电压最低处, 而 N 型衬底连接到电压最高处, 从而实现 PMOS 器件和 NMOS 器件之间的相互隔离。另外, 因阱和衬底掺杂浓度较低, 故在阱、衬底区域有一小部分要进行重掺杂, 其作用是便于以后与金属电极间形成良好的欧姆接触。

例题: 解释为什么目前 CMOS 工艺中常采用多晶硅栅工艺, 而不采用铝栅工艺?

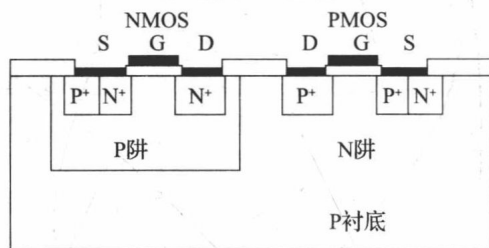
答: 目前 CMOS 工艺中常采用多晶硅栅工艺, 而不采用铝栅工艺的原因是: ①这可采用自对准方式, 从而减小了晶体管的尺寸和栅电极与源、漏电极间的交叠电容, 提高器件的集成度与工作速度。②多晶硅可以高温氧化, 对多层布线



a) N阱CMOS工艺



b) P阱CMOS工艺



c) 双阱CMOS工艺

图 1.1 CMOS 工艺结构

非常有利。③阈值电压低(取决于硅与二氧化硅的功函数差)。④有利于采用等比例缩小法则。⑤耐击穿时间长。

例题:为什么栅介质层的厚度减少有一个大致的极限?为什么现在需要高 ϵ 值(介电常数)的栅介质?低 ϵ 介质用在什么地方?为什么?

答:随着特征尺寸的缩小,栅氧化层越来越薄,栅极隧穿漏电流指数性增加,从而导致功耗增加。高 ϵ 介质替代栅氧化层,可提高栅氧厚度,抑制栅极隧穿漏电流。低 ϵ 材料作为层间介质,因为低 ϵ 介质能减小电容,从而可减小RC信号延迟,提高器件工作频率。

3. 模拟 CMOS 工艺典型参数

目前,CMOS 工艺包括了单晶或双阱、多层多晶硅(polycrystalline silicon, polysilicon)、多层金属等基本结构的多工序工艺流程,如图 1.2 所示。其工艺参数如表 1.1 所示。

表 1.1 一种 0.35 μm CMOS 工艺的制备参数

结构类型	符号	最小值	典型值	最大值	单位
N 阱方块电阻	RNWELL	0.9	1.0	1.1	$\text{k}\Omega/\square$
N 阱电阻温度系数	TCNWELL	—	6.2	—	$\times 10^{-3}/\text{K}$
多晶硅方块电阻	RPOLY	—	8	11	Ω/\square
高阻值多晶硅方块电阻	RPOLYH	1.0	1.2	1.4	$\text{k}\Omega/\square$
多晶硅(NMOS)方块电阻	RGATEN	—	7	—	Ω/\square
多晶硅(PMOS)方块电阻	RGATEP	—	11	—	Ω/\square
N 扩散区方块电阻	RDIFEN	65	75	85	Ω/\square
P 扩散区方块电阻	RDIFFP	115	140	165	Ω/\square
多晶硅电阻温度系数	TCPOLY	—	0.9	—	$10^{-3}/\text{K}$
两层多晶硅面电容密度	CPOX	0.78	0.86	0.96	$\text{fF}/\mu\text{m}^2$
多晶硅电容温度系数	TCPOX	—	0.03	—	$10^{-3}/\text{K}$
多晶硅-扩散层面电容密度	CGOX	4.26	4.54	4.86	$\text{fF}/\mu\text{m}^2$
门-N 扩散区交叠线电容密度	CGSDON	0.105	0.120	0.134	$\text{fF}/\mu\text{m}$
门-P 扩散区交叠线电容密度	CGSDOP	0.075	0.086	0.096	$\text{fF}/\mu\text{m}$
多晶硅-阱(场氧)面电容密度	CPFOX	0.108	0.119	0.133	$\text{fF}/\mu\text{m}^2$
金属层 1-阱面电容密度	CMDIFF	0.020	0.023	0.025	$\text{fF}/\mu\text{m}^2$
金属层 1-多晶硅面电容密度	CMPDIFF	0.025	0.027	0.031	$\text{fF}/\mu\text{m}^2$
金属层 2-多晶硅面电容密度	CM2P	0.012	0.016	0.023	$\text{fF}/\mu\text{m}^2$
金属层 2-金属层 1 面电容密度	CM2M	0.026	0.036	0.059	$\text{fF}/\mu\text{m}^2$
金属层 3-金属层 2 面电容密度	CM3M2	0.026	0.036	0.059	$\text{fF}/\mu\text{m}^2$
金属层 4-金属层 3 面电容密度	CM4M3	0.026	0.036	0.059	$\text{fF}/\mu\text{m}^2$
金属层 1-金属层 1 耦合线电容密度	CM1M1	—	0.087	—	$\text{fF}/\mu\text{m}$
金属层 2-金属层 2 耦合线电容密度	CM2M2	—	0.084	—	$\text{fF}/\mu\text{m}$

1.1.3 其他模拟集成电路工艺

1. 双极工艺

以上介绍了制备 CMOS IC(集成电路)需要的 CMOS 工艺,实际上双极型 IC 工艺是所有 IC 工艺中最早发明的,尽管受到 CMOS 工艺的巨大挑战,其仍然在高速、模拟、功率等类型的 IC 制备中占有非常重要的地位。