

高频集成电路设计

[加] 索兰·尼瓦格斯库 (Sorin Voinigescu) 著
多伦多大学

叶凡 任俊彦 等译

*High-Frequency
Integrated Circuits*

**High-Frequency
Integrated Circuits**

Sorin Voinigescu



机械工业出版社
China Machine Press

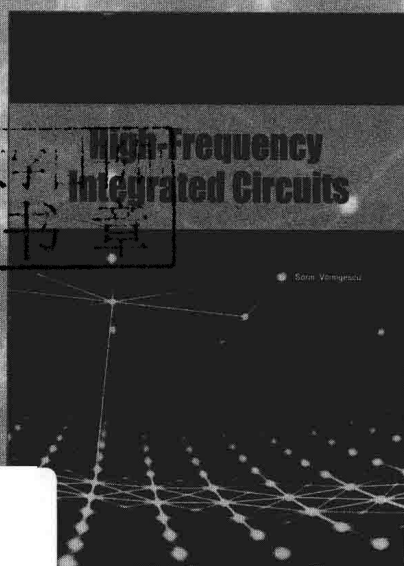
高频集成电路设计

[加] 索兰·尼瓦格斯库 (Sorin Voinigescu) 著
多伦多大学

叶凡 任俊彦 等译

*High-Frequency
Integrated Circuits*

常州大学
藏书章



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

高频集成电路设计 / (加) 索兰·尼瓦格斯库 (Sorin Voinigescu) 著; 叶凡等译. —北京: 机械工业出版社, 2018.6

(国外电子与电气工程技术丛书)

书名原文: High-Frequency Integrated Circuits

ISBN 978-7-111-60102-9

I. 高… II. ①索… ②叶… III. 高频—集成电路—电路设计 IV. TN402

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 118362 号

本书版权登记号: 图字 01-2016-3135

This is a Chinese simplified edition of the following title published by Cambridge University Press: Sorin Voinigescu, High-Frequency Integrated Circuits, 978-0-521-87302-4.

© Cambridge University Press 2013.

This Chinese simplified for the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press and China Machine Press in 2018.

This Chinese simplified is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorized export of this simplified Chinese is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and China Machine Press.

本书原版由剑桥大学出版社出版。

本书简体字中文版由剑桥大学出版社与机械工业出版社合作出版。未经出版者预先书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

此版本仅限在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 销售。

本书从晶体管级设计的角度, 针对 2~200GHz 的无线和宽带系统, 对高速高频单芯片集成电路进行了详细的介绍。本书内容涵盖高速、射频、毫米波和光纤等电路类型, 其实现方式包括纳米尺度 CMOS、SiGe BiCMOS、III-V 族化合物等半导体工艺。本书提供分步骤的设计方法, 几乎每章末尾都有习题、仿真和设计案例, 是高年级本科生和研究生在电路设计方面理想的参考书。

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: 张梦玲

责任校对: 殷虹

印刷: 北京市荣盛彩色印刷有限公司

版次: 2018 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 37

书号: ISBN 978-7-111-60102-9

定价: 139.00 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: hzsj@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

出版者的话

文艺复兴以来,源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范,使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势;也正是这样的传统,使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中,美国的产业界与教育界越来越紧密地结合,信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线,由此而产生的经典科学著作,不仅擘划了研究的范畴,还揭示了学术的源变,既遵循学术规范,又自有学者个性,其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年,在全球信息化大潮的推动下,我国的信息产业发展迅猛,对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇,也是挑战;而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下,美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此,引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用,也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始,我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力,我们与Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer等世界著名出版公司建立了良好的合作关系!从他们现有的数百种教材中甄选出Alan V. Oppenheim、Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Hassan K. Khalil、Gene F. Franklin、Rex Miller等大师名家的经典教材,以“国外电子与电气技术丛书”和“国外工业控制与智能制造丛书”为系列出版,供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑,并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑,这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科、自动化、人工智能等建设的不断完善和教材改革的逐渐深化,教育界对国外电气与电子信息类、控制类、智能制造类等相关教材的需求和应用都将步入一个新的阶段,我们的目标是尽善尽美,而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正,我们的联系方式如下:

华章网站: www.hzbook.com

电子邮件: hzjsj@hzbook.com

联系电话: (010)88379604

联系地址: 北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码: 100037



华章科技图书出版中心

写在前面

本书从晶体管级设计的角度, 针对 2~200GHz 的无线和宽带系统, 对高速高频单芯片集成电路进行了详细的介绍。本书内容涵盖了高速、射频、毫米波和光纤等电路类型, 其实现方式包括纳米尺度 CMOS、SiGe BiCMOS、III-V 族等半导体工艺。本书提供了分步骤的设计方法、习题、仿真和设计案例, 是高年级本科生和研究生在电路设计方面理想的参考资源。通过对器件-电路结构间的交互和优化的详细分析, 本书希望能使电路设计者、学生深入理解器件结构和工艺限制对电路性能的影响, 并为教师提供了在线课程讲义、学生实验、设计案例以及习题解答, 见 www.cambridge.org/voinigescu。

- 描述了高速电路设计的分步骤设计方法, 以及实现最佳器件和电路性能的版图技术。
- 包含 100 道以上的章末习题以及大量案例和解答, 帮助读者理解内容。
- 包括基于实际应用场景的器件、电路仿真以及设计实验, 采用先进 SiGe BiCMOS 或纳米尺度 CMOS 工艺。

Soren Voinigescu, 多伦多大学教授, 其科研和教学专注于纳米尺度半导体器件及其在 300GHz 以上集成电路中的应用, 获得过 2001 年 IEEE Custom Integrated Circuits Conference、2005 年 IEEE Compound Semiconductor IC Symposium(CSICS)最佳论文奖, 以及 2008 年 IEEE International Solid State Circuits Conference(ISSCC)的 Beatrice Winner Award, 并是 Quake Technologies, Inc. 的联合发起人。其学生获得过 2004 年 VLSI Symposium、2006 年 RFIC Symposium 以及 2008 年和 2012 年 International Microwave Symposia 的学生论文奖。

推 荐 语

“Voinigescu 教授的著作必定会成为高频 RFIC 设计领域的经典参考书。本书综合涵盖了集成电路与系统的各个方面，包括基本电路设计技术、系统分析、封装技术以及测试，具有独到的教学价值，并展示了微波和毫米波领域片上系统的最新进展。”

Gabriel M. Rebeiz, California 大学, San Diego

“本书来自于 Sorin Voinigescu 在集成电路与设计领域的丰富经验，涵盖了高频集成电路的广阔领域，包括基于先进硅和 III-V 族工艺的设计。无论是本领域有经验的设计师还是新手都会受益于本书。我对大量设计诀窍的细节——通常与底层的 IC 工艺相联系——深感兴趣，这些技巧在相关教材中极少出现。”

Piet Wambacq, Brussels 大学和 IMEC

“本书围绕器件、电路、系统和应用进行理性及全面综合展开，Sorin Voinigescu 的这本书是关于深入理解高速和高频微电子设计的独一无二的百科全书式‘辞典’。”

“本书具有原创性且深入详细，明确地聚焦于当今设计的挑战，从根本上去除了一些制约高频集成电路研发的教条，是具有前瞻性的可指引新一代技术发展道路的难得佳作。”

Domenico Zito, College Cork 大学

“本书是有志于接受 RF 电路设计挑战的电路设计师的理想读物。Sorin Voinigescu 教授带领读者从系统层面一直深入到晶体管，向读者展示了 RF 电路设计师在电路分析中的直觉。”

James Buckwaler, California 大学, San Diego

译者序

电磁波自发现以来就被应用于信息通信和探测雷达。随着集成电路的高速发展和人们对快速通信的迫切需求, 2G/3G/4G 等低频段的无线电频谱已趋饱和, 未来无线通信势必在更高频段开发新的无线电频谱资源。毫米波频率范围定义为 $30\sim 300\text{GHz}$, 目前仍有很大的利用空间。毫米波通信应用具有以下优点: (1) 频带宽, 可以大幅提升数据传输容量; (2) 波束窄, 可以实现点对点的方向性通信; (3) 波长短, 天线等元器件尺寸可缩小至适合芯片级集成。由于毫米波通信技术的上述优点, 可以有效解决高速宽带网络目前所面临的许多问题, 所以在短距离无线通信中有着广泛的应用前景, 例如 5G 毫米波通信。此外, 毫米波成像和汽车雷达也是毫米波集成电路的应用热点。

毫米波集成电路可以采取不同的工艺技术加以实现。在目前的工艺节点下, 14nm CMOS 工艺的晶体管截止频率已经超过 700GHz 。作为业界主流技术方案, CMOS 工艺的更新速度更快, 截止频率更高, 工艺集成度更好, 功耗也更低, 但在大功率、低噪声等方面, 其他工艺仍有一定的优势。总体而言, 毫米波射频集成电路的工艺选择和电路设计仍处于百花齐放的阶段。

Soren Voinigescu 教授所著的这本书针对从数吉赫兹(GHz)到数百吉赫兹范围的射频系统, 详细介绍了高速高频集成电路的分析和设计, 其内容涵盖高速电路、射频电路、毫米波电路和光纤电路等电路类型, 实现工艺包括纳米尺度 CMOS、SiGe BiCMOS、III-V 族化合物半导体等集成电路工艺。相对于其他射频集成电路类专著, 本书具有以下特点: (1) 更为关注毫米波频段的集成电路设计, 例如本书介绍 60GHz 射频收发机和 77GHz 汽车防撞雷达的集成电路设计实例; (2) 集成电路实现方案覆盖硅到化合物半导体, CMOS 到 HBT, SOI 到 FinFET 等各种工艺和器件类型; (3) 详细介绍元器件建模和版图设计方法, 这对于射频集成电路极为关键, 而其他同类书籍缺乏这方面的详细描述; (4) 从工程角度出发, 给出了大量设计实例。因此, 本书不仅可以作为本专业高年级本科生和研究生的教学参考教材, 也适合从事相关领域科研工作和工程开发的技术人员的参考资料。

本书由复旦大学微电子学院、专用集成电路与系统国家重点实验室的叶凡副研究员和任俊彦教授负责完成翻译。在本书翻译过程中, 实验室博士和硕士研究生, 包括马顺利、刘文娟、魏东、陈迟晓、陈勇臻、魏蒙、周光耀、陈沂、穆敏宏、王玮臻、徐晨辉、王晶晶、胡航、李倩倩、戴志远、曹伏飏、黄松林、周文吉、陈肖蒙等, 参与了部分章节的翻译和校对工作, 为本书翻译做出了诸多贡献, 在此表示衷心的感谢。由于译者水平有限, 若本书存在错误或不妥之处, 敬请读者指正。

叶凡 任俊彦

于复旦大学

2018 年 3 月

随着 GaAs MESFET 和 p-HEMT(pseudomorphic High Electron Mobility Transistor) IC 工艺的出现,单片微波集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)于 20 世纪 70 年代末 80 年代初诞生,并且在 20 世纪 90 年代中后期,随着硅晶体管的性能可满足 1GHz 以上的射频应用,MMIC 得到了进一步蓬勃发展。自那时起,CMOS、SiGe BiCMOS 以及 III-V 族 HEMT 和异质结双极型晶体管(Heterojunction Bipolar Transistor, HBT)工艺向纳米尺度缩小,以及截止频率(f_T)与振荡频率(f_{MAX})向太赫兹(THz)频段提高的趋势,持续至今。尽管 CMOS 获得了主导地位,但其他工艺仍然在高速、RF、微波和毫米波领域占据着一席之地。现今的纳米尺度三维鳍栅 MOSFET 可谓原子结构和应力工程方面的里程碑,与 SiGe HBT 或 III-V 族器件相比,采用了更独特的材料、异质结和化合物。实际上,InGaAs 和 Ge 可望在未来 5~10 年在“标准”数字 CMOS 工艺中代替硅沟道。因此,与过去相比,对高频电路设计师而言,一个非常重要的要求是需要熟悉所有高频器件工艺。

CMOS 作为可靠的 RF 工艺已经得到广泛认可。除此以外,在过去十年间,“数字-RF”结合的理念快速改变了高频电路的设计方法。传统 RF 模块,例如低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)、压控振荡器(Voltage-Controlled Oscillator, VCO)、功率放大器(Power Amplifier, PA)、移相器以及调制器等,都从这一数字与微波技术的结合中受益,并且该技术在毫米波频段将继续发挥重要作用。目前已经出现了包含大量数字模块的射频收发机,其架构基于直接 RF 调制器、IQ 功率 D/A 转换器,全数字 PLL 以及数字校正相控阵。

与日俱增的速度要求使硅器件成为适合未来毫米波应用的工艺,这些应用包括 60GHz 频段的 4Gb/s 无线 HDTV 链路、77GHz 频段的自动行车雷达,以及 94GHz 频段的有源和无源成像。基于 III-V 族的以及即将出现的硅基亚毫米波传感器和集成天线无疑将实现更多应用。类似的场景也发生在有线和光纤链路中,最近 IEEE 在研究更高频的应用,例如 110Gb/s 以太网标准化工作。

与此同时,在纳米纪元,高频模块的设计难度持续增加。尽管功耗、高频噪声系数和相位噪声性能随工艺提高而得到改善,其他关键参数,例如最大输出摆幅、线性度和器件泄露都有所恶化。更低的电源电压限制了可垂直堆叠的器件数量。从经济学的角度衡量,先进工艺高昂的掩膜成本迫使设计必须一次成功。

纳米尺度 MOSFET 展现出的行为与本教材中所描述的经典行为有很大差异。晶圆厂频繁更新高频数据,例如 f_T 或最小噪声系数(NF_{MIN}),但设计工程师如何利用这些数据进行设计?对于采用 32nm CMOS 工艺的 77GHz 设计,简单的粗略计算是否依旧可行?对于 180GHz 呢?高频 IC 模块是否存在最优方案?它们又是否可以在工艺节点间无缝缩放?这类设计方法学问题在任何教科书中都很少提及,却在某些圈子里被广为流传,并据此进行高可靠性的 RF、毫米波和有线 IC 设计,这些设计可以在不同工艺节点间,甚至在 III-

V族和硅工艺间相互移植。在纳米纪元，电路与器件性能间的关联日益重要，优秀的设计师必须熟悉和掌握这两方面的知识。

本书源自作者过去9年在多伦多大学开展的研究生高级课程中一系列的教案、作业和课程设计。尽管从基本概念出发，但这些材料深入钻研了先进IC设计方法学，阐述了具体设计技术，这些方法和技术不是显而易见的，而是源于20多年的微波、毫米波硅和Ⅲ-V族IC设计经验。对于应用于无线和宽带系统的高速、高频单片集成电路，本书概括了其设计思想，强调器件-电路结构间的交互与优化。设计理念的中心思想是“电路即晶体管”，即晶体管和电路性能的优化是携手前进的。本教材广泛涵盖高频半导体器件和IC工艺，围绕高速、低噪声、大功率以及高线性度电路中晶体管性能的最大化，深入分析CMOS FET和SiGe HBT的特性。其他器件结构，例如SOI和鳍栅三维沟道，也有所介绍，使读者能紧跟最新工艺发展。此外，本书还涵盖化合物半导体工艺(InP、GaAs、GaAsSb以及GaN)。如今，随着这些工艺与大量无线和有线产品日益结合，大量的工程师可以从这些被以往教材基本忽略的主题中获益。更多的内容，例如沟道应力工程、SiGe源-漏异质结，以及堆叠栅介质等，在最新的CMOS和Ⅲ-V族异质结FET之间进行了多方面的横向联系。

电路版图很可能决定了高速电路设计的成败。对此，本书首次涵盖使器件和电路性能两者都最大化的版图技巧。

基于器件基础，本书给出针对无线和有线模块的分步骤设计方法。电路设计从电流密度的优化偏置开始，使晶体管偏置在其峰值 f_T 、峰值 f_{MAX} 或最优 NF_{MIN} 附近。尽管当前的晶体管十分复杂，设计实例说明，简单的设计公式和手工分析不但非常关键，并且即使对于毫米波集成电路，通常也仍旧可以充分保证设计成功。书中提供了大量得到流片和测试验证的设计实例，包括双极型和FET电路实现，涵盖体硅和SOI CMOS、SiGe BiCMOS、InP、GaAs和GaN工艺。

本书还首次讨论了差分、单端，以及半电路的噪声和阻抗匹配，差分信号的稳定性问题和常见概念错误，反馈电路中的噪声，以及纳米尺度CMOS中的速度饱和等问题。

RF CMOS设计师经常抱怨模型不准确。本书首次提出，通过CMOS工艺比例缩放规则，即使缺乏晶体管模型，工程师仍然可以设计出能在偏置电流和阈值电压波动下可靠工作的CMOS高速电路。不仅如此，对工艺缩放规则的理解可以使设计在不同工艺节点间移植，而几乎不需要重新设计。

作为一种通用技术，本书描述了对MOSFET和Gilbert单元进行栅极叉指分段的方法，基于此可以为高频衰减器、开关、放大器和移相器提供多比特数字控制、校正并进行片上实时自测试。

高频IC设计既是科学，也是艺术。艺术来自于知道何时对何物如何进行近似和简化，以及知道在何种情况下可以相信何种晶体管模型、仿真或测试。这些需要通过日积月累地与经验丰富的工程师长期合作，吸取他们的错误教训，并在实验室亲手操作实验。为了对此提供支持，www.cambridge.org/voinigescu 提供了大量采用纳米尺度RF CMOS、SiGe BiCMOS和Ⅲ-V族工艺的RF、毫米波和光纤电路的实践习题和课程设计，作为补充材料。

本书共13章，由两大类内容组成：①HF IC设计基础，包括第2~5章；②HF模块

设计方法, 包括第 6~12 章。此外, 第 13 章介绍了最近的硅基毫米波片上系统(System on Chip, SoC)的实例。本书附录也提供了很多参考补充内容, 感兴趣的读者可从机械工业出版社华章公司网站(www.hzbook.com)上本书的相关页面下载。

第 1 章介绍高频集成电路的简要发展历史, 可作为阅读材料。

第 2 章概述无线、光纤和高数据率有线系统、收发机架构, 以及调制技术, 并说明其与高频 IC 设计指标的相关性。

第 3 章简要回顾多端口网络参数、S 参数, 以及 Smith 圆图, 介绍噪声温度、噪声系数、相关噪声源、噪声参数, 以及最优噪声阻抗等关键概念。随后深入探讨了多端口、负反馈和差分电路中的高频线性带噪声网络、噪声匹配带宽、最优噪声阻抗匹配的分析技术。

第 4 章关注于硅基以及 III-V 族工艺的高频场效应晶体管与异质结双极型晶体管的小信号、噪声与大信号参数、建模、优化偏置、尺寸与版图规划。4.1 节讨论 HF 电路设计必需的 FET 和 HBT 常用高频和噪声参数, 介绍噪声相关性的影响, 以及晶体管的噪声阻抗与输入阻抗不相同的物理解释。4.5 节探讨硅基集成电感、变压器、变容二极管、电容、电阻以及互连的设计与建模。如果学生具备很多的先进半导体器件知识, 则只需了解 4.1 节和 4.5 节。4.2 节、4.3 节和 4.4 节通常可作为先进电子器件这门独立的本科生/研究生课程的一部分。这些小节分别详细和深入地讨论纳米尺度 MOSFET、HBT 和 HEMT 的物理、高频和噪声等效电路, 以及版图知识。本章完整讲授完需要 2~3 次(每次两小时)课时。

第 5 章归纳了本书的上半部分内容, 对高频调谐和宽带电路的结构、阻抗匹配、带宽扩展和电路分析技术进行总结, 对高频差分电路的稳定性、共模抑制、单端到差分模式的转换进行深入分析。本章最后介绍非线性电路的通用结构和手工分析方法, 给出差分 2 倍频和 3 倍频电路作为设计实例。

第 6 章介绍另一个 HF IC, 在功率放大器中决定晶体管最优输出功率匹配的大信号阻抗, 对此模拟和数字电路设计师都不太了解。本章还介绍调谐功率放大器的基本工作原理、分类、结构, 以及分步骤分析和设计方法, 并提供基于 CMOS、GaN 和 SiGe HBT 工艺的 PA 设计实例, 其中涵盖效率增强和功率合并技术。

在第 3 章介绍的最优噪声阻抗匹配概念, 以及第 4 章介绍的最优晶体管偏置和尺寸规划技术上, 第 7 章讨论调谐低噪声放大器的指标、设计理念、结构和算法级的设计方法, 给出在不同 CMOS 工艺节点间进行 LNA 频率比例缩放与设计移植的理论与实例。

第 8 章继续讨论低噪声的主题, 介绍宽带低噪声跨阻放大器的工作原理与分析方法, 以及在光纤与有线应用中对其进行数字增益控制的方法。

第 9 章涵盖多种非线性控制电路, 主要基于开关、混合耦合器以及移相器, 电路类型包括混频器、调谐可变增益放大器、直接调制器、调谐高频 D/A(数/模)转换器。本章还介绍频率转移、镜像频率、镜像抑制、模拟和数字移相方法的基本概念, 以及非线性信号和噪声分析的方法、仿真技术, 并阐述上变频器、下变频器、数字衰减器, 以及调谐 RF D/A 转换器和调制器的分步骤设计方法, 给出频率最高达到 165GHz 的不同电路实例。

第 10 章围绕电路的非线性和低噪声, 深入分析压控振荡器, 具体讨论其指标、结构、分析和仿真技术, 以及实现相位噪声与功耗最小化的分步骤设计方法。若读者希望深入了

解相位噪声的物理起源,附录10(可从 www.hzbook.com 上查找到本书下载)中介绍的级数分析方法解释了振荡器内部噪声源是如何引起振荡器频谱载波附近部分相关噪声边带的出现。

第11章和第12章分别关注于高速逻辑门和大摆幅宽带输出驱动器的设计,介绍基于FET、HBT和FET-HBT结构的电流模逻辑(Current-Mode Logic, CML)的算法级设计方法,给出采用硅和Ⅲ-V族工艺的设计实例。第11章涵盖基于CML门的静态、动态和注入锁定分频电路。第12章讨论激光驱动器、光调制驱动器,以及应用于采用QAM和OFDM调制的40Gb/s和110Gb/s光纤网络中的宽带功率D/A转换器。

第13章综合介绍高频硅基SoC的设计流程、系统集成、隔离、仿真和验证方法,深入讨论用于短距离吉比特数据率无线通信、自动行车雷达和有源成像中的商用单芯片60GHz和77GHz相控阵收发机,以及集成了PLL、两个接收通道、集成发射和接收天线的单芯片150GHz SiGe BiCMOS收发机。

尽管本书的每个主题都是从零开始由浅入深地进行介绍,但读者最好具有半导体器件、模拟电路和微波电路的知识背景。

第2~12章可以讲授12次课,每次2~3小时的课时。第6~12章可以调整顺序,第8章和第9章需要在第7章之后讲授,第12章需要在第11章之后讲授。或者,为了使学生在课程中尽早开始设计电路,第3章的第二部分(负反馈中的噪声)以及4.5节可以放到第5和6章之后讲授。对于只关注RF的课程,第8章、第12章(甚至第11章)可以省略。

本书的撰写与过去6年授课过程同步,并更新了一些内容以跟上本领域日新月异的发展步伐。尽管尽力纠正错误,避免重复,但仍难免有错。如读者有所反馈,作者将十分感谢并及时纠正。

许多人对本书做出了直接贡献,更多人做出的贡献是间接的或者是作者不了解的,作者对此深表歉意。第2章受益于与Nir Sasson和Dr. Magnus Wiklund就60GHz无线系统指标的多次探讨。第3章中有关反馈电路噪声理论的研究来源于20世纪80年代在Bucharest的Politehnica大学电子工程系与Dan Neculoiu合作的低噪声放大器课程设计。第4章中有关FinFET和MOSFET中高频寄生的内容受益于与Intel的Dr. Ian Young和IBM的Dr. Jack Pekarik的讨论。作者特别感谢IBM的Dr. Timothy(Tod) Dickson对于第7、8和11章的贡献,其中很多插图来自其博士论文。Carleton大学的Emeritus Miles Copeland教授撰写了附录10,并耐心审阅了第10章,通过频繁的长途电话提供了大量有价值的建议。感谢法国Crolles的STMicroelectronics的Dr. Pascal Chevalier有关SiGe HBT、SiGe BiCMOS、纳米尺度CMOS工艺流程的大量讨论。第13章得到了Infineon的Dr. Herbert Knapp和Dr. Maarc Tiebout, Robert Bosch GmbH的Dr. Juergen Hasch的帮助,感谢他们提供了77GHz自动行车雷达和成像芯片组的插图素材,并仔细审阅了第13章的相关内容。Dr. Juergen Hasch还与作者当年的研究生Katya Laskin、Ioannis Sarkas、Alexander Tomkins和Lee Tarnow一起提供了第13章中有关150GHz收发机的素材。

作者当年的研究生Terry Yao、Katya Laskin、Theo Chalvatzis和Ioannis Sarkas长时间仔细审阅了本书的大量章节,提供了重要的反馈和错误更正,对其贡献和努力深表谢意。

更重要的,作者要感谢现在以及当年的研究生与本科生(基本以字母顺序排列)Tod Dickson、Paul Westergaard、Altan Hazneci、Chihoo Lee、Terry Yao、Michael Gordon、

Adesh Garg, Alain Mangan, Katya Laskin, Ken Yau, Keith Tang, Theo Chalvatzis, Sean Nicolson, Mehdi Khanpour, Shahriar Shahramian, Ricardo Aroca, Adam Hart, Alex Tomkins, Ioannis Sarkas, Andreea Balteanu, Eric Dacquay, Lee Tarnow, Valerio Adinolfi, Lamia Tchoketch-Kebir, Olga Yuryevich, George Ng, Pearl Liu, Benjamin Lai, Brian Cousins, David Alldred, Nima Seyedfathi, Nelson Tieu, Stephen Leung, Jonathan Wolfman, Michael Selvanayagam, Danny Li, Kelvin Yu, Ivan Chan, Christopher Yung, Xue Yu, 以及 Rophina Lee, 他们设计、验证和测试的大量电路与器件作为本书的实例出现, 感谢他们同意本书采用他们论文中的部分内容。

本书中大部分实验数据来自于 STMicroelectronic、Fujitsu、TSMC、Jazz Semiconductor、Nortel、Ciena、Quake Technologies、Canada Microelectronic Corporation 和 DARPA 赞助和免费提供的先进纳米级 CMOS、SiGe BiCMOS、InP HBT、GaAs p-HEMT 和 InP HEMT 工艺, 作者同时还感谢 Canada Microelectronic Corporation 提供的部分仿真工具。

本人深深感谢我的同事和工业界的合作者多年来的支持、探讨和合作。特别感谢 STMicroelectronic 的 Bernard Sautreuil、Rudy Beerken, Pascal Chevalier、Alain Chantre、Patrice Garcia、Gregory Avenier、Nicolas Derrier、Didier Celi、Andreia Cathelin 和 Didier Belot, Jazz Semiconductor 的 Paul Kempf(目前在 RIM 公司)和 Marco Racanille, TSMC 的 M. T. Yang, Fujitsu 的 William Walker 和 Takuji Yamamoto, Nortel 的 Peter Schvan(目前在 Ciena 公司), Quake Technologies 的 Petre Papescu、Florin Pera、Douglas McPherson、Hai Tran、Stefan Szilagyi 和 Mihai Tazlauanu, UC San Diego 的 Gabriel Pebeiz 和 Peter Asbeck, DARPA 的 Sanjay Raman, 以及 Gennum 的 Davide Lynch、Ken Martin 和 Hossein Shakiba。

Sorin Voinigescu

于多伦多

出版者的话	
写在前面	
推荐语	
译者序	
前言	

第 1 章 引言	1
1.1 无线通信、光纤与成像系统中的高频电路	1
1.2 高频集成电路简史	2
1.3 展望未来	7
1.4 高频 IC 设计工程师	9
参考文献	10
第 2 章 高频与高数据率通信系统	11
2.1 无线与光纤通信系统	11
2.2 射频收发机	11
2.3 调制技术	12
2.4 接收机架构	17
2.5 发射机架构	22
2.6 接收机指标	25
2.7 发射机指标	34
2.8 链路预算	35
2.9 相控阵	37
2.10 其他系统应用举例	43
总结	50
习题	50
参考文献	52
第 3 章 高频线性带噪声网络分析	53
3.1 二端口与多端口网络参数	53
3.2 噪声	61
3.3 二端口与多端口网络噪声	67
3.4 负反馈电路中的噪声	79
总结	92
习题	92
参考文献	93

第 4 章 高频器件	95
4.1 高频有源器件	95
4.2 纳米尺度 MOS 晶体管	110
4.3 异质结双极型晶体管	148
4.4 高电子迁移率晶体管	171
4.5 高频无源元件	185
总结	210
习题	211
参考文献	212
第 5 章 高频集成电路分析技术	216
5.1 模拟与高频电路设计对比	216
5.2 阻抗匹配	218
5.3 调谐电路的结构和分析技术	227
5.4 带宽最大化技术	232
5.5 高频差分电路的挑战	241
5.6 非线性技术	246
总结	248
习题	248
参考文献	252
第 6 章 调谐功率放大器设计	253
6.1 调谐 PA 基本原理	253
6.2 调谐 PA 的分类及相关的电压波形	255
6.3 PA 的线性调制	270
6.4 A 类 PA 的设计方法	271
6.5 PA 中的非理想因素	274
6.6 CMOS 和 SiGe HBT 毫米波 PA 设计实例	275
6.7 效率提升技术	281
6.8 功率合并技术	287
总结	291
习题	291
参考文献	294

第 7 章 低噪声调谐放大器	296	9.10 Gilbert 单元的版图	410
7.1 LNA 性能规格和评价因子	296	习题	411
7.2 调谐 LNA 的设计目标	297	参考文献	413
7.3 低噪声设计理念和原理	297	第 10 章 压控振荡器的设计	415
7.4 电感退化结构的 LNA	302	10.1 VCO 基本原理	415
7.5 功率约束的 CMOS LNA 设计	314	10.2 低噪声 VCO 结构	426
7.6 低电流 CMOS 反相器 LNA	315	10.3 VCO 仿真技术	443
7.7 低压 LNA 结构	316	10.4 VCO 设计方法	447
7.8 其他 LNA 结构	318	10.5 CMOS VCO 频率按比例缩放 和工艺移植	450
7.9 差分 LNA 设计方法	327	10.6 VCO 的版图	453
7.10 调谐 LNA 的工艺波动	328	10.7 毫米波 VCO 设计实例	454
7.11 温度波动对调谐 LNA 的影响	328	总结	458
7.12 LNA 中的低噪声偏置网络	328	习题	458
7.13 LNA 的 MOSFET 版图	330	参考文献	465
总结	330	第 11 章 高速数字逻辑	468
习题	331	11.1 高速逻辑系统	468
参考文献	336	11.2 高速数字逻辑系列	472
第 8 章 宽带低噪声放大器和跨阻 放大器	338	11.3 感性峰化	485
8.1 低噪声宽带高速数字接收机	338	11.4 电感带宽扩展	486
8.2 跨阻放大器技术指标	340	11.5 实现最大数据率的设计 方法学	487
8.3 跨阻放大器设计	342	11.6 BiCMOS MOS-HBT 逻辑	487
8.4 其他宽带低噪声放大器结构	359	11.7 伪 CML 逻辑	490
8.5 直流失调补偿和 VGA-TIA 结构	362	11.8 其他双极型、MOSCML 和 Bi- CMOS CML 以及 ECL 逻辑门	491
总结	365	11.9 分频器	493
习题	366	11.10 CML/ECL 逻辑门版图技术	499
参考文献	369	总结	503
第 9 章 混频器、开关、调制器 及其他控制电路	370	习题	503
9.1 混频器基础	370	参考文献	507
9.2 混频器指标	378	第 12 章 采用波形控制的高速 数字驱动器	509
9.3 混频器结构	380	12.1 高速数字驱动的类型	509
9.4 下变频器设计方法	392	12.2 驱动器的指标和 FoM	510
9.5 上变频器设计方法	393	12.3 驱动器架构与组成模块	514
9.6 毫米波 Gilbert 单元混频器实例	394	12.4 输出缓冲器	515
9.7 镜像抑制及单边带混频器结构	396	12.5 前置驱动器	525
9.8 混频器的仿真	401	12.6 工作在 40Gb/s 及以上的分布式	
9.9 开关、移相器和调制器	402		

输出驱动器实例	531	与 65nm CMOS 实现对比	556
12.7 高速 D/A 转换器	537	13.4 SiGe 异质结晶体管技术制造的	
总结	540	77GHz、4 通道汽车雷达收发机 ...	563
习题	540	13.5 采用 SiGe HBT 工艺的 70~	
参考文献	541	80GHz 有源成像器	567
第 13 章 SoC 实例	543	13.6 采用 SiGe BiCMOS 工艺, 带片	
13.1 高频 SoC 设计方法学	543	上天线的 150~168GHz 有源成	
13.2 应用于毫米波射频电路、雷达		像收发机	572
和图像传感器的收发机架构、		总结	574
封装和自测试	550	习题	574
13.3 65GHz 相控阵的 SiGe BiCMOS		参考文献	575

1.1 无线通信、光纤与成像系统中的高频电路

射频集成电路 (Radio Frequency Integrated Circuit, RFIC) 是指工作于 300MHz 至 3GHz 范围之间的电路。在 20 世纪 90 年代, RFIC 与蜂窝移动通信业紧密结合。与之相对的, 诞生于 20 世纪 70 年代的微波 (3~30GHz) 和毫米波 (30~300GHz) 单片集成电路, 或简称为 MMIC (Micro/mm-wave Monolithic Integrated Circuit), 大多采用砷化镓 (GaAs) 和 III-V 族工艺, 面向更宽频带的商业和军事应用。当前, 硅 (Si)、锗硅 (SiGe) 和 III-V 族集成电路在上述频率范围的商用产品中共存, 占据着各自的细分市场。

本书中, 术语高频集成电路涵盖了 RFIC、MMIC, 以及高速数字与 300GHz 以上的单片集成电路。这些高频电路与系统覆盖了 1GHz~1THz 的频率范围, 应用于:

- 无线。
- 背板。
- 光纤。
- 其他有线通信。

它们成为过去 20 年的主流技术。另外, 近年来的一些应用与系统也得益于这方面的集成电路理念与设计方法学的发展, 如:

- 道路安全与自动行车雷达。
- 安防。
- 工业传感器。
- 远程监控与检测分析。
- 射电天文。

这些电路大致可以分为以下几类:

- 调谐窄带。
- 狭义宽带 (wideband)。
- 广义宽带 (broadband)。

其中, 第一类常见于传统的地面 (蜂窝、WiFi、无线局域网) 和卫星无线通信系统, 以及自动行车雷达与远程检测, 工作带宽不超过其中心频率 f_0 的 20%。

第二类指带宽超过中心频率 f_0 20% 的应用, 有时可扩展至一倍或多倍频程。典型的例子如下一代蜂窝系统, 2~10GHz 超宽带射频, 以及大量军用雷达系统。

最后一类用于描述工作于直流 (或几十千赫兹) 至几吉赫兹或几十吉赫兹的电路, 典型的场景包括背板 I/O、光纤通信系统, 以及 60GHz 无线个域网 (Wireless Personal Area Network, WPAN) 和 80GHz 点对点射频终端链路的 Gb/s 数量级的数据传输速率基带部分等。

使上述电路区别于传统模拟与数字电路的是它们所共同具有的以下一个或几个特点:

- 采用低损耗射频无源器件, 例如变容管、金属层间 (Metal-insulator-Metal, MiM) 电容、电感、变压器, 以及传输线。
- 满足极端动态范围需求的设计, 特别关注低噪声系数、高线性度、低相位噪声、高输出功率与高功率附加效率等设计。

- 工作频率超过晶体管截止频率 f_T 或最高振荡频率 f_{MAX} 的 $1/5$ ，此时晶体管的功率、电压和电流增益低于 10dB，需要采用某种形式的级间匹配。

尽管不同种类的电路结构与系统架构通常有所差异，但它们均很大程度上独立于中心频率。也就是说，每一类的电路拓扑结构与系统架构可应用于从几吉赫兹至上百吉赫兹的中心频率。随着应用频率的提高，系统中包括天线在内的更多部分都更适于单芯片集成，使得集成度相应提高。

随着频率的提高，某些电路拓扑结构相比于其他结构更适于尺寸缩小。对于特定的电路拓扑结构，随着频率改变，电路设计需要相应变化，包括工艺节点、晶体管的类型、尺寸与偏置电流，以及所采用的电容、电感、变压器、传输线与变容二极管的尺寸。然而，需要指出的是，随着新一代晶体管工艺节点的出现，必须采用高频技术与电路结构的频率下限也在向更高频率不断推进。例如，随着 2011 年 400GHz 双极型与 CMOS 晶体管的出现，设计与制造工作于 20GHz 以上的模拟电路与 20Gb/s 以上的传统 CMOS 数字电路已存在可能性，而不需要再使用电感、电压器或传输线。

1.2 高频集成电路简史

本书所涉及的无线电路诸多概念、结构和收发机架构的起源都可追溯到 20 世纪的 20~40 年代。电感与变压器耦合调谐放大器、感性退化 (inductive degeneration) 与感性峰化 (inductive peaking)、分布式放大器、异相 (out-phasing) 与 Doherty 功率放大器、各种振荡器结构 (Colpitts、Hartley、Armstrong 与交叉耦合)、静态与动态分频器、单平衡与双平衡混频器、检测器、乘法器、开关与移相器、直接检波与外差接收机架构、直接调制与上变频发射机架构、收音机、雷达与电视机，这些第二次世界大战前的发明均沿用至今。起初的无线或“射频”电路采用真空二极管、三极管、四极管，以及五极管作为有源器件，与分立电阻、电容、三维线圈电感和变压器一起，装配到早期的印制电路板 (Printed Circuit Board, PCB) 上。与之相对，当时的微波电路采用三维波导作为匹配器件。

在过去 50 年间，高频电路的研究始终保持繁荣，高频电路设计师的需求持续旺盛，这得归功于每个年代微波晶体管技术的新发展，包括 20 世纪 70 年代的锗硅金属-半导体场效应晶体管 (Metal-Semiconductor Field-effect Transistor, MESFET)，20 世纪 80 年代的 III-V 族高电子迁移率晶体管 (High Electron Mobility Transistor, HEMT) 和异质结双极型晶体管 (Heterojunction Bipolar Transistor, HBT)，20 世纪 90 年代的硅基双极型和锗硅 BiCMOS，21 世纪初的平面 CMOS 与 GaN HEMT，以及 2011 年的非平面 MOSFET。

绝大部分真空管电路可以并且确实已经移植到 GaAs MESFET、InP HEMT 和硅基 MOSFET 工艺上，并且大部分高频电路结构均可采用双极型晶体管和场效应晶体管两种方式实现。尽管如此，随着晶体管工艺的每次升级，高频电路领域不断涌现出新的方法 (例如数字控制、数字校正、自测试)、新的结构 (例如电流源、电流镜、差分对、Gilbert 单元、CMOS 反相器)，促进了系统集成度的提高以及系统架构的更新。

第一代双极型晶体管与第一款单片集成电路分别诞生于 1947 年与 1959 年，然而其速度还不能满足 1GHz 以上的高频应用。整个 20 世纪 60 年代，微波设计领域不得不采用基于氧化铝和石英等较薄 ($<0.625\mu\text{m}$) 的低损耗绝缘衬底的薄膜平面微波集成电路 (Microwave Integrated Circuit, MIC)。这些电路依赖于：碰撞雪崩渡越时间二极管 (IMPATT)、耿式效应管 (GUNN)，也称为转移电子器件 (Transferred-Electron Devices, TED)，隧道晶体管等表面贴装的半导体二极管，用作信号产生与放大，以及肖特基、PIN (P 型-本征-N 型)、步长恢复、变容管等二极管用作检波、调制、混频、开关、乘法和其他控制功能，以及微波传输带、微带线、共平面波导传输线；二维螺旋电感；变压器；指状交叉电容作为匹配网络。缺乏 10GHz 以上截止