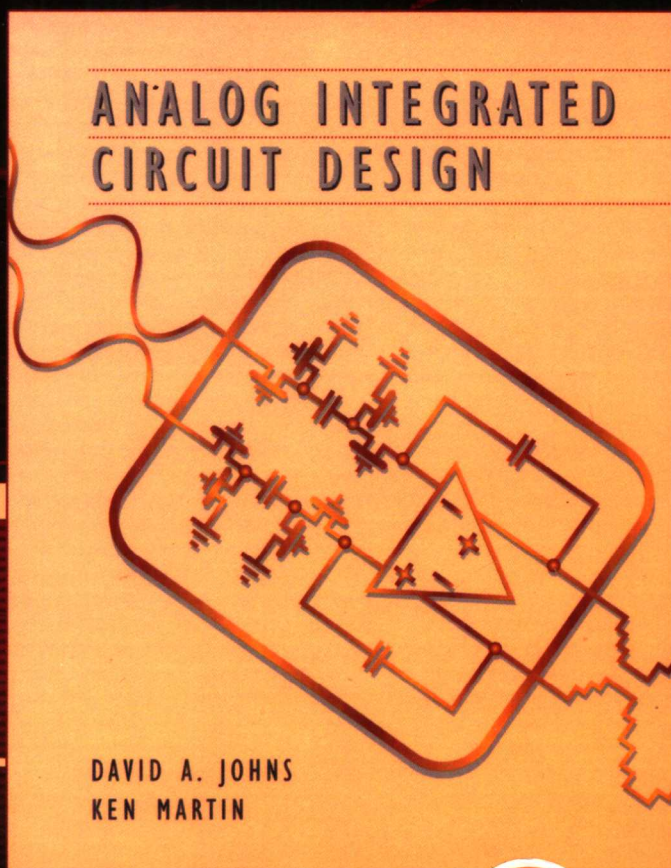


模拟集成电路设计

Analog Integrated Circuit Design

(加) David A. Johns 著
Ken Martin

曾朝阳 赵阳 方顺 等译



虽然在许多应用上，数字电路确实已经取代了大量模拟电路。但是，人们在面对所处的现实世界时，仍然需要大量优秀的模拟电路设计。随着系统的合成，集成电路会越来越大，在大多数情况下现代集成电路至少有一部分需要包含连接现实世界的模拟电路。虽然这部分模拟电路只占据整个基片面积的一小部分，但它通常成为整个系统效能的制约因素和集成电路设计最困难的部分。因此，我们仍然需要模拟电路设计者。本书的目的就是为集成电路设计者提供必需的多方面的知识，帮助其成为优秀的模拟电路设计者。

上架指导：电子与电气工程 / 集成电路

ISBN 7-111-15472-X



9 787111 154723

封面设计：杨红梅



华章图书

华章网站 <http://www.hzbook.com>

网上购书: www.china-pub.com

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68995259, 68995264

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

ISBN 7-111-15472-X/TN · 385

定价: 59.00 元

电子与电气工程丛书

模拟集成电路设计

Analog Integrated Circuit Design

(加) David A. Johns 著
Ken Martin

曾朝阳 赵阳 方顺 等译



机械工业出版社
China Machine Press

本书是一本优秀的模拟集成电路分析与设计教材,它以直观的角度、严密的思维逻辑,阐述了各种模拟电路的基本原理和概念,同时还讨论了该领域中出现的新问题及新的技术发展。全书论述清晰,重点突出,实用性强,将理论与实际结合,提供了大量现代工业中的设计实例,介绍了许多实用的设计技巧,是从事这一领域的工程技术人员必备的参考书,同时也是一本不可多得的适合各电类专业高年级本科生和研究生学习的教材。

David Johns, Ken Martin: Analog Integrated Circuit Design (ISBN: 0-471-14448-7)

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

Copyright © 1997 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved.

本书中文简体字版由约翰-威利父子公司授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书版权登记号:图字:01-2003-8700

图书在版编目(CIP)数据

模拟集成电路设计/(加)约翰斯(Johns, D.), (加)马丁(Martin, K.)著;曾朝阳等译.
—北京:机械工业出版社,2005.7

(电子与电气工程丛书)

书名原文:Analog Integrated Circuit Design

ISBN 7-111-15472-X

I. 模… II. ①约…②马…③曾… III. 模拟集成电路—电路设计 IV. TN431.102

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 108592 号

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:姚 蕾

北京牛山世兴印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·32 印张

印数:0 001-4000 册

定价:59.00 元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010)68326294

译者序

随着信息技术及其产业的迅速发展,当今社会进入到了一个崭新的信息化时代。微电子技术是信息技术的核心技术,模拟集成电路又是微电子技术的核心技术之一,因而模拟集成电路成为信息时代的重要技术领域。

模拟集成电路包含纯模拟信号处理功能的电路和 A/D 混合信号处理功能的电路。其技术范围涉及数据转换器(如 A/D、D/A 转换器等)、线性和非线性放大器(如运算放大器、射频放大器、对数放大器、电压比较器、模拟乘法器等)、电子开关和多路转换器、稳压电源调节器(如线性电压调节器、开关电源控制器等)及其他模拟集成电路(如驱动器、延迟线、传感器等)。模拟集成电路主要用于对模拟信号完成采集、放大、比较、变换等功能,它和数字电路及 A/D、D/A 转换器电路三者之间的关系,早在 1986 年就由美国加州大学的 Paul. R. Gray 教授提出的“鸡蛋模型”做了形象描述,该模型把这三者整体上视为一个鸡蛋,而把数字电路视为蛋黄,模拟电路视为蛋壳, A/D、D/A 电路视为蛋清,三者既不相同,又是统一的有机整体。现实世界中的各种模拟信息经模拟集成电路采集、放大、变换等处理后,就可以得到计算机或数字电路处理所需的信号,从而实现人们需要的信息产品。显然,模拟集成电路是模拟世界和数字化电子信息系统之间的桥梁。

本书介绍模拟集成电路的分析与设计,直观且严密地阐述了各种模拟电路的基本原理和概念,同时还阐述了在模拟电路设计中出现的新问题及电路技术的新发展。本书由浅入深,理论与实际结合,提供了大量现代工业中的设计实例。本书是现代模拟集成电路设计的理想教材或参考书,可供与集成电路领域有关的各电类专业的高年级本科生和研究生使用,也可供从事这一领域的工程技术人员自学和参考。

本书的翻译由曾朝阳组织,赵阳、方顺、李俊、张永乐、刘红娅参加了翻译工作。在翻译过程中得到了装备指挥技术学院赵继广教授和洪海丽副教授的帮助和建议,在此表示感谢。

模拟集成电路理论涉及的专业面很广,由于译者水平和学识有限,翻译中难免有错误和不妥之处,真诚希望老师、专家和广大读者批评指正。

前 言

在过去的 20 年里，许多人预言，这个世界很快将不需要模拟电路了，因为只需要依赖于数字电路就可以了。虽然在许多应用中，有相当一部分模拟电路确实已经被相对应的数字电路(例如数字音频)所取代，但是，目前仍然非常需要优秀的模拟电路设计。例如，将物理信号数字化时，通常需要模数转换器和数模转换器，以及与之相关的抗混叠处理和重构滤波器。此外，新的模拟电路的应用还体现在：速度和功耗需求经常要求我们使用高速的模拟前端，例如基于铜线或无线通信信道的数字通信。而且，由于系统集成，集成电路变得较大，很有可能一个现代集成电路至少有一些部分包含需要与现实世界有接口的模拟电路。虽然这部分模拟电路只占据整个基片面积的一小部分，但它通常成为整个系统效能的限制因素和集成电路设计最困难的部分。因此，工业上仍然非常需要模拟电路设计者。本书的目的就是通过简明论述一个集成电路设计者所必需的多方面知识，培养优秀的模拟电路设计者。

许多人把高性能模拟电路的设计和测试比作“神秘的艺术”。换句话说，相对数字设计的系统化，模拟设计似乎更易迷惑并更基于本能感觉。而且，模拟测试有时好像更加依赖于一些虚幻的东西，而不是实实在在的电气特性。这些关于模拟电路的想法通常只会发生在一个人不熟悉创造高性能模拟电路所必需的基础知识的情况下。本书的一个主要目标就是帮助去除模拟集成电路设计的神秘感。作者相信：如果熟悉了最重要的设计原则，大多数有经验的电气工程师都能够开发出良好的设计。我们试图在全书中强调这些原则。在本书中虽然叙述了许多电路和技术，但我们的论述重点是那些要实现先进的模拟电路所涉及的最重要、最基本的原理。贯穿于整本书，我们给出了物理上和直觉上的解释，而且，虽然对许多电路进行了数学上的定量分析，但我们也努力做到：既要见树木又要见森林。换句话说，本书试图阐明关键的基础概念，而不是一味纠缠在乏味且过度复杂的电路分析中。

预期读者

本书主要用作高等院校的研究生教材和实践工程师的参考书，但其中的部分内容对于高年级本科生的课程也是有用的。为了理解本书的内容，读者最好已经至少学习过一门模拟电路的入门课程。特别要注意的是，读者应该熟悉小信号分析的概念并了解基本的晶体管放大器电路。而且，读者应能熟练运用频率知识(即应该熟悉拉普拉斯变换)并尽可能掌握一些离散时间信号的知识。

在一门研究生课程里，本书可以有許多使用方式。本书的各章大都有意地相互独立，这样可以阅读一些章而跳过其他的章。而且，读者可以发现：本书的内容顺序可以轻易改变。例如，如果读者具备良好的建模背景知识，就可以跳过第 1 章；如果读者熟悉离散时间信号的知识，第 9 章就可以仅作为一次复习。我们相信这本教材的这种灵活性。

在多伦多大学，我们在几门课程中采用了本书中的内容。在一个高年级本科生的模拟电路课程中，讲授了第 1、3、4、5 章，还有第 6、7 章中简要介绍的基础知识和相关主题。在另一个高年级本科生的模拟滤波器课程中，在介绍滤波器基础知识后，讲述第 9 章和第 10

章的滤波器部分。在一个一年级研究生课程中，我们选用了第1~3章和第5~7章的内容；而在一个二年级研究生课程（通常和一年级课程同时进行中），我们选用了第4、8~10、16章。第9、10和15章目前用在一个单独的研究生课程里，叙述关于高级模拟滤波器的其他内容，而第11~14章（加上期刊杂志）被用于一个数据转换器课程。此外，我们经常毫不费劲地修改内容选择和顺序。需要注意的是，一些章既可用于本科生课程又可用于研究生课程，因为许多研究生并没有学习过这些大学本科课程。

本书的第二类读者是那些毕业不久、希望迅速提高其现代模拟电路设计技术知识的电气工程师。事实上，本书覆盖的许多内容是在工程师短期进修课程中最初讲授并经过了多年精炼的。对于这类读者，我们努力强调在设计各种各样电路时需要考虑的最重要的因素，而且我们也设法包含现代优秀设计的范例和可供深入学习的参考资料。

内容概要

第1章叙述三种集成器件——二极管、MOSFET晶体管和双极型晶体管——的基本物理行为和模型。在这里，引出许多模型方程，以便让读者了解模型参数以及它们如何随过程进展而受影响。并以表格形式总结这三种器件的模型，便于快速查询。

第2章讨论制造一个微型电路相关的问题。重点放在CMOS构造，给出了一般过程的细节，提出了关于模拟电路规划和设计的原则，其中匹配和噪声考虑是重要问题。这一章以对被称为闩锁(latch-up)的破坏现象的描述结束。

第3章讨论模拟集成电路的基础结构单元。特别是，介绍了MOS镜像电流源和单级放大器。这里要注意的一点是，只考虑有源负载放大器，因为在集成电路中这些类型的放大器比其他类型出现得多。第3章最后一节介绍这一章中所选范例的SPICE仿真结果。

第4章讨论噪声分析和模型。这里，我们假设读者以前没有学习过随机信号分析，因而首先给出分析随机信号的基本概念。然后，为基本电路元件给出噪声模型。最后，从噪声的角度分析了各种电路，给读者一些噪声分析的体验。

第5章介绍基本运算放大器设计的基本原理。为了说明这些原理，本章详尽地讨论一种经典的两级CMOS运算放大器的设计。本章还介绍一种系统校正的方法，它也应用于许多其他运算放大器的设计。这里还讨论使补偿和跨导值很稳定的方法。最后，这一章以所选范例的SPICE仿真结果结束。

第6章的开始部分介绍两个可用于低功耗运行和短沟道工艺的高级的镜像电流源方法。接着，讨论两个现代高速运算放大器，其后介绍全差动设计技术和共模反馈电路。这些全差动运算放大器被用于许多现代工业应用中，其中，高速度和噪声是需要考虑的重要问题。然后，讨论电流反馈运算放大器，它们的主要优势是：当闭环增益发生改变时，它们能够维持相对不变的频带宽度。这一章再次以范例的SPICE仿真结果结束。

第7章讨论比较器的设计。比较器大概是仅次于运算放大器的第二常见的模拟结构单元。这里，叙述比较器的现实局限性和提高其性能的电路技术，而且还介绍现代高速比较器的范例。

第8章论述一些辅助模拟结构单元。特别是，首先介绍采样保持电路，然后是带隙电压基准，最后以双极型跨导线性增益和乘法器电路结束。在这一章的末尾，所有主要的模拟结

构单元都已经介绍完毕，本书剩下的部分论述的是更系统级的模拟单元。

第9章介绍离散时间信号和滤波器的基础知识。这部分内容对于理解像开关电容滤波器和过采样转换器这样的现代模拟电路非常必要。这里采用的方法是通过说明Z变换和拉普拉斯变换之间的紧密关系，增加读者在连续时间领域的知识和经验。

第10章介绍开关电容器的基础知识。开关电容器技术由于其高精度和线性度，是实现集成滤波器的最常用方法。这一章最后介绍其他开关电容器电路，例如增益级、调制解调器、压控振荡器。

第11章论述数据转换器的基础知识。首先讨论理想的转换器，并说明在D/A转换器中没有量化噪声，但它对A/D转换器是基本的限制。接着阐述有符号码，最后讨论性能极限。

第12章介绍常见的奈奎斯特速率D/A架构，第13章讲述实现奈奎斯特速率A/D转换器的各种方法。在今天的大规模数字世界中，数据转换的重要性再怎么强调也不为过，这两章讨论许多现代方法的主要优势和设计问题。

第14章单独介绍过采样转换器，原因在于需要大量的信号处理概念来说明这些转换器。在这里，因为适当地设计这些类型的转换器还需要相当全面的系统知识，所以还会介绍一些数字上的问题(例如采样滤波器)。此外，还讨论实际问题 and 近期出现的新方法(例如多位转换的使用)。本章最后列举一个三阶A/D转换器的例子。

时序滤波器目前应用于许多新产品，尤其是在高速数据通信应用中，这些内容是第15章的焦点。接着，介绍双极、CMOS和BiCMOS方法，然后是一些调谐方法。最后，论述时序滤波器的动态范围测量方面的问题，例如THD、无失真动态范围、三阶截点。

最后，第16章讲述锁相环路。在许多数字和数据通信电路中，锁相环路是时钟恢复的必需部分。这里，介绍了这种系统的基本概念和一种仿真技术。

致谢

作者要感谢许多参与短期课程的同事们，本书的大部分内容就是在这些课程中最初讲解和不断精炼的。特别要感谢的是Gabor C. Temes以及Jim McCreary和Bill Black。此外，作者还要感谢的是，本书中的许多内容和概念源于许多实践工程师多年的工作经验，这在本书中每一章结尾处的参考文献中都已提到。本书尽可能引用原始概念的适当参考，但是，作者在模拟电路领域已经工作了太长时间以致于常会忘记重要概念的原始出处。因此，对于任何遗漏，作者在此诚恳地表示歉意。

目 录

译者序

前言

第 1 章 集成电路器件和模型	1
1.1 半导体和 pn 结	1
1.1.1 二极管	2
1.1.2 反向偏置二极管	3
1.1.3 缓变结	5
1.1.4 大信号结电容	6
1.1.5 正向偏置结	8
1.1.6 正向偏置二极管的结电容	9
1.1.7 正向偏置二极管的小信号模型	9
1.1.8 肖特基二极管	10
1.2 MOS 晶体管	11
1.2.1 MOS 晶体管符号	12
1.2.2 基本运算	13
1.2.3 大信号模型	17
1.2.4 体效应	19
1.2.5 p 沟道晶体管	19
1.2.6 工作区中的小信号模型	20
1.2.7 三极管和截止区中的小信号模型	25
1.3 高级 MOS 模型	27
1.3.1 短沟道效应	27
1.3.2 亚阈值作用	28
1.3.3 漏电流	29
1.4 双极结晶体管	29
1.4.1 基本运算	30
1.4.2 大信号模型	32
1.4.3 工作区中的基极电荷存储	33
1.4.4 一个饱和晶体管的基极电荷存储	33
1.4.5 小信号模型	35
1.5 器件模型总结	39
1.6 SPICE 模型参数	42
1.6.1 二极管模型	43
1.6.2 MOS 晶体管	43
1.6.3 双极结晶体管	45
1.7 附录	46

1.7.1 二极管指数关系	46
1.7.2 二极管扩散电容	47
1.7.3 MOS 阈值电压和体效应	48
1.7.4 MOS 三极管关系	50
1.7.5 双极型晶体管指数关系	52
1.7.6 一个有源 BJT 的基极电荷存储	54
1.8 参考文献	54
1.9 习题	54
第 2 章 工艺和布局	57
2.1 CMOS 工艺	57
2.1.1 硅片	57
2.1.2 光刻法和阱区定义	57
2.1.3 扩散和离子注入	59
2.1.4 化学气相沉积法和定义工作区	60
2.1.5 场植入层和场氧化层	61
2.1.6 生成场氧化层	61
2.1.7 栅极氧化层和阈值电压调整	62
2.1.8 多晶硅栅极的形成	63
2.1.9 植入结、沉淀 SiO_2 、打开接触孔	63
2.1.10 退火、沉淀和制模金属及玻璃罩沉淀	64
2.2 双极工艺	66
2.3 CMOS 布局和设计准则	67
2.4 模拟布局考虑	74
2.4.1 匹配问题	74
2.4.2 晶体管布局	75
2.4.3 电容器匹配	76
2.4.4 电阻布局	79
2.4.5 噪声问题	81
2.5 锁存现象	83
2.6 参考文献	85
2.7 习题	86

第 3 章 镜像电流源和单级放大电路基础	89
3.1 简单 CMOS 镜像电流源	89

3.2 共源放大器	91	4.3 电路元件的噪声模型	137
3.3 源极跟随器或共漏放大器	92	4.3.1 电阻	138
3.4 共栅放大器	93	4.3.2 二极管	138
3.5 源极退化镜像电流源	95	4.3.3 双极型晶体管	138
3.6 高输出阻抗镜像电流源	97	4.3.4 MOSFET	140
3.6.1 共射共基镜像电流源	97	4.3.5 运算放大器	141
3.6.2 威尔逊镜像电流源	98	4.3.6 电容和电感	141
3.7 共射共基增益级	99	4.3.7 采样信号噪声	142
3.8 MOS 差动对和增益级	100	4.4 噪声分析举例	143
3.9 双极镜像电流源	103	4.4.1 运放举例	143
3.10 双极增益级	104	4.4.2 双极共发射极举例	145
3.10.1 射极跟随器	105	4.4.3 CMOS 举例	147
3.10.2 双极差动对——大信号	106	4.4.4 光纤前置放大电路 举例	148
3.10.3 双极差动对——小信号	107	4.5 参考文献	151
3.11 频率响应	108	4.6 习题	151
3.11.1 共源放大器	108		
3.11.2 源极跟随器放大器	110	第 5 章 基本运算放大器设计和 补偿	155
3.11.3 共栅放大器	114	5.1 二级 CMOS 运算放大器	155
3.11.4 高输出阻抗镜像电路	114	5.1.1 运算放大器增益	156
3.11.5 共射共基增益级	114	5.1.2 频率响应	158
3.12 SPICE 仿真范例	118	5.1.3 转换速率	159
3.12.1 例 3.2 的仿真	118	5.1.4 系统偏移电压	160
3.12.2 例 3.3 的仿真	118	5.1.5 n 沟道或者 p 沟道输入级	161
3.12.3 例 3.8 的仿真	119	5.2 反馈和运算放大器补偿	162
3.12.4 例 3.9 的仿真	120	5.2.1 闭环放大器的一阶模型	163
3.12.5 例 3.10 的仿真	121	5.2.2 线性建压时间	164
3.12.6 例 3.11 的仿真	122	5.2.3 运算放大器补偿	165
3.13 参考文献	123	5.2.4 补偿二级运算放大器	167
3.14 习题	123	5.2.5 超前补偿	170
第 4 章 噪声分析与模型建立	127	5.2.6 进行独立于工艺和温度的 补偿	172
4.1 时域分析	127	5.2.7 偏置一个运算放大器获得 稳定跨导	174
4.1.1 均方根值	128	5.3 SPICE 仿真范例	175
4.1.2 信噪比	128	5.4 参考文献	177
4.1.3 单位 dBm	128	5.5 习题	177
4.1.4 噪声混叠	129		
4.2 频域分析	130	第 6 章 高级镜像电流源和运算 放大器	179
4.2.1 噪声谱密度	130	6.1 高级镜像电流源	179
4.2.2 白噪声	132	6.1.1 宽幅镜像电流源	179
4.2.3 $1/f$ 噪声(或闪烁噪声)	132	6.1.2 宽幅恒定跨导偏置电路	181
4.2.4 滤波噪声	133		
4.2.5 噪声带宽	134		
4.2.6 噪声的分段积分	136		
4.2.7 $1/f$ 噪声的不相关原理	136		

6.1.3 增强输出阻抗镜像电流源	182	8.7 跨导线性增益单元	256
6.1.4 带增强输出阻抗的宽幅镜像 电流源	184	8.8 跨导线性乘法器	257
6.1.5 镜像电流源符号	185	8.9 参考文献	259
6.2 折叠式共射共基运算放大器	186	8.10 习题	260
6.2.1 小信号分析	188	第9章 离散时间信号	263
6.2.2 转换速率	189	9.1 信号频谱概述	263
6.3 镜像电流源运算放大器	191	9.2 离散时间信号的拉普拉斯变换	263
6.4 线性建压时间回顾	194	9.3 z 变换	266
6.5 全差动运算放大器	195	9.4 下采样和上采样	267
6.5.1 全差动折叠式共射共基运算 放大器	196	9.5 离散时间滤波器	269
6.5.2 可选择的全差动运算 放大器	197	9.5.1 离散时间滤波器的频率响应	269
6.6 共模反馈电路	201	9.5.2 离散时间滤波器的稳定性	272
6.7 电流反馈运算放大器	204	9.5.3 IIR 和 FIR 滤波器	273
6.8 SPICE 仿真范例	206	9.5.4 双线性变换	273
6.8.1 例 6.2 的仿真	206	9.6 采样和保持响应	274
6.8.2 例 6.3 的仿真	208	9.7 参考文献	276
6.9 参考文献	210	9.8 习题	276
6.10 习题	210	第10章 开关电容器电路	279
第7章 比较器	213	10.1 基本构件	279
7.1 为比较器使用运算放大器	213	10.1.1 运算放大器	279
7.2 电荷注入误差	216	10.1.2 电容器	280
7.2.1 让电荷注入信号无关	217	10.1.3 开关	280
7.2.2 最小化电荷注入引起的误差	218	10.1.4 不相重叠的时钟	281
7.2.3 多级比较器的速度	220	10.2 基本运算和分析	282
7.3 锁存比较器	222	10.2.1 开关电容器的等价电阻	282
7.4 CMOS 和 BiCMOS 比较器的例子	225	10.2.2 寄生灵敏积分器	283
7.5 双极比较器的例子	230	10.2.3 寄生非灵敏积分器	286
7.6 参考文献	232	10.2.4 信号流程图分析	288
7.7 习题	233	10.3 一阶滤波器	289
第8章 采样保持、电压基准和跨导 线性电路	235	10.3.1 开关共用	292
8.1 采样保持电路的性能	235	10.3.2 全差动滤波器	292
8.2 MOS 采样保持基础	237	10.4 双四元滤波器	293
8.3 CMOS S/H 电路举例	241	10.4.1 低 Q 双四元滤波器	294
8.4 双极性和双 CMOS 采样保持	245	10.4.2 高 Q 双四元滤波器	297
8.5 带隙电压基准基础	248	10.5 电荷注入	299
8.6 带隙基准电路	251	10.6 开关电容器增益电路	302
8.6.1 双极性带隙基准	251	10.6.1 并联 RC 电路	302
8.6.2 CMOS 带隙基准	253	10.6.2 可复位增益电路	303
		10.6.3 可重置电容的增益电路	304
		10.7 相关双采样技术	306
		10.8 其他开关电容器电路	307
		10.8.1 调幅器	308

10.8.2 全波整流器	308	12.4.2 分段转换器	344
10.8.3 峰值检波器	309	12.5 参考文献	345
10.8.4 压控振荡器	309	12.6 习题	345
10.8.5 正弦振荡器	311		
10.9 参考文献	312	第 13 章 奈奎斯特速率 A/D 转换器 ...	347
10.10 习题	314	13.1 集成转换器	347
第 11 章 数据转换器基本原理	317	13.2 逐次逼近转换器	350
11.1 理想的 D/A 转换器	317	13.2.1 基于 DAC 的逐次逼近	351
11.2 理想的 A/D 转换器	318	13.2.2 单极性电荷再分配 A/D	352
11.3 量化噪声	319	13.2.3 有一个单独基准电压的有 符号电荷再分配 A/D	355
11.3.1 确定性方法	319	13.2.4 电阻器-电容器混合	356
11.3.2 随机方法	320	13.2.5 有误差修正的电荷再分配	357
11.4 有符号码	322	13.2.6 对电荷再分配转换器的速度 估计	359
11.4.1 符号数值	322	13.3 算术(或循环)A/D 转换器	360
11.4.2 1 的补码	322	13.4 瞬时(或并联)转换器	362
11.4.3 偏移二进制码	322	13.5 两级 A/D 转换器	366
11.4.4 2 的补码	323	13.6 内插 A/D 转换器	369
11.5 性能限度	323	13.7 重叠 A/D 转换器	371
11.6 参考文献	328	13.8 管道 A/D 转换器	375
11.7 习题	328	13.9 时间分解 A/D 转换器	377
第 12 章 奈奎斯特速率 D/A 转换器 ...	329	13.10 参考文献	378
12.1 基于译码器的转换器	329	13.11 习题	379
12.1.1 电阻器串转换器	329	第 14 章 过采样转换器	381
12.1.2 重叠电阻器串转换器	330	14.1 没有噪声频率成形的过采样	381
12.1.3 多电阻器串转换器	332	14.1.1 量化噪声建模	381
12.1.4 有符号输出	333	14.1.2 白噪声假设	382
12.2 二进制标度转换器	333	14.1.3 过采样的优点	383
12.2.1 二进制加权电阻器转换器	333	14.1.4 1 位 D/A 转换器的优点	385
12.2.2 减小电阻比阶梯	334	14.2 有噪声频率成形的过采样	385
12.2.3 基于 R-2R 的转换器	335	14.2.1 噪声频率成形的 Delta-Sigma 调制器	386
12.2.4 电荷再分配开关电容器 转换器	336	14.2.2 一阶噪声频率成形	387
12.2.5 电流模式转换器	337	14.2.3 一阶 A/D 转换器的开关 电容器实现	389
12.2.6 低频干扰	337	14.2.4 二阶噪声频率成形	390
12.3 温度计码转换器	338	14.2.5 噪声传递函数曲线	390
12.3.1 温度计码电流模式 D/A 转换器	339	14.2.6 1 位调制器的量化噪声功率 ...	391
12.3.2 单电源正输出转换器	340	14.2.7 错误反馈结构	391
12.3.3 动态匹配电流源	341	14.3 系统结构	392
12.4 混合转换器	343	14.3.1 Delta-Sigma A/D 转换器的 系统结构	392
12.4.1 电阻器-电容器混合 转换器	343		

14.3.2	Delta-Sigma D/A 转换器的 系统结构	394	15.4.1	CMOS 对	436
14.4	数字抽取滤波器	395	15.4.2	栅源电压的常量和	437
14.4.1	多级	395	15.4.3	与源极相连的差动对	437
14.4.2	单级	398	15.4.4	基于晶体管的跨导	438
14.5	高阶调制器	398	15.4.5	带浮动电压源的差动对	439
14.5.1	内插结构	398	15.4.6	跨组交叉的偏差漂移差动对 ..	441
14.5.2	多级噪声频率成形结构	399	15.5	双 CMOS 跨导器	442
14.6	带通过采样转换器	400	15.5.1	三极管中的可调整 MOS	442
14.7	必须考虑的实际问题	401	15.5.2	带有跨导线性乘法器的固定 电阻跨导器	443
14.7.1	稳定性	401	15.5.3	带有跨导线性乘法器的固定值 的有源 MOS 跨导器	444
14.7.2	双电平转换器的线性	402	15.6	MOSFET-C 滤波器	445
14.7.3	空闲音	404	15.6.1	双晶体管积分器	445
14.7.4	抖动	404	15.6.2	四晶体管积分器	447
14.7.5	运算放大器增益	405	15.6.3	R-MOSFET-C 滤波器	448
14.8	多位过采样转换器	405	15.7	调谐电路系统	449
14.8.1	多位随机函数发生器 D/A 转换器	406	15.7.1	调谐概述	450
14.8.2	D/A 转换器中的动态匹配 电流源	406	15.7.2	恒定跨导	451
14.8.3	数字校准 A/D 转换器	407	15.7.3	频率调谐	452
14.8.4	同时有多位和一位反馈的 A/D	407	15.7.4	Q 因子调谐	454
14.9	三阶 A/D 设计示例	408	15.7.5	基于自适应滤波的调谐方法 ..	455
14.10	参考文献	410	15.8	动态范围性能	456
14.11	习题	411	15.8.1	总谐波失真	456
第 15 章	时序滤波器	413	15.8.2	三阶截点	457
15.1	G_m -C 滤波器	413	15.8.3	无失真动态范围	460
15.1.1	积分器	413	15.9	参考文献	461
15.1.2	全差动积分器	414	15.10	习题	463
15.1.3	一阶滤波器	416	第 16 章	锁相环路	465
15.1.4	二阶滤波器	418	16.1	基本的环路架构	465
15.2	双极跨导	420	16.1.1	线性小信号分析	469
15.2.1	使用电阻器的固定跨导	420	16.1.2	捕捉范围	473
15.2.2	增益单元跨导	424	16.1.3	锁定范围	474
15.2.3	使用多个差动对的跨导	425	16.1.4	错误锁定	474
15.3	CMOS 型三极管跨导值	429	16.1.5	异或门相位比较器	474
15.3.1	采用固定偏压晶体三极管的 跨导	429	16.2	充电式相位比较器的 PLL	475
15.3.2	采用变化偏压晶体三极管的 跨导	431	16.2.1	充电式 PLL 的小信号分析	477
15.3.3	漏源电压恒定的跨导	434	16.2.2	鉴相(频)器	478
15.4	利用有源晶体管的 CMOS 跨导	436	16.3	压控振荡器	480
			16.3.1	双极型双发射极多谐 振荡器	481
			16.3.2	环形振荡器	483
			16.3.3	CMOS 张弛振荡器	487

16.4 PLL 的计算机仿真	487	16.4.4 相位/频率比较器的仿真.....	493
16.4.1 用差分方程描述持续时间 元件	488	16.4.5 完整仿真	493
16.4.2 VCO 的差分方程模型	490	16.5 附录	493
16.4.3 环路滤波器的差分方程模拟 ...	491	16.6 参考文献	496
		16.7 习题	497

第 1 章 集成电路器件和模型

本章介绍半导体器件的工作原理和模型。虽然运用半导体器件模型的基本知识可以进行简单集成电路的设计,但是,对于高速高技术水平的相关设计,对器件工作原理和模型的二阶效应的深入理解则显得非常关键。

在此假定大多数读者在以前的课程中已经学习了晶体管和它们的模型,所以在本章中仅就半导体的基本概念进行简单回顾。1.1 节介绍 pn 结(即二极管),本节的内容很重要,有助于读者理解许多器件模型中的寄生电容(例如结电容)。1.2 节论述 MOS 晶体管和模型。需要注意的是,本节在一定程度上依赖于前面 1.1 节中提到的耗尽层电容方面的内容。1.4 节阐述双极结型晶体管和模型。1.5 节对器件模型和一些重要方程进行总结。这个总结对于已经具备较完备晶体管模型相关背景知识的读者尤其有用,因为这一部分可以用于理解贯穿于本书其他部分的符号。此外,1.5 节还简要介绍用于 SPICE 模型最重要过程的相关参数。最后,附录中给出更多基于物理知识的器件方程的推导。

1.1 半导体和 pn 结

半导体是一个晶体点阵结构,具有自由电子(带负电)和/或者自由空穴(由于缺少电子,相当于正载流子)。使用的这类半导体中具有代表性的是硅(通常称作沙)。这种元素为 4 价,即在形成晶阵共价键时,每个原子要与邻近的原子共用四个自由电子。本征硅(即纯净的硅)是具有相同数量自由电子和空穴的纯净的晶体结构。这些自由载流子是那些由于热激发获得足够的能量而脱离共价键束缚的自由电子或空穴。在室温下,每立方厘米大约有 1.5×10^{10} 个载流子,或者是相当于每立方米有 1.5×10^{16} 个载流子。载流子的数目大约随温度每升高 11°C 就翻一倍。

如果硅带有五价的杂质(即五价的元素,相当于和邻近的原子结合时在外电子层有五个电子可以使用),几乎每个杂质原子都会有一个额外的自由电子[○]。这些自由电子可以用来传导电流。通常认为,五价的杂质为硅晶体贡献出自由电子,这样杂质就被称为施主。施主元素例如磷(P)和砷(As),这些杂质也被称为 n 型杂质,因为由于使用了这种杂质,使得这些自由载流子带负电。当使用了 n 型杂质后,负载流子或者电子的总数几乎与杂质浓度相等,要远远大于本征硅的自由电子的数目。换句话说,

$$n_n = N_D \quad (1-1)$$

其中, n_n 是指 n 型物质中的自由电子浓度, N_D 是指杂质浓度(下标 D 代表施主)。另一方面, n 型物质中的自由空穴的数量要比本征硅中的数量少得多,可由下式表示出来[Sze, 1981]

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (1-2)$$

这里, n_i 是本征硅中的载流子浓度。

同样地,如果硅中掺入三价原子,例如硼(B),正载流子或者空穴的浓度 p_p 将近似等

○ 实际上,由于杂质的一部分自由电子与空穴重新组合,移动的载流子要比杂质原子的数量略少。但是,由于本征硅中空穴的数量要比一般的杂质浓度少得多,因此误差是很小的。

于受主的浓度 N_A

$$p_p = N_A \quad (1-3)$$

而且 p 型硅中的负载流子的数目 n_p 如下式

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (1-4)$$

- 例 1.1 本征硅中掺入了杂质硼，浓度为 10^{26} 个原子/ m^3 。室温下，得到的杂质硅中空穴和电子的浓度分别为多少？假设 $n_i = 1.5 \times 10^{16}$ 个载流子/ m^3 。

解：空穴浓度 p_p 将近似等于杂质浓度，($p_p = N_A = 10^{26}$ 个空穴/ m^3)。电子浓度由式(1-4)可知为

$$n_p = \frac{(1.5 \times 10^{16})^2}{10^{26}} = 2.3 \times 10^6 \text{ 电子 } / \text{m}^3 \quad (1-5)$$

这种杂质硅被称为 p 型，因为他的自由空穴要比自由电子多得多。

1.1.1 二极管

要得到一个二极管，也就是 pn 结，半导体的一部分是 n 型杂质半导体，与其相连的另一部分是 p 型杂质半导体，如图 1-1 所示。在 p^+ 区和 n 区之间形成二极管或者结。需要注意的是，上标表明相对的掺杂的等级。例如， p^- 区可能浓度为 5×10^{21} 个载流子/ m^3 ，而 p^+ 和 n^+ 区浓度要高一些，达到 10^{25} 到 10^{27} 个载流子/ m^3 。而且要注意，二极管的金属连接(在这个例子是铝)是与高浓度区域连通而不是与低浓度区域连通；否则就会出现肖特基二极管。因此，为了不形成肖特基二极管，与 n 区的连接实际上是通过 n^+ 区。

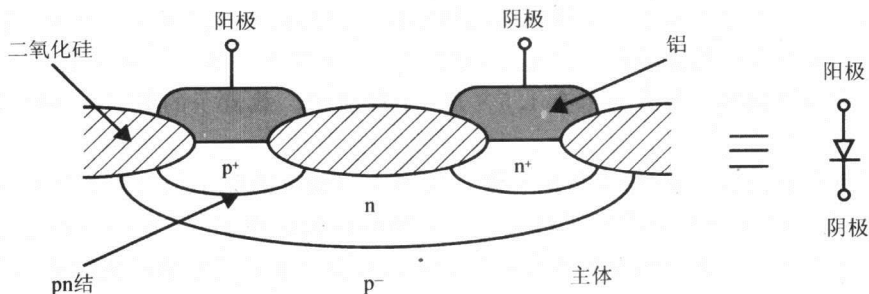


图 1-1 pn 二极管横截面

在 p^+ 这边就得到了大量的自由正载流子，而在 n 一边则得到了许多自由负载流子。 p^+ 区的空穴将分散或扩散到 n 区，而 n 区的自由电子将扩散到 p^+ 区，这个过程非常类似两种气体自由扩散的过程。这种扩散降低了两边之间区域的自由载流子的浓度。当两种类型载流子扩散到一起时，它们再重新结合。每个从 n 区扩散到 p 区的电子留下，在靠近过渡区的地方绑定一个正电荷。与此类似，每个从 p 区扩散的空穴也在靠近过渡区的地方绑定一个电子。结果如图 1-2 所示。这种自由载流子的扩散使得结的两边没有自由载流子存在，形成耗尽区，在耗尽区， p^+ 这边只有负载流子，而 n 一边只有正载流子。在结两边，未绑定的或绑定的电荷总数必然相等，这样才能使整体电荷成中性。这种要求使得耗尽区在较低浓度的 n 这边要比 p^+ 一边延伸得更多一些。

当这些绑定的电荷被释放时，就会形成从 n 极到 p 极的电场。这种电场通常称为结的内

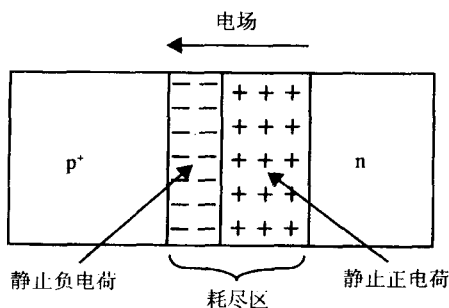


图 1-2 一个二极管的简化模型。注意，结由于扩散形成耗尽区，并向较低浓度的一边延伸得多一些

建电势。内建电势阻止自由载流子的扩散，直至开路稳定状态下不再有电荷的净运动。一个开路 pn 结的内建电势由 Sze[1981]给出：

$$\Phi_0 = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (1-6)$$

其中

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (1-7)$$

T 指热力学温度(在室温下 $\approx 300\text{K}$)， k 指玻耳兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}$)， q 是一个电子的电荷 ($1.602 \times 10^{-19} \text{C}$)。在室温下， V_T 约等于 26mV 。

- **例 1.2** 一个 pn 结， $N_A = 10^{25}$ 个空穴/ m^3 ， $N_D = 10^{22}$ 个电子/ m^3 。相应的内建电势为多少？假设 $n_i = 1.5 \times 10^{16}$ 个载流子/ m^3 。

解：根据式(1-6)，可以得到

$$\Phi_0 = 0.026 \times \ln \left(\frac{10^{25} \times 10^{22}}{(1.5 \times 10^{16})^2} \right) = 0.88\text{V} \quad (1-8)$$

这是具有一边较高杂质浓度的 pn 结的内建电势的一个典型值。一般，我们将对有一边较高杂质浓度的 pn 结中的内建电势，使用 $\Phi_0 \approx 0.9\text{V}$ 。

1.1.2 反向偏置二极管

一个硅二极管的阳极-阴极(即 p 极到 n 极)电压如果不大于 0.4V ，那么它并不能产生明显的电流，这种情况称为反向偏置。如果一个二极管处于反向偏置状态，那么电流主要是由于耗尽区热激发的载流子引起的，这种电流非常小。虽然这种反向偏置电流与外加电压的关系并不明显，但反向偏置电流却与二极管的结面积成比例关系。需要注意的是二极管结电容的影响是不容忽视的，尤其是在高频条件下。在反向偏置的二极管中，这种结电容是由于耗尽区中变化的电荷存储引起的，称为耗尽电容。

要求出耗尽电容，我们首先要明白耗尽宽度和外加反向电压 V_R [Sze, 1981]之间的关系。

$$x_n = \left[\frac{2K_s \epsilon_0 (\Phi_0 + V_R)}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)} \right]^{1/2} \quad (1-9)$$

$$x_p = \left[\frac{2K_s \epsilon_0 (\Phi_0 + V_R)}{q} \frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)} \right]^{1/2} \quad (1-10)$$