




高等院校电子科学与技术专业系列教材

# 模拟集成电路 分析与设计

洪志良 编著

 科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

高等院校电子科学与技术专业系列教材

# 模拟集成电路分析与设计

洪志良 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是以电路为轴线,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、电路分析和设计的教科书。

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,包括双极型管, MOS管,集成电阻、电容和电感。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章介绍了放大器的分析和设计。第6章以 Gilbert 乘法器核为对象,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章介绍过采样模/数转换技术和过采样  $\Sigma\Delta$  ADC 分析和设计。第10章为 PLL 电路,介绍了 PLL 工作原理、性能参数、分析模型及它的两个应用——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/洪志良编著. —北京:科学出版社,2005

(高等院校电子科学与技术专业系列教材)

ISBN 7-03-016197-1

I. 模… II. 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. TN431.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 098542 号

责任编辑:马长芳 资丽芳 贾瑞娜 / 责任校对:鲁素

责任印制:钱玉芬 / 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>

双青印刷厂 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:B5(720×1000)

2005年9月第一次印刷 印张:24 3/4

印数:1—3 000 字数:480 000

定价:32.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

## 《高等院校电子科学与技术专业系列教材》编委会

**主 编** 姚建铨 天津大学  
**副主编** 金亚秋 复旦大学  
陈治明 西安理工大学  
吕志伟 哈尔滨工业大学

**委 员** (按姓氏音序排列)

曹全喜 西安电子科技大学  
崔一平 东南大学  
傅兴华 贵州大学  
郭从良 中国科技大学  
郭树旭 吉林大学  
黄卡玛 四川大学  
金伟琪 北京理工大学  
刘纯亮 西安交通大学  
刘 旭 浙江大学  
罗淑云 清华大学  
马长芳 科学出版社  
毛军发 上海交通大学  
饶云江 重庆大学  
张怀武 电子科技大学  
张在宣 中国计量学院  
周乐柱 北京大学  
邹雪城 华中科技大学

**秘 书** 资丽芳 科学出版社

## 序 言

21 世纪,随着现代科学技术的飞速发展,人类历史即将进入一个崭新的时代——信息时代。其鲜明的时代特征是,支撑这个时代的诸如能源、交通、材料和信息等基础产业均将得到高度发展,并能充分满足社会发展和人民生活的多方面需求。作为信息科学的基础,微电子技术和光电子技术同属于教育部本科专业目录中的一级学科“电子科学与技术”。微电子技术伴随着计算机技术、数字技术、移动通信技术、多媒体技术和网络技术的出现得到了迅猛的发展,从初期的小规模集成电路(SSI)发展到今天的巨大规模集成电路(GSI),成为使人类社会进入信息化时代的先导技术。20 世纪 60 年代初出现的激光和激光技术以其强大的生命力推动着光电子技术及其相关产业的发展,光电子技术集中了固体物理、波导光学、材料科学、半导体科学技术和信息科学技术的研究成果,成为具有强烈应用背景的新兴交叉学科,至今光电子技术已经应用于工业、通信、信息处理、检测、医疗卫生、军事、文化教育、科学研究和社会发展等各个领域。可以预言,光电子技术将继续微电子技术之后再次推动人类科学技术的革命和进步。因此,本世纪将是微电子和光电子共同发挥越来越重要作用的时代,是电子科学与技术飞速发展的时代。

电子科学与技术对于国家经济发展、科技进步和国防建设都具有重要的战略意义。今天,面对电子科学技术的飞速发展,世界上发达国家像美国、德国、日本、英国、法国等都竞相将微电子技术和光电子技术引入国家发展计划。我国对微电子技术和光电子技术的研究也给予了高度重视。在全国电子科学技术的科研、教学、生产和使用单位的共同努力下,我国已经形成了门类齐全、水平先进、应用广泛的微电子和光电子技术的科学研究领域,并在产业化方面形成了一定规模,取得了可喜的进步,为我国科学技术、国民经济和国防建设做出了积极贡献,在国际上也争得了一席之地。但是我们应该清醒地看到,在电子科学与技术领域,我国与世界先进水平仍有不小的差距,尤其在微电子技术方面的差距更大。这既有历史、体制、技术、工艺和资金方面的原因,也有各个层次所需专业人才短缺的原因。

为了我国电子科学与技术事业的可持续发展和抢占该领域中高新技术的制高点,就必须统筹教育、科研、开发、人才、资金和市场等各种资源和要素,其中人才培养是极其重要的一环。根据教育部加强高等学校本科教育的有关精神,电子科学与技术教学指导委员会和科学出版社,经过广泛而深入的调研,组织出版了这套电子科学与技术本科专业系列教材。

本系列教材具有以下特色。

1. 多层次。考虑到多层面的需求(普通院校、重点院校或研究型大学、应用型

大学),根据不同的层次,有针对性地编写不同的教材,同层次的教材也可能出版多种面向的教材。

2. 延续传统、更新内容、基础精深、专业宽新。教材编写在准确诠释基本概念、基本理论的同时,注重反映该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。

3. 拓宽专业基础,加强实践教学。适当拓宽专业基础知识的范围,以增强培养人才的适应性;注重实践环节的设置,以促进学生实际动手能力的培育。

4. 适应教学计划,考虑自学需要。教材的编写完全按照教学指导委员会最新的课程设计和课程要求的指示精神,同时给学生留有更大的选择空间,以利于学生的个性发展和创新能力的培养。

5. 立体化。教材的编写是立体的,包括主教材、学习辅导书、教师参考书和多媒体课件等。

本系列教材的编写集中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学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,我们将对这套系列教材不断更新,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“电子科学与技术”教学指导委员会主任  
中国科学院院士,天津大学教授

# 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年复旦大学

# 目 录

序言

前言

<b>第 1 章 在系统集成时代的模拟集成电路</b> .....	1
1.1 人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.....	5
1.4 模拟集成电路的工艺技术 .....	7
1.5 模拟集成电路发展方向 .....	7
参考文献.....	9
<b>第 2 章 模拟集成电路中的器件</b> .....	10
2.1 双极型晶体管.....	10
2.2 横向 PNP 晶体管 .....	17
2.3 MOS 管 .....	21
2.4 集成电阻.....	29
2.4.1 扩散电阻.....	30
2.4.2 扩散致窄电阻 .....	31
2.4.3 外延电阻.....	31
2.4.4 离子注入电阻 .....	32
2.4.5 薄膜电阻.....	32
2.4.6 电阻的修正 .....	33
2.4.7 CMOS 工艺中电阻 .....	33
2.4.8 电阻的版图设计 .....	35
2.5 集成电容.....	35
2.5.1 结电容 .....	36
2.5.2 MOS 电容 .....	36
2.5.3 MMC 电容 .....	37
2.5.4 电容的版图设计 .....	37
2.6 片上电感.....	37
参考文献 .....	47
<b>第 3 章 参考电压源和参考电流源</b> .....	49
3.1 电流镜.....	49



3.2	基准	51
3.2.1	用齐纳二极管作参考电压	51
3.2.2	采用 $V_{BE}$ 实际偏置	52
3.2.3	利用带隙基准源作基准	53
3.2.4	PTAT 参考电压源	54
3.3	参考电源的温度补偿	55
3.4	在 CMOS 工艺中实用化的带隙基准源	57
	参考文献	60
<b>第 4 章</b>	<b>CMOS 单级放大器</b>	<b>61</b>
4.1	CMOS 共源放大器	61
4.1.1	带电阻负载的共源放大器	61
4.1.2	用恒流源作负载的 CMOS 共源放大器	67
4.1.3	用栅、漏短接的 MOS 管作负载的共源放大器	68
4.1.4	带负反馈的共源放大器	70
4.2	共栅极放大器	72
4.2.1	输入输出特性曲线	72
4.2.2	交流小信号参数	73
4.2.3	频率特性	74
4.2.4	噪声特性	75
4.3	共源共栅放大器	76
4.3.1	输入输出特性曲线	76
4.3.2	交流小信号参数	77
4.3.3	频率特性	79
4.3.4	噪声特性	80
4.4	源极跟随器	81
4.4.1	输入输出特性曲线	81
4.4.2	交流小信号参数	83
4.4.3	频率特性	83
4.4.4	噪声特性	84
4.5	CMOS 差分放大器	85
4.5.1	差分放大器的工作原理	85
4.5.2	差分放大器的交流小信号参数	87
4.5.3	CMOS 差分放大器性能分析	90
4.5.4	CMOS 差分放大器的性能参数	92
4.5.5	差分放大器的特性	102
	习题	103

参考文献.....	104
<b>第 5 章 CMOS 运算放大器</b> .....	106
5.1 运算放大器的应用及基本性能参数 .....	106
5.1.1 运算放大器的应用 .....	106
5.1.2 运算放大器的基本性能参数 .....	109
5.2 两级电压放大器的分析和设计 .....	110
5.2.1 负反馈系统的稳定性判据 .....	111
5.2.2 常用的频率补偿方法 .....	113
5.2.3 两级电压放大器的设计 .....	116
5.2.4 运放的性能仿真 .....	122
5.3 共源共栅型放大器 .....	125
5.3.1 基本共源共栅型放大器的分析 .....	125
5.3.2 几种增益提高方法 .....	131
5.3.3 一种增益自举型 OTA 的设计实例 .....	135
5.4 电流镜型放大器 .....	140
5.4.1 电流镜型放大器的基本性能参数分析 .....	140
5.4.2 建立时间和稳定状态的分析 .....	144
5.4.3 高速运算放大器的实例 .....	149
5.5 其他类型的运算放大器 .....	151
5.5.1 轨到轨放大器的输入级 .....	152
5.5.2 轨到轨放大器的输出级 .....	154
习题.....	156
参考文献.....	158
<b>第 6 章 模拟乘法器</b> .....	160
6.1 双极型模拟乘法器 .....	160
6.1.1 双极型模拟乘法器工作原理 .....	160
6.1.2 双极型模拟乘除器 .....	162
6.2 CMOS 模拟乘法器 .....	163
6.3 乘除器的性能参数 .....	165
参考文献.....	166
<b>第 7 章 滤波器</b> .....	168
7.1 滤波器的基本概念 .....	168
7.2 几种常用滤波器的传输函数和特性 .....	169
7.2.1 巴特沃思低通滤波器 .....	170
7.2.2 切比雪夫低通滤波器 .....	171
7.2.3 椭圆低通滤波器 .....	172

7.3	无源滤波器 .....	172
7.4	连续时间滤波器 .....	175
7.5	开关电容滤波器 SCF .....	183
7.5.1	用开关电容来逼近电阻 .....	183
7.5.2	电容的制备 .....	184
7.5.3	积分器 .....	184
7.5.4	利用积分器设计滤波器分析 .....	185
	思考题 .....	190
	习题 .....	190
	参考文献 .....	192
<b>第8章</b>	<b>奈奎斯特型数据转换器</b> .....	<b>194</b>
8.1	奈奎斯特型数据转换器的基本原理及概念 .....	194
8.1.1	数据转换器的发展历史 .....	194
8.1.2	数据转换器的基本原理和性能指标 .....	198
8.1.3	数据转换器设计的基本原则 .....	217
8.2	数/模转换器 .....	218
8.2.1	D/A 转换器的基本类型 .....	218
8.2.2	D/A 转换器的设计基础 .....	222
8.2.3	D/A 转换器的设计实例 .....	223
8.3	模/数转换器 .....	244
8.3.1	快闪结构模/数转换器 .....	244
8.3.2	两步结构模/数转换器 .....	248
8.3.3	逐次逼近型模/数转换器 .....	250
8.3.4	流水线结构模/数转换器 .....	253
8.3.5	并行结构模/数转换器 .....	261
8.3.6	一个 10 位流水线操作 CMOS A/D 变换器的设计 .....	262
	参考文献 .....	287
<b>第9章</b>	<b>过采样 <math>\Sigma\Delta</math> 模/数转换器</b> .....	<b>290</b>
9.1	$\Sigma\Delta$ 调制器的工作原理和基本概念 .....	291
9.1.1	过采样 .....	291
9.1.2	$\Sigma\Delta$ 调制器的工作原理及性能 .....	292
9.1.3	$\Sigma\Delta$ 调制器的特性 .....	296
9.2	$\Sigma\Delta$ 调制器的体系结构 .....	298
9.2.1	单环高阶 $\Sigma\Delta$ 调制器 .....	298
9.2.2	级联 $\Sigma\Delta$ 调制器 .....	302
9.2.3	采用多位量化器的 $\Sigma\Delta$ 调制器 .....	308

9.3 电路的非理想特性及噪声对 $\Sigma\Delta$ 调制器性能的影响 .....	313
9.3.1 积分器的非理想特性 .....	313
9.3.2 比较器的非理想特性 .....	318
9.3.3 电路噪声 .....	319
9.4 $\Sigma\Delta$ 调制器的设计过程及设计实例 .....	319
9.5 降采样滤波器 .....	324
习题 .....	331
参考文献 .....	332
<b>第 10 章 锁相环</b> .....	<b>335</b>
10.1 锁相环的基本概念 .....	335
10.2 锁相环的性能指标 .....	336
10.2.1 相位噪声 .....	336
10.2.2 抖动 .....	336
10.2.3 相位噪声与抖动的关系 .....	337
10.2.4 锁相环的瞬态响应时间 .....	338
10.2.5 锁相环的线性分析 .....	338
10.3 锁相环的基本模块 .....	341
10.3.1 鉴相器 .....	341
10.3.2 压控振荡器 .....	352
10.3.3 环路滤波器 .....	362
10.4 锁相环的噪声分析 .....	366
10.5 锁相环的应用 .....	367
10.5.1 频率综合器 .....	367
10.5.2 时钟数据恢复 .....	369
习题 .....	377
参考文献 .....	377
<b>索引</b> .....	<b>379</b>

# 第 1 章 在系统集成时代的模拟集成电路

## 1.1 人们生活在模拟世界中

当人们睁开眼睛,看见旭日从地平线冉冉升起,又从西山徐徐落下;当人们漫步深山,耳听清泉缓缓流下,绕过山脚村庄,汇流大河,直奔大海;当人们在公园放风筝赶蝶,随着春风飘来阵阵花香……

人们生活在大千世界之中,哪一样不是循序渐进,继往开来。

自然界的潜移默化 and 瞬息万变都是通过光、电、力、磁等来影响人类;人在征服自然的过程中,又是充分利用光、电、力、磁等来控制 and 利用自然,使大自然更好地为人类服务,这里作用 and 控制都是模拟过程。下面来看几个例子。

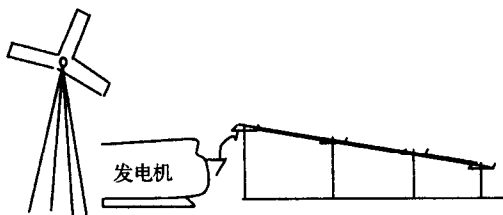


图 1.1 风力发电

风力发电: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(图 1.1)。

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

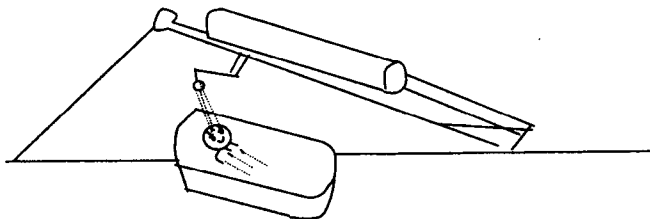


图 1.2 太阳能热水器

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,并向地面发回我们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

人类文明进入到高科技时代,高科技的代表产业是 IT、生物制药、航空航天和

核能利用。其中 IT 业又是最近 30 年发展最快的产业。IT 业的代表是网络、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(图 1.4)。

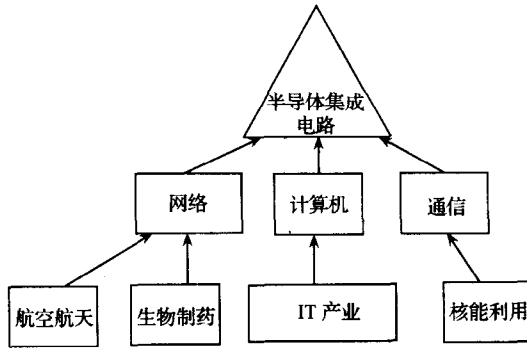


图 1.3 高科技发展金字塔

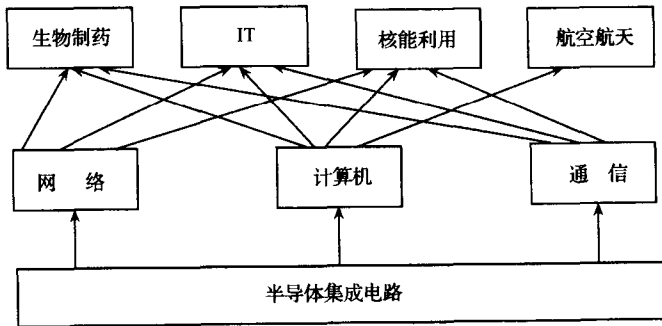


图 1.4 半导体集成电路应用

现在来看一看 IT 领域的三大产业的发展 and 系统集成。

(1) 网络技术。以太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。网络的速度已经由 10 兆普及到 100 兆，正在向千兆以太网过渡，网络已经进入到千家万户。网络的发展和普及方兴未艾，正在以更高的速度发展。

图 1.5 是千兆以太网单片集成收发电路，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。千兆以太网收发电路<sup>[5]</sup>是以太网物理层单片集成的关键。

(2) 计算机以 PC 为代表，Intel 奔腾 4 的芯片是主机芯片，主频最快达到

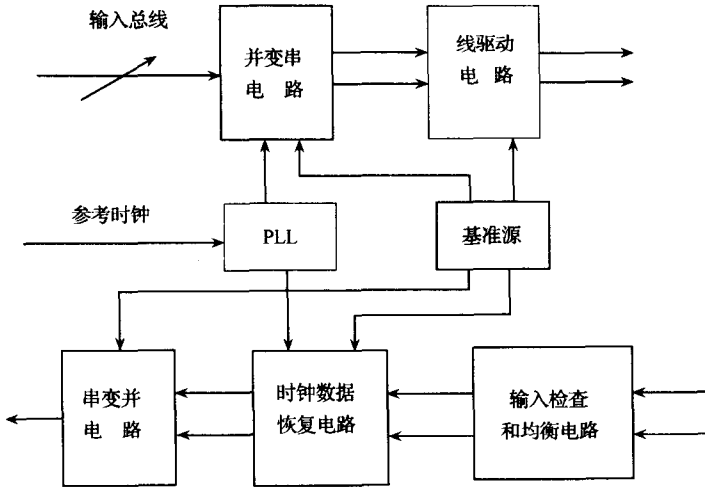


图 1.5 千兆以太网收发电路

3GHz。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 5400r/min 或 7200r/min 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,然后执行读或写操作,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。

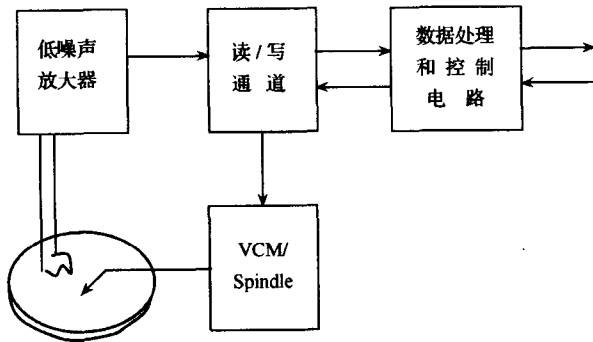


图 1.6 磁盘驱动系统

(3) 通信产业领先于 IP 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 是蓝牙射频收发电路,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。

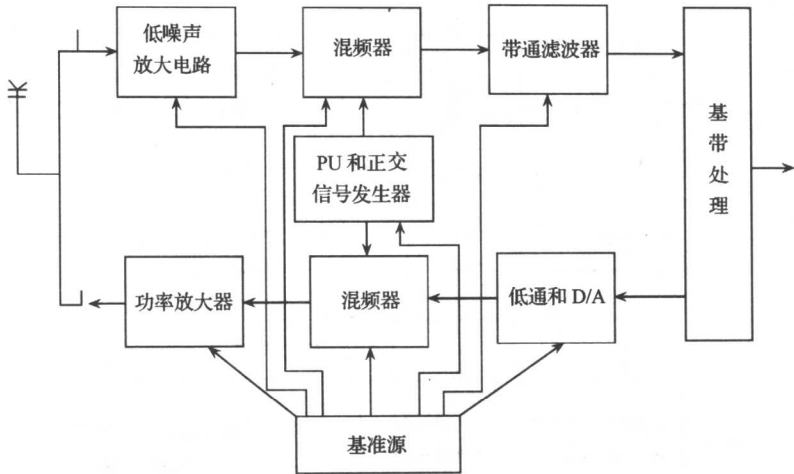


图 1.7 蓝牙射频收发电路

由上述例子我们可以看到,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型工艺媲美。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<sup>[6]</sup>,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。

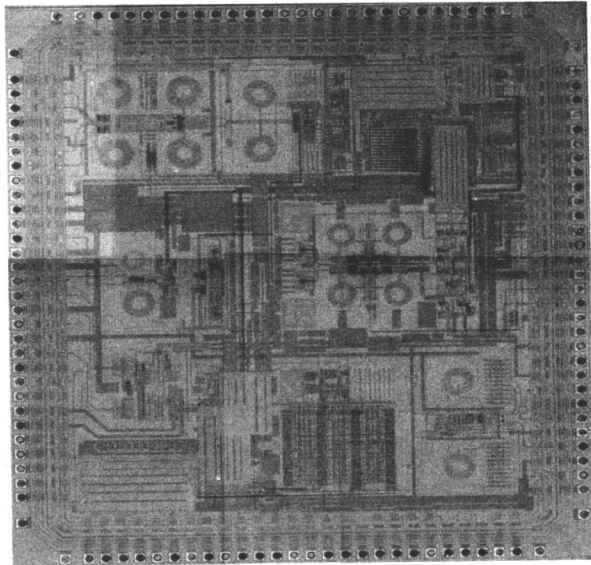


图 1.8 单片集成射频收发电路



### 1.3 模拟集成电路设计工具、设计方法和设计流程

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 设计安捷伦 ADS。说到模拟集成电路设计工具,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。

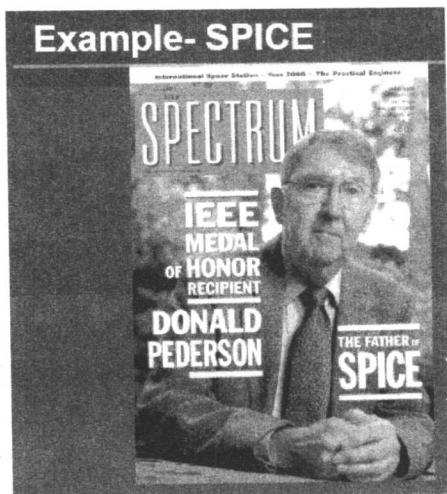


图 1.9 SPICE 之父 Pederson

上面叙述了在系统集成时代,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?和数字电路一样,模拟集成电路有全定制和半定制两种设计方法。首先,看一下数字 IC 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,可以减小芯片面积并提高合格率,成本低,但设计周期长;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。

那么,如何去实现这些模拟作用呢?和数字电路一样,模拟集成电路有全定制和半定制两种设计方法。首先,看一下数字 IC 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,可以减小芯片面积并提高合格率,成本低,但设计周期长;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。

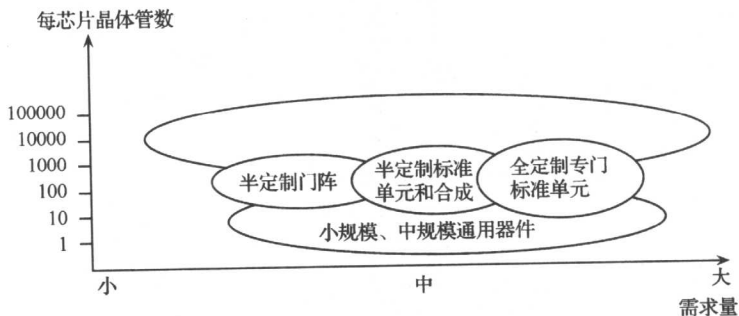


图 1.10 数字电路实现方法