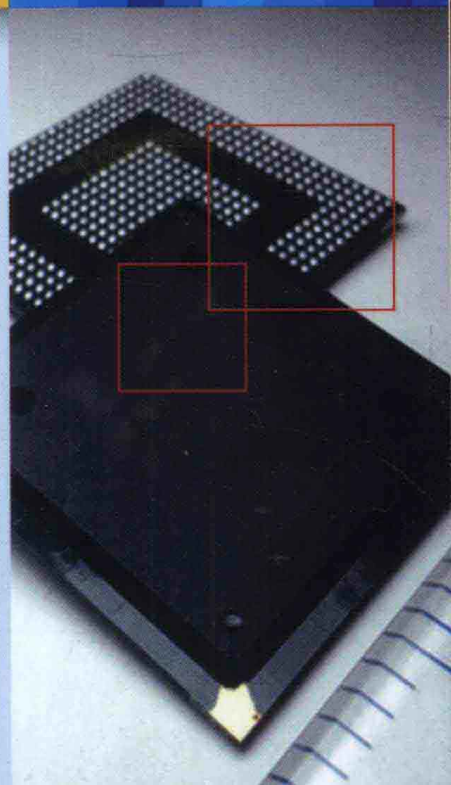




普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

模拟集成电路 分析与设计 (第二版)

洪志良 等 编著



科学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

模拟集成电路分析与设计

(第二版)

洪志良 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以电路为轴线,从基础到复杂,从纯粹的模拟集成电路到数模混合信号集成电路,重点介绍模拟集成电路和数模混合信号集成电路中基本电路的概念、工作原理、电路分析和设计。全书共10章:第1章介绍在系统集成时代的模拟集成电路;第2章介绍模拟集成电路中的器件,包括双极型晶体管、MOS管、集成电阻、集成电容和片上电感;第3章以带隙基准源和电流镜为重点,分析了参考电压源和参考电流源电路,其中对温度补偿技术进行了详细分析;第4、5章介绍了CMOS放大器的分析和设计;第6章介绍了双极型和CMOS模拟乘法器电路;第7章介绍了无源、有源和开关电容滤波器电路;第8章介绍了模/数转换电路的概念、体系结构、分析和设计实例;第9章介绍了过采样 $\Sigma\Delta$ 模/数转换技术和过采样 $\Sigma\Delta$ ADC分析与设计;第10章介绍了锁相环的基本概念、性能指标、分析模型及其两个应用——频率综合和数据时钟恢复(CDR)电路。

本书可作为高等院校电子信息类专业本科生和研究生的教材,也可供电子工程师参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟集成电路分析与设计/洪志良等编著. —2版. —北京:科学出版社,2011

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材·普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材)

ISBN 978-7-03-030426-1

I. ①模… II. ①洪… III. ①模拟集成电路-电路分析-高等学校-教材②模拟集成电路-电路设计-高等学校-教材 IV. ①TN431.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 033679 号

责任编辑:张 濮 潘继敏 / 责任校对:李 影

责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京市农林印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011年4月第 二 版 印张:21 1/2

2011年4月第三次印刷 字数:510 000

印数:5 001—9 000

定价:42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材》

编 委 会

顾 问:姚建铨 中国科学院院士 天津大学
蔡惟铮 国家级教学名师 哈尔滨工业大学

主 任:吕志伟 教授 哈尔滨工业大学

副主任:金亚秋 教授 复旦大学
郝 跃 教授 西安电子科技大学
严晓浪 教授 浙江大学
胡华强 编审 科学出版社

委 员:(按姓氏笔画排序)

王卫东	教授	中国科学技术大学	张 兴	教授	北京大学
王志华	教授	清华大学	张怀武	教授	电子科技大学
毛军发	教授	上海交通大学	张贵忠	教授	天津大学
文玉梅	教授	重庆大学	张雪英	教授	太原理工大学
匡 敏	副编审	科学出版社	陈弟虎	教授	中山大学
仲顺安	教授	北京理工大学	陈徐宗	教授	北京大学
任晓敏	教授	北京邮电大学	陈鹤鸣	教授	南京邮电大学
刘纯亮	教授	西安交通大学	欧阳征标	教授	深圳大学
杨冬晓	教授	浙江大学	都思丹	教授	南京大学
杨瑞霞	教授	河北工业大学	高 勇	教授	西安理工大学
时龙兴	教授	东南大学	郭树旭	教授	吉林大学
何伟明	教授	哈尔滨工业大学	黄卡玛	教授	四川大学
余 江	教授	云南大学	崔一平	教授	东南大学
邸 旭	教授	长春理工大学	逯贵祯	教授	中国传媒大学
邹雪城	教授	华中科技大学	曾 云	教授	湖南大学
应质峰	教授	复旦大学	谢 泉	教授	贵州大学
宋 梅	教授	北京邮电大学	蔡 敏	教授	华南理工大学

材料、能源和信息是 21 世纪的三大支柱产业,电子科学与技术是电子工程和电子信息发展的基础学科。目前,许多发达国家,如美国、德国、日本、英国、法国等,都竞相将电子科学与技术相关领域纳入了国家发展计划。我国对微电子技术和光电子技术等方向的研究也给予了高度重视,在多项国家级战略性科技计划中,如“863 计划”、“973 计划”、国家科技攻关计划、国家重大科技专项等,都有大量立项。在近几年发布的国务院《2006—2020 年国家信息化发展战略》、《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中,对我国的集成电路(特别是中央处理器芯片)、新一代信息功能材料及器件、高清晰度大屏幕平板显示、激光技术等关键领域都提出了明确目标。

电子科学与技术主要研究制造电子、光电子的各种材料及元器件,以及集成电路、集成电子系统和光电子系统,并研究开发相应的设计和制造技术。它涵盖的学科范围很广,是多学科交叉的综合性学科。现在,教育部本科专业目录中,电子科学与技术专业涵盖了微电子技术、光电子技术、物理电子技术、电子材料与元器件及电磁场与微波等专业方向。随着学科的交叉发展和产业的整合,各专业方向已彼此渗透交融。如何拓宽专业方向?如何体现专业特色?是当前我国高校电子科学与技术专业在办学方面所迫切需要探讨的问题。教育部电子科学与技术专业教学指导分委员会起草的《普通高等学校电子科学与技术本科指导性专业规范》,对本专业的核心知识领域和知识单元的覆盖范围作了规定,旨在引导高等学校电子科学与技术专业在办学方向与人才培养方面探索新的模式,不断提高教学质量,增强高校教学的创新能力,更好地培养知识、能力、素质全面协调发展的,适合我国电子科学与技术各领域不同层次发展需求的有用人才。

教育部为了推进“质量工程”,自 2007 年 10 月开始,先后三批遴选了国家级特色专业建设点。目前,有三十余个院系被批准为电子科学与技术国家级特色专业建设点。在教材建设方面,2008 年 10 月,教育部高教司在《关于加强“质量工程”本科特色专业建设的指导性意见》中指示:“教材建设要反映教学内容改革的成果,积极推进教材、教学参考资料和教学课件三位一体的立体化教材建设,选用高质量教材,编写新教材。”为了适应新形势下对电子科学与技术领域人才培养的需求,本届电子科学与技术教学指导分委员会经过广泛深入调研,依托电子科学与技术专业国家级、省级特色专业建设点,与科学出版社共同组织出版本套《普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材》,旨在贯彻专业规范和教学基本要求,总结和推广各特色专业建设点的教学经验和教学成果,以提高我国电子科学与技术专业本科教学的整体水平。

本套丛书在组织编写中,重点考虑了以下几方面的特色:

1. 体现专业特色,贯彻专业规范和教学基本要求。依托“国家级、省级特色专业建设点”,汇总优秀教学成果,将特色专业建设的内容、国内外科研教学的成果、电子科学与技术方向的专业规范与教学基本要求结合起来,教材内容安排围绕专业规范,体现核心知识单元与知识点。

2. 按照分类指导原则,满足多层面的需求。针对同一类课程,根据不同的教学层次(普通院校、重点院校或研究型大学、应用型大学)和学时要求(多学时、少学时),涵盖不同范围的拓

展知识单元,编写适合不同层次需求的教材。注重与先修课程、后续课程的有机衔接,每本教材在重视系统性和完整性的基础上,尽量减少内容重复。

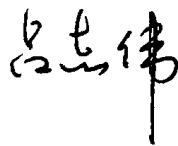
3. **传承精品,吐故纳新。**本套丛书吸纳了科学出版社 2004 年出版的《高等院校电子科学与技术专业系列教材》中受到高校师生欢迎的精品教材。在保证前一版教材准确诠释基本概念、基本理论的基础上,新一版教材更新内容,注重反映本学科领域的最新成果和发展方向,真正使教材能够达到培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”人才的目的。

4. **拓宽专业基础,面向工程应用,加强实践环节。**适当拓宽专业基础知识的范围,以增强学生的适应性;面向工程应用,突出工科特色,反映新技术、新工艺;注重实践环节的设置,以促进学生的实际动手能力和创新能力的培养。

5. **注重立体化建设。**本套丛书除了主教材外,还将逐步配套学习辅导书、教师参考书和多媒体课件等,为任课教师提供丰富的配套教学资源,方便教师教学,同时帮助学生复习与自学,使教材更加易教易学。

本套丛书的编写汇聚了全国高校的优势资源,突出了多层次与适应性、综合性与多样性、前沿性与先进性、理论与实践的结合。在教材的组织和出版过程中得到了相关高校教务处及学院的帮助,在此表示衷心的感谢。

根据电子科学与技术专业发展战略的要求,我们将对本套丛书不断更新,以保持教材的先进性和适用性。热忱欢迎全国同行以及关注电子科学与技术领域教育及发展前景的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议!



教育部高等学校电子科学与技术专业
教学指导分委员会主任
哈尔滨工业大学教授

第二版前言



本书第二版在 2005 年第一版的基础上进行了更新,主要有三个方面。集成电路发展非常快,集成电路 CMOS 工艺工业生产已经进入到 40nm 时代,实验室正在进行 28nm 工艺的研究,很多科学家正在考虑 Moore 后时代的集成电路技术;集成电路的规模已经达到将千亿甚至几十千亿只晶体管集成到一个芯片,数字、模拟和功率器件可以集成到一个 SOC,新的成果层出不穷,所以第二版中列入了很多近年来模拟集成电路发展的新成果。第二版还增加了一些新的内容,第一版中电压电流源只有一阶补偿,时钟综合电路仅考虑原型设计,新版增加了如高阶温度补偿的参考电压源电路和加快建立时间的 PLL 电路设计等内容。同时,第二版丰富了思考题和习题,以适应学生学习的需要。

在第二版编著中,李天望博士和易婷博士帮助我校对了部分章节,我的研究生杨思宇、李叶、龚晓寒、方飞、熊斯、李歆、郑震湘、程林、邱东、陈奇辉、孙瑜和彭振飞分别阅读了有关章节,并帮助我进行了文字处理,特此致谢。

感谢科学出版社的编辑对本书的大力支持和帮助。

洪志良

2010 年于复旦大学

第一版前言

一本好的教科书不仅对于学生学习来说至关重要,而且对于工程师来说也是一本很好的参考书。

作者从事模拟集成电路教学和科研几十年,一直希望写一本模拟集成电路的教学和参考用书,当《模拟集成电路分析与设计》出版时,我的这个心愿总算了却了。集成电路是近半个世纪以来发展最快的行业,根据摩尔定理,集成电路的集成度每三年增加一倍。在这日新月异的行业中,天天都有新的故事。集成电路主要分为三大支流:存储器、数字集成电路和模拟集成电路。存储器是工艺发展的动力,它总是采用最先进的工艺技术去实现更大的存储量和更快的存取时间。今日数字集成电路与系统关系密切,而数字集成电路更多依赖于仿真和综合的工具。相比较而言,模拟集成电路更多直接依赖于设计人员的智能和经验。模拟集成电路的性能指标要比数字集成电路多很多,高性能模拟集成电路的实现是一件了不起的事情。由于掌握设计模拟集成电路的时间比掌握设计数字集成电路的时间要长,要成为一名经验丰富的模拟集成电路设计工程师,需要经过系统的学习和艰辛的实践,希望本书给已经投入模拟集成电路和愿意投入模拟集成电路设计和开发的有识之士提供帮助。

在过去的40年中,模拟集成电路最主要的创新有Widlar的参考电压源,Gilbert的乘法器核,开关电容电路,流水线操作ADC, $\Sigma\Delta$ 过采样技术,器件动态补偿技术EDM等,当然还有为大家设计服务的SPICE。这些亮点犹如黑暗中行走时的火把,指引着模拟集成电路工程设计人员朝着正确的方向前进。

本书同设计一块系统集成芯片一样,它的完成依靠很多人的辛勤劳动,它的出版是团队精神的反映。李天望博士编写了第10章;朱臻博士、郭淦博士和叶菁华博士编写了第8章;易婷博士编写了第4章和第9章;黄煜梅博士编写了第5章。除直接参加编写的专家外,本书还引用苏彦峰博士论文中的片上电感设计、马德群博士论文中的连续时间滤波器设计、朱臻博士的流水线操作模拟转换电路的设计实例和连德东的部分硕士论文等。本书是在讲义的基础上改进过来的,初稿出来后,我的在读研究生叶国敬、邵滨、王为、何济柔、王静光、王颖、杨雨佳、秦亚杰、李丹、孙曼、胡康敏和沈维伦等同学分别阅读了有关章节帮助勘正错误,并完成排版,晁英伟女士输入文字和图,在此向他们表示衷心的感谢。

最后我感谢我的家人,他们不仅承担了家里所有的家务,而且给了我极大的支持和理解。

洪志良

2005年于复旦大学

目 录

丛书序

第二版前言

第一版前言

第 1 章 在系统集成时代的模拟集成电路

- 1
- 1.1 我们生活在模拟世界中 1
- 1.2 在系统集成时代的模拟集成电路 1
- 1.3 模拟集成电路设计工具、设计方法和设计流程 3
- 1.4 模拟集成电路的工艺技术 5
- 1.5 模拟集成电路的发展方向:高速、高精度、低电源和低功耗 ... 5
- 参考文献..... 6
- 思考题与习题..... 7

第 2 章 模拟集成电路中的器件..... 8

- 2.1 双极型晶体管 8
- 2.2 横向 PNP 晶体管 14
- 2.3 MOS 管 17
- 2.4 集成电阻..... 23
 - 2.4.1 扩散电阻 24
 - 2.4.2 扩散致窄电阻 25
 - 2.4.3 外延电阻 25
 - 2.4.4 离子注入电阻 26
 - 2.4.5 薄膜电阻 26
 - 2.4.6 电阻的修正 26
 - 2.4.7 CMOS 工艺中的电阻 26
 - 2.4.8 电阻的版图设计 28
- 2.5 集成电容..... 29
 - 2.5.1 结电容 29
 - 2.5.2 MOS 电容 29
 - 2.5.3 MMC 电容 30
 - 2.5.4 电容的版图设计 30
- 2.6 片上电感..... 30

参考文献 38

思考题与习题 38

第 3 章 参考电压源和参考电流源 40

- 3.1 电流镜..... 40
- 3.2 基准..... 41
 - 3.2.1 用齐纳二极管作参考电压 42
 - 3.2.2 采用 V_{BE} 实际偏置 42
 - 3.2.3 利用带隙基准源作基准 ... 43
 - 3.2.4 与温度成正比的(PTAT)参考电压源..... 45
- 3.3 参考电源的温度补偿..... 45
- 3.4 在 CMOS 工艺中实用化的带隙基准源..... 47
- 3.5 带有高阶温度补偿的带隙基准源..... 49
- 参考文献 51
- 思考题与习题 51

第 4 章 CMOS 单级放大器 54

- 4.1 CMOS 共源放大器 54
 - 4.1.1 带电阻负载的共源放大器 54
 - 4.1.2 用恒流源作负载的 CMOS 共源放大器 59
 - 4.1.3 用栅漏短接的 MOS 管作负载的共源放大器 60
 - 4.1.4 带负反馈的共源放大器 ... 61
- 4.2 共栅极放大器..... 63
 - 4.2.1 输入输出特性曲线 63
 - 4.2.2 交流小信号参数 64
 - 4.2.3 频率特性..... 65
 - 4.2.4 噪声特性..... 66
- 4.3 共源共栅放大器..... 66
 - 4.3.1 输入输出特性曲线 67

4.3.2	交流小信号参数	67	5.4.1	电流镜型放大器的基本性能参数分析	119
4.3.3	频率特性	69	5.4.2	建立时间和稳定状态的分析	122
4.3.4	噪声特性	70	5.4.3	高速运算放大器的实例	127
4.4	源极跟随器	71	5.5	其他类型的运算放大器	129
4.4.1	输入输出特性曲线	71	5.5.1	轨到轨放大器的输入级	129
4.4.2	交流小信号参数	71	5.5.2	轨到轨放大器的输出级	131
4.4.3	频率特性	72	参考文献	133	
4.4.4	噪声特性	73	思考题与习题	133	
4.5	CMOS 差分放大器	73	第 6 章 模拟乘法器	137	
4.5.1	差分放大器的工作原理	73	6.1	双极型模拟乘法器	137
4.5.2	差分放大器的交流小信号参数	75	6.1.1	双极型模拟乘法器的工作原理	137
4.5.3	CMOS 差分放大器性能分析	77	6.1.2	双极型模拟乘除器电路分析和设计	139
4.5.4	CMOS 差分放大器的性能参数	79	6.2	CMOS 模拟乘法器	140
4.5.5	差分放大器的特性	87	6.3	乘除器的性能参数	142
参考文献	89	参考文献	142	思考题与习题	143
思考题与习题	89	第 7 章 滤波器	144		
第 5 章 CMOS 运算放大器	91	7.1	滤波器的基本概念	144	
5.1	运算放大器的应用及基本性能参数	91	7.2	几种常用滤波器的传输函数和特性	145
5.1.1	运算放大器的应用	91	7.2.1	巴特沃思低通滤波器	146
5.1.2	运算放大器的基本性能参数	93	7.2.2	切比雪夫低通滤波器	146
5.2	两级电压放大器的分析和设计	95	7.2.3	椭圆低通滤波器	147
5.2.1	负反馈系统的稳定性判据	95	7.3	无源滤波器	148
5.2.2	常用的频率补偿方法	96	7.4	连续时间滤波器	149
5.2.3	两级电压放大器的设计	99	7.5	开关电容滤波器	157
5.2.4	运放的性能仿真	105	7.5.1	用开关电容来逼近电阻	157
5.3	共源共栅型放大器	107	7.5.2	电容的制备	158
5.3.1	基本共源共栅型放大器的分析	107	7.5.3	积分器	158
5.3.2	几种增益提高方法	112	7.5.4	利用积分器设计滤波器分析	159
5.3.3	一种增益自举型 OTA 的设计实例	115	参考文献	163	
5.4	电流镜型放大器	119	考题与习题	163	

第 8 章 奈奎斯特型数据转换器	169	9.2.1 单环高阶 $\Sigma\Delta$ 调制器	259
8.1 奈奎斯特型数据转换器的 基本原理及概念	169	9.2.2 级联 $\Sigma\Delta$ 调制器	263
8.1.1 数据转换器的发展历史 ...	169	9.2.3 采用多位量化器的 $\Sigma\Delta$ 调制 器	268
8.1.2 数据转换器的基本原理和 性能指标	172	9.3 电路的非理想特性及噪声对 $\Sigma\Delta$ 调制器性能的影响	272
8.1.3 数据转换器设计的基本原则	188	9.3.1 积分器的非理想特性	272
8.2 数/模转换器.....	189	9.3.2 比较器的非理想特性	277
8.2.1 D/A 转换器的基本类型	189	9.3.3 电路噪声	277
8.2.2 D/A 转换器的设计基础	192	9.4 $\Sigma\Delta$ 调制器的设计过程及设计 实例	277
8.2.3 D/A 转换器的设计实例	193	9.5 降采样滤波器	281
8.3 模/数转换器.....	212	参考文献.....	287
8.3.1 快闪结构 A/D 转换器 ...	212	思考题与习题.....	288
8.3.2 两步结构模/数转换器 ...	216	第 10 章 锁相环	290
8.3.3 逐次逼近型模/数转换器	218	10.1 锁相环的基本概念.....	290
8.3.4 流水线结构模/数转换器	219	10.2 锁相环的性能指标.....	290
8.3.5 并行结构模/数转换器 ...	226	10.2.1 相位噪声	290
8.3.6 一个 10 位流水线操作 CMOS A/D 变换器的设计	227	10.2.2 抖动	291
参考文献.....	250	10.2.3 相位噪声与抖动的关系	291
思考题与习题.....	251	10.2.4 锁相环的瞬态响应时间	292
第 9 章 过采样 $\Sigma\Delta$ 模/数转换器	253	10.2.5 锁相环的线性分析	292
9.1 $\Sigma\Delta$ 调制器的工作原理和基本 概念	254	10.3 锁相环的基本模块.....	295
9.1.1 过采样	254	10.3.1 鉴相器.....	295
9.1.2 $\Sigma\Delta$ 调制器的工作原理及 性能	254	10.3.2 压控振荡器	304
9.1.3 $\Sigma\Delta$ 调制器的特性	258	10.3.3 环路滤波器	312
9.2 $\Sigma\Delta$ 调制器的体系结构	259	10.4 锁相环的噪声分析.....	315
		10.5 锁相环的应用.....	316
		10.5.1 频率综合器	316
		10.5.2 时钟数据恢复	317
		参考文献.....	324
		思考题与习题.....	325
		索引.....	328

第 1 章 在系统集成时代的模拟集成电路

1.1 我们生活在模拟世界中

当我们睁开眼睛,看见旭日从地平线冉冉升起,又从西山徐徐落下。当我们漫步深山,耳听清泉缓缓流下,绕过山脚村庄,汇流大河,直奔大海。

当我们在公园放筝赶蝶,随着春风飘来阵阵花香。

.....

我们生活在万千世界之中,哪一样不是循序渐进,继往开来。

自然界的潜移默化和瞬息万变都是通过光、电、力、磁等来影响人类,人在征服自然中,又是充分利用光、电、力、磁等来控制 and 利用自然,使大自然更好地为我们服务,这些作用和控制都是模拟过程。下面我们来看几个例子。

风力发电(图 1.1):矗立在甘肃河西走廊上的巨型风扇随着风不停地转动,通过变速轮的耦合带动发动机发电。

太阳能热水器(图 1.2):当大平面的硅片阵列迎着太阳能吸收能量,对循环水进行加热后,你就可以用热水来洗浴。



图 1.1 风力发电

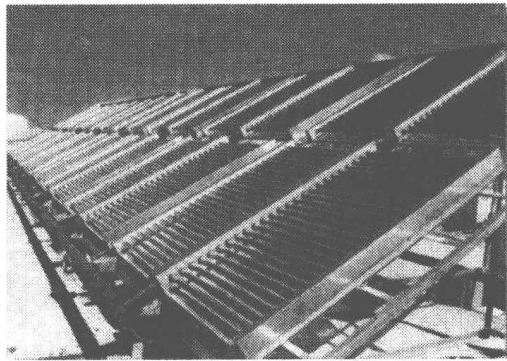


图 1.2 太阳能热水器

还有,当人造卫星放飞腾空之后,它是徐徐地进入空间,一圈一圈地环绕地球运转,并向我们发回需要的信息和美妙的旋律……

1.2 在系统集成时代的模拟集成电路

人类文明进入高科技时代,高科技的代表产业是信息产业(IT)、生物制药、航空航天和核能利用。其中信息产业又是最近 30 年发展最快的产业。信息产业的代表是网络技术、计算机和通信。网络技术、计算机技术和通信业的发展又促进了半导体集成电路的发展,图 1.3 是高

科技产业的金字塔, 半导体集成电路处于发展中的金字塔顶, 而它的应用又处于塔基, 如图 1.4 所示。

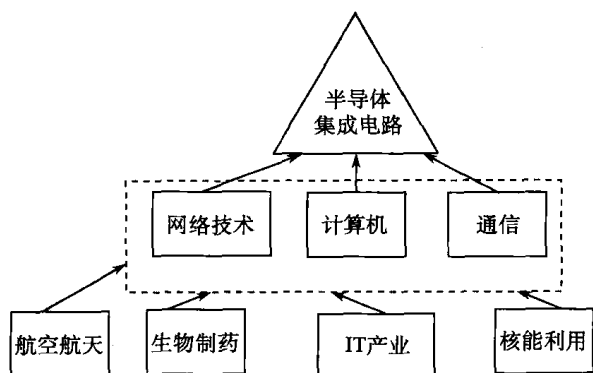


图 1.3 高科技产业的金字塔

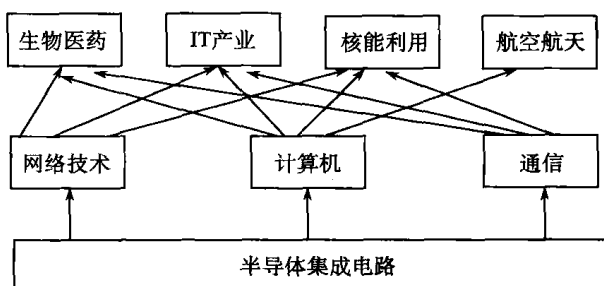


图 1.4 半导体集成电路应用

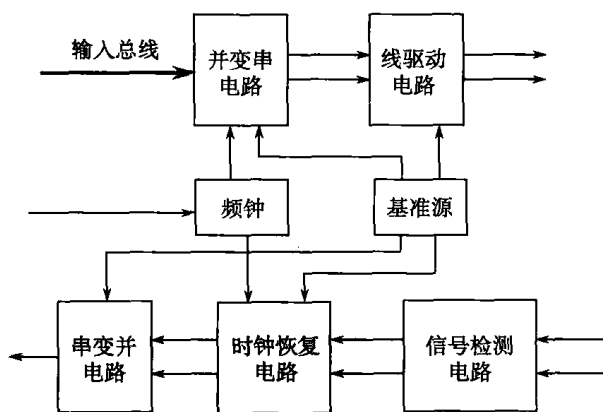


图 1.5 千兆位以太网集成收发电路

电路。图 1.5 中除基准源电路外, 其余模块都工作在千兆高速, 需要深亚微米技术。千兆位以太网收发电路是以太网物理层单片集成的关键。

计算机以个人计算机(PC)为代表, Intel Pentium IV 的芯片是主机芯片, 速度最快达到 3GHz, 多核处理器性能更加卓越。决定 PC 速度快慢的另一个重要因素是磁盘读出速度。磁盘以每分钟 5400 或 7200 转速度旋转, 由磁盘驱动电路发出命令, 将磁头移动到对应的扇、段和区中, 然后执行读或写, 数据经控制电路中缓冲后通过读写通道写入, 又通过低噪声放大器、读写通道和缓冲区读出, 整个系统的方框图如图 1.6 所示。

通信产业领衔 IT 产业, 特别是在发展中国家, 通信事业的发展可以称得上日新月异。在中国西部, 电话正在普及, 而在东部, 无线通信在城乡几乎普及。采用无线传输的系统主要有移动电话、卫星通信、无线局域网和近距离的蓝牙技术。图 1.7 是

现在来看一看信息产业三大领军技术的发展和系统集成。

网络技术: 互联网缩短了全球的距离, 改变了人类的生活习惯。原来匆匆去邮局取邮件的奔走已经由打开电子信箱收发电子邮件替代, 许多拆开信时的心跳已经转移到打开电子邮件之时的激动。网络的速度已经由 10Mbps、100Mbps 到千兆位以太网已经普及, 网络已经进入千家万户。网络的发展和普及方兴未艾, 正在高速发展。

图 1.5 是千兆位以太网单片集成收发

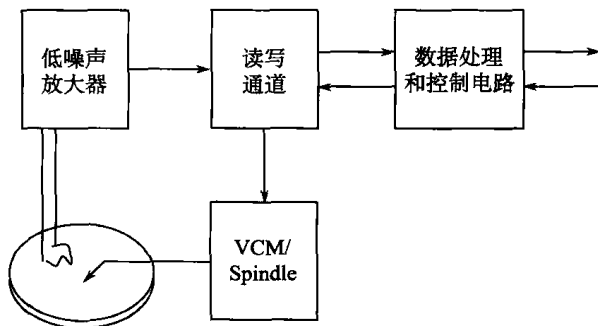


图 1.6 磁盘驱动系统

蓝牙射频发送/接收电路,在接收通道,信号经过低噪声放大器,混频后再经过带通滤波器输出到基带处理;在发送通道,数字高斯滤波后,经 D/A 变换、低通,再上混频后,经功率放大输出。

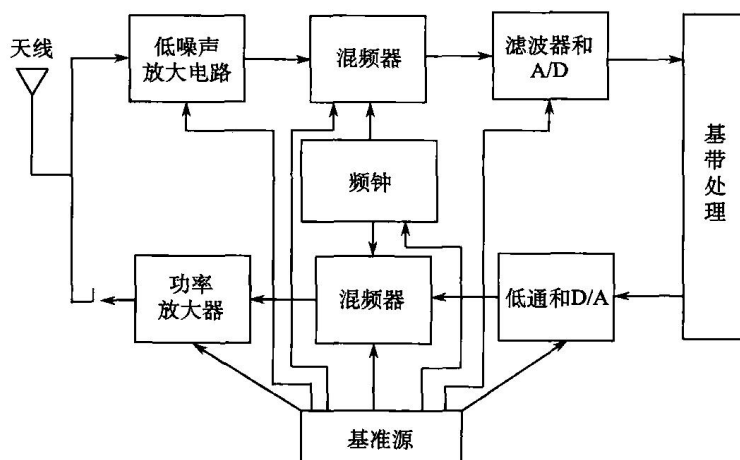


图 1.7 蓝牙发送/接收电路

由上述例子可以看到,随着深亚微米工艺技术的发展,MOS 的特征频率达到几十吉赫兹(GHz),其速度完全可以和双极工艺媲美。又随着设计工具的发展,特别是数模混合集成设计工具的发展,系统单片集成更加现实可行。在系统集成中,模拟集成电路是不可缺少的模块,它的性能直接影响到单片整个性能。

图 1.8 是一个单片集成射频收发电路的实例,时钟综合电路、低噪声放大电路、混频电路、功率放大电路、IF 滤波电路等都集成在一个芯片上^[6]。

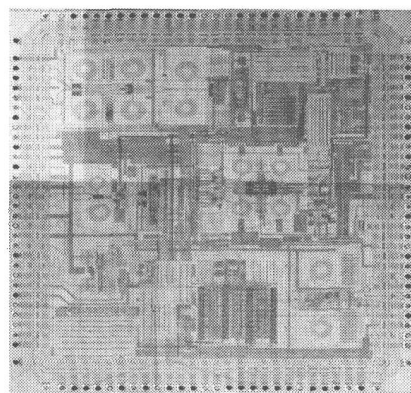


图 1.8 单片集成射频收发电路

1.3 模拟集成电路设计工具、设计方法和设计流程

模拟集成电路设计:时至今日,手工设计深亚微米模拟集成电路已经不可能。必须采用先进的 EDA 工具来进行设计,国际上最著名的模拟集成电路设计工具是 Cadence 的 Artist 和用于 RF 设计的安捷伦 ADS。说到模拟集成电路设计工具,我们必须说一说 SPICE 和它的创始人,SPICE 是第一套模拟集成电路设计仿真工具,诞生于 20 世纪 70 年代美国加州大学伯克利分校,几乎所有现代的模拟集成电路设计仿真工具都基于 SPICE,SPICE 的创始人是该校的 Pederson 教授。IEEE Spectrum 杂志在 2000 年将 Pederson 教授誉为 SPICE 之父。图 1.9 是当年杂志的封面,封面正是 Pederson 教授的照片。

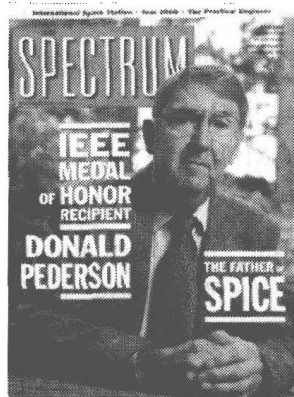


图 1.9 SPICE 之父 Pederson

1.2 节叙述了在系统集成时代的模拟集成电路起着必不

可少的重要作用。那么,如何去实现这些模拟作用呢?与数字电路一样,模拟集成电路由全定制和半定制两种设计方法。首先,看一下数字集成电路的设计方法。由图 1.10 可见,数字集成电路实现的方法不是完全一样的。对于批量要求大的品种,采用全定制设计。全定制设计可以减小芯片面积和提高合格率,降低成本,但设计周期长。

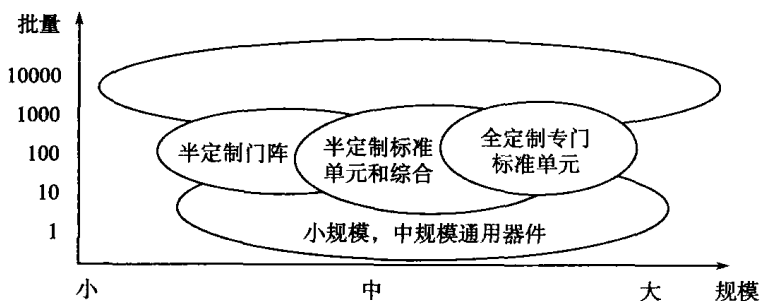


图 1.10 数字集成电路实现方法

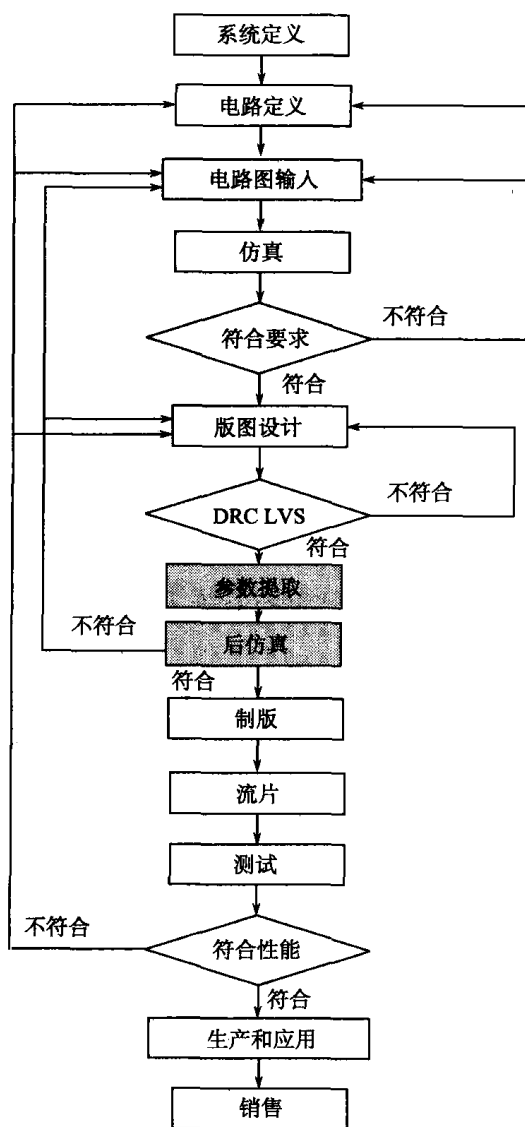


图 1.11 模拟电路设计和开发流程

对于批量要求少的品种,一般采用半定制设计。半定制设计周期短,但芯片面积大。模拟集成电路设计方法与数字集成电路的设计方法有区别,模拟集成电路普遍采用模块化设计,即将基本单元(如放大器等)设计验证后进行复用。由于电路性能不同,关键单元都需要重新设计,模拟集成电路是全定制设计。

模拟集成电路的设计流程如图 1.11 所示。

由图 1.11 可见,模拟集成电路与数字集成电路设计的三大差别在于模拟集成电路从电路图输入开始、手工版图设计和必须做的后仿真。在当代系统集成芯片中,即使是全数字电路也需要后仿真,只是后仿真工作量没有模拟集成电路后仿真的工作量那么大。在数模混合集成系统中,是数字和模拟模块最终综合集成。

由于数字集成电路的发展,数字 VLSI 实现的功能非常强,模拟集成电路在芯片上实现更多的数字智能就是采用新的算法和新的电路结构,使得数字技术应用到模拟电路中去。例如,文献[1]报道了一种采用 90nm CMOS 工艺技术实现的带后台数字校准的 A/D 转换器(ADC),它包含动态器件匹配编码器(dynamic-element-matching encoder)和低频数字信号处理器(low frequency DSP)。在 100MHz 的采样频率下,它实现了 11 位精度(89dB 信号与噪声失调比),功耗为

130mW,芯片面积是 $2.15\text{mm} \times 3.35\text{mm}$ 。

1.4 模拟集成电路的工艺技术

目前制造模拟集成电路的工艺技术主要是双极型工艺、CMOS 工艺和砷化镓工艺,最近开发出来的锗硅技术更适用于射频集成电路,而 BiCMOS 是双极和 CMOS 两种工艺的集合,既能制造双极器件,又能制造 MOS 器件,同时具有两者的优点,但工艺步骤增加的同时,成本自然增加。表 1.1 比较了前三种工艺技术的主要性能。

表 1.1 实现通用模拟集成电路的工艺技术

技术	速度	集成度	功耗	成本
双极	快	低	大	较高
CMOS	中	高	低	低
GaAs	最快	低	大	高

1.5 模拟集成电路的发展方向:高速、高精度、低电源和低功耗

随着电子工业的发展,各行各业对集成电路的需求量越来越多,同时,随着工艺技术的发展 and 设计水平的提高,拓宽了集成电路的应用市场。总的来说,今后模拟集成电路器件的发展朝着高速、高精度、多功能和低功耗的方向发展。

由于工艺技术的发展,稳定的模拟单元库已经逐渐建立,采用模拟单元库设计不仅减少设计周期,而且能保证设计的质量。

薄膜技术、激光修正技术的发展为高精度器件的制备创造了条件,短沟道器件的发展有利于高速器件的发展,BiCMOS 工艺的发展使模拟集成电路不仅速度上有保证,而且为与数字电路集成在一起的高性能模拟器件开辟了新的前程。以后的一个芯片中,既有数字电路,又有模拟单元,是名副其实的将一个系统集成在一个不大于手指甲的芯片上。

学习和设计模拟集成电路已经有很多参考书籍和文献,P. R. Gray 等的《模拟集成分析和设计》^[2]第四版是学习分析和设计模拟集成电路很好的教材,对于初学者来说,可以从 Razavi 的《模拟 CMOS 集成电路》中学习 CMOS 放大器,进入模拟集成电路的大门^[3]。Allen 和 Holberg 合著的《CMOS 模拟电路设计》^[4]第二版不仅可以学习放大器的设计,而且还介绍了 A/D、D/A 转换电路的设计,而 2004 年版 ADI 的《A/D 变换器设计手册》则是一部 A/D、D/A 设计者的必备手册^[5]。

展示当代模拟集成电路发展的国际会议很多,其中著名的有一年一度的固态电路国际年会(ISSCC)、欧洲固态电路年会(ESSCC)、消费电子学年会(CICC)、VLSI 研讨会。报道集成电路的期刊更多,最著名的有固体电路杂志(JSSCC)、电路和系统杂志、用户电子学杂志等。

工艺技术的发展证明 CMOS 更利于单片系统集成,单片集成 CMOS 系统甚至改变了系统的体系结构,文献[6]报道了直接转换的无线通信射频体系结构,用于 WCDMA 移动电话系统。系统集成是当代集成电路的发展趋势,而人类追求的是一机多用,多模系统集成,这时模

拟集成电路要符合多系统标准的需要,文献[7]报道了有线通信前端和无线通信射频芯片。

手持设备越来越多,电池供电的便携式电子设备需要低功耗集成电路,文献[8]、[9]就是为低功耗、超低功耗设计的模拟集成电路。文献[8]中,一个 11 位的 $\Sigma\Delta$ ADC 的功耗只有 2.2mW,而它的带宽达到 1MHz。文献[10]~[12]报道了超低功耗的 ADC,其优值(FOM)达到了每次转换几十甚至几飞焦(fJ, 10^{-15} J)。

人类对于视觉的感觉要求更加清晰,需要的数据传输速度越来越快,这就需要高速的模拟集成电路和接口电路,文献[13]和[14]报道了 1.3GHz 的闪烁 ADC 和 300MHz 转换速度的 14 位 DAC。锗硅跨阻放大器的带宽可以达到 50GHz^[15]。文献[16]、[17]报道了高速的 ADC 和 DAC,文献[16]报道了采样速率为 3.5GS/s 的 6 位闪烁 ADC,文献[17]报道了采样速率为 320MS/s 的 12 位 DAC。

随着纳米微电子技术的到来,低电源模拟集成电路设计技术又成为纳米微电子设计的一个瓶颈,低电源模拟电路的设计已有不少报道,在文献[18]、[19]中,电源电压低于 1V 的参考电压源和 ADC 已经得以实现。

工艺技术的发展采用 CMOS 更利于单片系统集成,单片集成 CMOS 系统甚至改变系统的体系结构,文献[20]报道了直接转换的体系结构,用于 WCDMA 移动电话系统。系统集成是当代集成电路的发展趋势,而人类追求的是一机多用,多系统集成,这时模拟集成电路要符合多系统标准的需要,文献[21]、[22]报道了 3G 前端和多模射频芯片。

Die guten Leuten wissen nicht, was es einen für Zeit und Mühe gekostet, um Lesen zu lernen. Ich habe achtzig Jahre dazu gebraucht und kann noch jetzt nicht sagen, dass ich am Ziel wäre.

—Goethe

没有人能够说,用多少时间和多少代价能够学会学习。我用了 80 年的时间,我还不能说我已经学会了学习。

—歌德

参 考 文 献

- [1] Panigada A, Galton I. A 130mW 100MS/s pipelined ADC with 69dB SNDR enabled by digital harmonic distortion correction. ISSCC Dig Tech Papers, 2009;162-163.
- [2] Gray P R, et al. Analysis and Design of Analog Integrated Circuits. 4th ed. John Wiley & Sons, 2001.
- [3] Razavi B. Design of Analog CMOS Integrated Circuits. McGraw-Hill Companies, 2002.
- [4] Allen P E, Holberg D R. CMOS Analog Circuit Design. 2nd ed. Oxford University Press, 2002.
- [5] Kester W. A Data Conversion Handbook. Elsevier, 2004.
- [6] 洪志良. CMOS 射频集成电路发展趋势. 电子器件, 2004(8).
- [7] Henrickson L, et al. Low-power fully integrated 10-Gb/s SONET/SDH transceiver in 0.13- μ m CMOS. JSSC, 2003, 38(10):1595-1601.
- [8] Kappes M S. A 2.2-mW CMOS bandpass continuous-time multibit $\Sigma\Delta$ ADC with 68 dB of dynamic range and 1-MHz bandwidth for wireless applications. JSSC, 2003, 38(7):1098-1104.
- [9] Nguyen K, et al. A 108 dB SNR, 1.1 mW oversampling audio DAC with a three-level DEM technique. JSSC 2008, 43(12): 2592-2600. JSSC, 2003, 38(9): 1955-1960.