

“十四五”国家重点出版物出版规划项目

先进芯片材料与后摩尔芯片技术丛书

单片微波集成电路设计与应用： 从基础到实践

MMIC Design & Applications:
From Basics to Practice

许欢 朱葵 张平 编著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书基于作者多年的 MMIC 设计经验,较全面地介绍了 MMIC 的设计方法、工艺流程,并配套了具体的设计实例。全书内容由浅入深,既涵盖了基本的理论知识,也详细讲解了如何通过实际工程项目掌握和应用这些知识。特别是对于 GaAs 工艺的介绍和 ADS 软件的使用,本书提供了详尽的说明和实践指导,旨在帮助读者在掌握理论的基础上,独立完成复杂的 MMIC 设计。

本书适合从事微波与毫米波技术的研究人员、开发及应用的工程师,以及相关专业的研究生和高年级本科生使用。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

单片微波集成电路设计与应用 : 从基础到实践 / 许欢, 朱葵, 张平编著.
北京 : 清华大学出版社, 2026. 8. -- (先进芯片材料与后摩尔芯片技术丛书).
ISBN 978-7-302-72500-8

I. TN454

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2026223TU3 号

责任编辑: 鲁永芳

封面设计: 意匠文化·丁奔亮

责任校对: 欧 洋

责任印制: 丛怀宇

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <https://www.tup.com.cn>, <https://www.wqxuetang.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-83470000 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 环球东方(北京)印务有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 170mm×230mm

印 张: 22 字 数: 442 千字

版 次: 2026 年 8 月第 1 版

印 次: 2026 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 176.00 元

产品编号: 114159-01

丛书编委会

(按姓氏笔画排序)

名誉顾问:

干 勇 中国工程院院士, 钢铁研究总院
陈良惠 中国工程院院士, 中国科学院半导体研究所

顾问:

刘 明 中国科学院院士, 复旦大学
刘 胜 中国科学院院士, 武汉大学
刘忠范 中国科学院院士, 北京大学
刘益春 中国科学院院士, 东北师范大学
江风益 中国科学院院士, 南昌大学
孙世刚 中国科学院院士, 厦门大学
李树深 中国科学院院士, 中国科学院半导体研究所
杨德仁 中国科学院院士, 浙江大学
吴汉明 中国工程院院士, 浙江大学
张锁江 中国科学院院士, 河南大学
陈小龙 中国科学院院士, 中国科学院物理研究所
罗 毅 中国工程院院士, 清华大学
郑婉华 中国科学院院士, 中国科学院半导体研究所
郝 跃 中国科学院院士, 西安电子科技大学
祝世宁 中国科学院院士, 南京大学
黄小卫 中国工程院院士, 中国有研科技集团
屠海令 中国工程院院士, 中国有研科技集团
彭 寿 中国工程院院士, 中国建材集团
彭练矛 中国科学院院士, 北京大学

总主编:

周 济 中国工程院院士, 清华大学

副总主编:

张 跃 中国科学院院士, 北京科技大学

执行主编:

王 琛 清华大学

编委：

- 卜伟海 北方集成电路技术创新中心
于大全 厦门大学
于洪宇 南方科技大学
万 烨 洛阳中硅高科技有限公司
王 坚 盛美半导体设备(上海)股份有限公司
王 振 东方晶源微电子科技有限公司
王开友 中国科学院半导体研究所
王业亮 北京理工大学
王传声 中国电子科技集团第四十三研究所
王守祥 中国电子科技集团芯片技术研究院
王欣然 南京大学
王润声 北京大学
王新强 北京大学
牛新平 拓荆科技股份有限公司
文永正 清华大学
龙世兵 中国科学技术大学
史小平 北方华创科技集团股份有限公司
白 鹏 华虹半导体有限公司
边国栋 北方华创科技集团股份有限公司
邢 巍 中国科学院长春应用化学研究所
吕俊鹏 东南大学
朱 健 中国电子科技集团第五十五研究所
朱嘉琦 哈尔滨工业大学
任文才 中国科学院金属研究所
刘 琦 复旦大学
刘 雷 安徽大学
刘春俊 北京天科合达半导体股份有限公司
刘峰奇 中国科学院半导体研究所
许俊豪 华为技术有限公司
孙东明 中国科学院金属研究所
孙伟峰 东南大学
孙竞博 清华大学
麦立强 武汉理工大学

杜祖亮 河南大学
李 炜 沪硅产业集团
李 泠 中国科学院微电子研究所
李 晨 中国电子科技集团
李 璟 浙江大学
杨 超 中国科学院过程工程研究所
杨娟玉 中国有研科技集团
肖湘衡 武汉大学
吴华强 清华大学
吴洪江 中国电子科技集团产业基础研究院
何 军 武汉大学
狄增峰 中国科学院上海微系统研究所
汪 玉 清华大学
汪 莱 清华大学
沈国震 北京理工大学
冷雨欣 中国科学院上海光学精密机械研究所
张 卫 复旦大学
张 兵 江苏艾森半导体材料有限公司
张 凯 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所
张 铮 北京科技大学
张立军 吉林大学
张进成 西安电子科技大学
张雪囡 中环领先半导体科技股份有限公司
周 鹏 复旦大学
单崇新 河南大学
宗艳民 山东天岳先进科技股份有限公司
孟国文 中国科学院合肥物质科学研究院
封 伟 天津大学
赵 超 北京超弦存储器研究院
倪振华 东南大学
黄庆安 东南大学
曹 靖 兰州大学
曹立强 中国科学院微电子研究所
梁君飞 中北大学

- 彭登峰 深圳大学
葛广路 中国科学院国家纳米科学中心
韩根全 西安电子科技大学
焦斌斌 西安交通大学
曾 超 中国工程物理研究院电子工程研究所
谢晓明 中国科学院上海微系统研究所
蔡 坚 清华大学
蔡一茂 北京大学
蔡树军 中国电子科技集团公司第五十八研究所
廖 蕾 湖南大学
廖庆亮 北京科技大学
谭平恒 中国科学院半导体研究所
翟天佑 华中科技大学
缪向水 华中科技大学
黎大兵 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
霍宗亮 长江存储科技有限责任公司

芯片行业支撑起的电子信息产业是当今信息时代和当前人工智能时代的产业基石，电子信息产业的发达与否在一定程度上决定了国家的综合竞争力和未来社会发展潜力。特别是，随着芯片技术在过去六十余年的指数级发展，产业被不断涌现的新一代材料、器件、集成、制造等技术协同推动，并引发了源源不断的新兴应用创新，从底层技术上推动人类文明至新的高度。2024 年全球半导体产值达到 4 万亿元，2035 年预期达到 10 万亿元，2049 年有望突破 60 万亿元。与此同时，芯片行业从材料到制造的技术壁垒也越来越高，核心技术被少数半导体公司所掌控。我国目前相关技术与国外先进水平还有较大差距，而且面临核心材料受制于人、核心技术很难突破、专利壁垒高、半导体工艺整合难度大、整体差距很难短期缩小的局面。因此，在后摩尔时代，如何通过底层芯片新材料的创新推动下一代高性能芯片的高端制造，是未来 20~30 年最有挑战性的全局性问题之一。

与此同时，整个芯片领域已经持续在学界和业界布局下一代半导体材料、新型半导体器件、新一代半导体工艺和制造技术的研究，以求在后摩尔时代能够占得技术引领和产业升级的先机。工业级半导体器件的应用往往起源于对半导体材料和半导体器件的基础研究和前瞻性应用，例如 1947 年贝尔实验室发明的晶体管通过芯片制造工艺和架构的持续迭代引领了摩尔时代超过半个世纪的高速发展，1999 年英伟达公司引领的图形处理单元在先进制造的基础上通过架构创新和生态搭建推动了当前爆发式人工智能时代的来临。回到当下，我国在后摩尔芯片基础研究和前沿应用探索方面已有众多成果，进一步强化基础研究深度，并适时推动应用研究和产业化推广是保持该领域优势的战略关键所在。但是由于芯片行业的长产业链和长期技术迭代形成的封闭特性，很大一部分科研界关注的芯片新材料、新器件和新工艺的研究立足于最终取代硅基半导体，而产业界对于新技术的引入又极为谨慎，造成较为严重的产学研脱节现象。在硅基半导体仍然具有 10~20 年技术升级空间的背景下，当前基础芯片新材料和新器件研究对直接推动芯片行业的实质性发展尚有一定难度。为此，我国如何依托现有半导体材料和制造产业基础，有中生优，通过跨代升级发展基础原材料和先进节点技术承接下游产业需求，重点融会贯通以半导体材料和先进工艺装备为代表的电子信息材料上中游产业链；更进一步，如何瞄准全球

电子信息产业发展的高线，“无中生有”，战略布局前沿电子信息材料和制造技术研究，融会贯通产学研的力量，打通从 Lab 到 Fab 的通路，提前 25 年为我国电子信息产业的发展谋篇蓄力，是本丛书编撰的主要动因。

经过与国内众多高等院校、中国科学院众多相关研究所、信息领域国家重点企业和行业龙头企业等的走访交流，更是坚定了编委会推动本丛书的编纂与出版的信心。本丛书的立意也得到了清华大学相关单位的大力支持，经过清华大学出版社推荐，国家新闻出版署审定，本丛书入选了“十四五”国家重点出版物出版规划。本丛书主编团队也凝聚了十余位行业各领域知名院士专家学者作为顾问，凝练丛书立意，优选丛书方向，汇聚行业专家，精心筛选内容，把关细节版式，力争把本丛书作为推动我国后摩尔芯片产学研深度链条融合、技术开放创新、人才培养拔高的代表性出版物。在主编团队的不懈努力和通力协作下，通过凝聚顶尖高校、知名院所、龙头企业等 60 余位知名专家作为编委的集体智慧，囊括基础新材料、新型器件、新制造工艺和装备、检测分析技术、特种芯片应用、前沿芯片探索等领域，在清华大学出版社的支持下共同推出本丛书！丛书将力图较为系统地梳理下一代芯片中的新材料—新器件—新工艺—新集成—新制造的核心研究成效和关键技术进展，为学界和业界的科研人员、青年学生和学者、技术管理人员和政策制定人员等提供系统的行业发展全景读物，并力图从底层技术脉络出发，重新梳理行业中的重点、难点和趋势，期冀丛书能在一定程度上推动我国芯片研究人才和产业人才的培育，并带动我国芯片行业高质量可持续发展，为 21 世纪中叶我国全面建成社会主义现代化强国贡献芯片创新力量。

清华大学教授 中国工程院院士 周济

2024 年 10 月于清华园

尊敬的读者：

作为一名 ADS 工具的使用者和推广者，我非常荣幸地阅读了《单片微波集成电路设计与应用：从基础到实践》的底稿，并在此向各位推荐这本书。书籍的内容丰富且深入，适合广泛的读者群体，包括从事微波技术的工程师、研究人员以及相关领域的学生。

在现代通信和雷达技术迅速发展的背景下，微波及毫米波技术的应用越来越广泛，单片微波集成电路（MMIC）已成为这些领域的核心技术。正因如此，深入了解 MMIC 的设计与应用显得尤为重要。本书正是基于这一需求而撰写，旨在为读者提供系统的知识框架和实用的设计技巧。

作者凭借多年的实践经验，将复杂的设计理论与实际案例相结合，使本书内容既具有深度又不失可读性。这种理论与实践的紧密结合，无疑是本书的一大亮点。例如，在介绍射频前端芯片的功能与应用场景时，作者不仅提供了详细的技术指标，还通过实际的设计案例，让读者能够直观地理解这些芯片在实际应用中的表现和挑战。

书中的章节安排合理，内容从基础理论到具体应用，循序渐进。特别是在 GaAs 工艺和 ADS 设计软件的使用方面，作者提供了详尽的操作指导和实战技巧，使得无论是初学者还是有经验的工程师，都能从中受益。通过这些实用的指导，读者可以在掌握设计基础的同时，逐步提升自己的设计能力和实践水平。

此外，书中讨论了多种射频前端芯片，如衰减器、功分器、混频器、移相器、低噪声放大器、功率放大器等，涵盖了广泛的技术领域。每一种功能类别的芯片都配有典型的设计案例，帮助读者深入理解其工作原理和设计考量。这种案例驱动的学习方式，使复杂的理论变得更加生动、易于掌握。

在高等教育和工程实践中，掌握微波集成电路的设计技能至关重要。《单片微波集成电路设计与应用：从基础到实践》不仅能帮助学生打下坚实的基础，更能为他们未来的工作中提供持续的指导和启发。对于从事相关研究的学者来说，这本书也是一份重要的参考资料，可以帮助他们在微波和毫米波技术的前沿领域中保持竞争力。

总之，我强烈推荐《单片微波集成电路设计与应用：从基础到实践》给所有希望在微波集成电路设计领域深入学习和发展的读者。这本书将是他们在追求卓越的道路上不可或缺的宝贵资源，帮助他们在技术的海洋中扬帆远航。

诚挚的，

蒋修国

是德科技大中华区 EDA 解决方案经理

2026 年 3 月

随着现代通信和雷达技术的飞速发展，微波及毫米波技术的应用日益广泛，MMIC 作为其中的核心技术，已经成为通信、国防、航天等领域的关键支撑。MMIC 以其小型化、高性能和高集成度的特点，正在引领新一代电子系统的发展潮流。然而，MMIC 设计的复杂性也给工程师提出了更高的要求，不仅需要具备扎实的理论基础，还需要掌握各种工艺和设计工具。

本书旨在填补国内关于 MMIC 设计与应用系统性书籍的空白，全面介绍 MMIC 的设计方法、工艺流程以及具体的设计实例。全书内容由浅入深，既涵盖了基本的理论知识，也详细讲解了如何通过实际工程项目掌握和应用这些知识。特别是对于 GaAs 工艺的介绍和 ADS 软件的使用，本书提供了详尽的说明和实践指导，旨在帮助读者在掌握理论的基础上，独立完成复杂的 MMIC 设计。

本书适合从事微波与毫米波技术的研究人员、开发及应用的工程师，以及相关专业的研究生和高年级本科生使用。我们希望通过本书，读者能够深入理解 MMIC 设计的核心要义，提升设计能力，并在实际工作中做到学以致用，为我国微波技术的发展贡献力量。

在国内，关于 MMIC 设计的书籍并不少见，但大多侧重于理论层面的阐述，或者聚焦于某些具体领域如放大器设计、射频电路等，还有一部分是基于国外教材的译著。本书的独特之处在于，不仅涵盖了微波集成电路的理论知识，还详细介绍了 PDK 的使用，基于 GaAs 工艺的 MMIC 设计方法和基于 ADS 软件的具体设计实例。这使得本书在实用性和深度上比很多国内同类书籍更具优势。

在国外，经典的 MMIC 设计书籍如 Behzad Razavi 的 *RF Microelectronics* 和 David Pozar 的 *Microwave Engineering* 也具有相当的影响力。然而，这些书籍大多偏向于广泛的射频和微波工程，而非专注于 MMIC 设计的全流程。尤其是在实际应用层面，例如使用 PDK 进行具体设计和仿真，这类内容在国外书籍中并不多见。然而值得一提的是，Steve Marsh 的 *Practical MMIC Design* 也是一本广受初学者好评的 MMIC 设计入门书籍，虽然它也并没有像本书一样配套各种设计实例，但本书有多处内容也参考了它。

虽然国内外都有一些优秀的 MMIC 设计书籍，但相比之下本书具有以下四点

独特优势：

（1）实用性强

本书从理论到实际操作，提供了完整的设计流程和实战案例，特别是对 PDK 的应用进行了深入讲解。这使得它不仅适合学生和研究人员使用，也对从事实际工程设计的专业人士具有很高的参考价值。

（2）内容全面

相比其他专注于某一领域的书籍，本书涵盖了 MMIC 设计的各个方面，从基础理论、工艺流程，到具体的设计实例，内容体系完整，可以帮助读者从零基础到深入掌握 MMIC 设计。

（3）案例丰富

本书提供了多个具体的设计实例，包括放大器、混频器、射频开关等，使读者可以通过实际案例，掌握复杂电路的设计技巧。这一点在其他很多书籍中是欠缺的。

（4）国内化内容

本书针对中国读者的需求，提供了更贴近国内市场和技术背景的案例分析和工艺流程介绍，特别是在 GaAs 工艺方面，结合国内实际情况进行阐述，使其更具本地化优势。

本书在编写过程中得到了很多帮助和支持，在此，作者衷心感谢所有为本书提供帮助与支持的同行和伙伴。首先，感谢工作单位提供的技术平台和锻炼机会，过往的每一次芯片设计经历，无论成功与否，都为本书奠定了坚实的技术基础。特别感谢是德科技大中华区 EDA 解决方案经理蒋修国先生提供的技术支持和鼎力推荐。感谢逢立飞先生对芯片测试章节进行了大量斧正。此外，一并感谢王玉军、张高俊、冷益平、余刚、代海亮等朋友，他们为本书出版提供了很多宝贵建议和帮助。最后，作者还要感谢清华大学出版社编辑团队的专业协作，他们与作者共同完成了多轮书稿的校对与勘误工作，确保了技术细节的准确性、内容格式的规范性，使本书得以顺利面世。尽管作者力求本书内容做到专业、准确，但仍难免有疏漏或者错误之处，还望广大读者批评指正。谨以此书献给所有推动微波集成电路领域发展的同行者！

全书彩图请扫描二维码观看。



作者

2026 年 3 月

第 1 章	Help!	1
1.1	从软件开发说起	1
1.2	用好 ADS 的帮助文档	4
1.2.1	快捷帮助	4
1.2.2	搜索帮助	9
1.2.3	搜索技巧	12
第 2 章	关于 PDK	14
2.1	PDK 资源包主要文件	14
2.1.1	Readme	14
2.1.2	工艺介绍	14
2.1.3	不同软件平台对应的 PDK	14
2.1.4	测试数据	15
2.1.5	History File	15
2.1.6	Model Handbook	15
2.1.7	Design Manual	15
2.2	PDK 的安装与使用	15
第 3 章	GaAs 工艺简介	20
3.1	GaAs	21
3.2	pHEMT	22
3.3	主要元件	24
3.3.1	电阻	24
3.3.2	电容	25
3.3.3	电感	26
3.3.4	晶体管	26
3.3.5	二极管	27

3.3.6 焊盘	28
3.3.7 地孔	28
参考文献	29
第 4 章 MMIC 设计第一步	30
4.1 放大器	30
4.1.1 低噪声放大器	30
4.1.2 通用放大器	31
4.1.3 功率放大器	33
4.2 双平衡混频器	34
4.3 射频开关	35
4.4 数控衰减器	38
4.5 数控移相器	39
参考文献	40
第 5 章 MMIC 设计实例——固定衰减器	41
5.1 衰减器原理	41
5.1.1 Π 型衰减器	41
5.1.2 T 型衰减器	43
5.1.3 耐受功率	44
5.2 衰减器设计	44
5.2.1 设计指标	44
5.2.2 设计步骤	45
第 6 章 MMIC 设计实例——宽带功分器	56
6.1 功分器原理	56
6.1.1 Wilkinson 功分器	56
6.1.2 多节宽带功分器	57
6.2 功分器设计	58
6.2.1 设计指标	58
6.2.2 设计步骤	58
参考文献	66
第 7 章 MMIC 设计实例——计算 L/C 的 Q 值和自谐振频率	67
7.1 Q 值	67

7.2 电感	68
7.3 电容	69
7.4 自谐振频率	70
7.5 L/C 参数的计算	71
第 8 章 MMIC 设计实例——Bias-Tee	76
8.1 扼流电感	76
8.2 隔直电容	77
8.3 Bias-Tee	78
8.4 设计实例	79
8.4.1 设计指标	79
8.4.2 设计步骤	79
第 9 章 MMIC 设计实例——滤波器	85
9.1 滤波器概述	85
9.1.1 低通滤波器	85
9.1.2 高通滤波器	86
9.1.3 带通滤波器	86
9.1.4 带阻滤波器	88
9.1.5 陷波器	88
9.2 滤波器设计	88
9.2.1 设计指标	90
9.2.2 设计步骤	90
第 10 章 MMIC 设计实例——均衡器	97
10.1 均衡器概述	97
10.2 均衡器原理	98
10.3 均衡器设计	99
10.3.1 设计指标	99
10.3.2 设计步骤	99
第 11 章 MMIC 设计实例——耦合器	106
11.1 耦合器概述	106
11.2 耦合器原理	106
11.2.1 平行线耦合器	106

11.2.2 分支线耦合器	108
11.2.3 环形耦合器	108
11.2.4 Lange 耦合器	109
11.3 耦合器设计	110
11.3.1 设计指标	110
11.3.2 设计步骤	110
参考文献	114
第 12 章 MMIC 设计实例——巴伦	115
12.1 巴伦概述	115
12.1.1 相关概念	116
12.1.2 基本仿真	119
12.2 巴伦设计	122
12.2.1 设计指标	122
12.2.2 设计步骤	122
第 13 章 MMIC 设计实例——无源双平衡混频器	128
13.1 混频器概述	128
13.1.1 混频器分类	128
13.1.2 混频器原理	128
13.2 混频器设计	131
13.2.1 设计指标	131
13.2.2 设计步骤	132
参考文献	139
第 14 章 MMIC 设计实例——无源倍频器	140
14.1 倍频器概述	140
14.1.1 倍频器原理	140
14.1.2 倍频器分类	140
14.1.3 倍频器的主要指标	141
14.2 倍频器设计	142
14.2.1 设计指标	143
14.2.2 设计步骤	143
参考文献	146

第 15 章 MMIC 设计实例——射频开关	148
15.1 射频开关概述	148
15.1.1 射频开关分类	148
15.1.2 射频开关原理	149
15.2 射频开关设计	155
15.2.1 设计指标	155
15.2.2 设计步骤	155
参考文献	161
第 16 章 MMIC 设计实例——数控衰减器	162
16.1 数控衰减器概述	162
16.2 数控衰减器基本原理	162
16.3 数控衰减器主要指标	164
16.3.1 插入损耗	164
16.3.2 衰减精度	164
16.3.3 附加相移	165
16.3.4 切换时间	165
16.3.5 功率容量	165
16.4 数控衰减器设计	166
16.4.1 设计指标	166
16.4.2 设计步骤	166
参考文献	175
第 17 章 MMIC 设计实例——数控移相器	176
17.1 移相器概述	176
17.2 数控移相器基本原理	176
17.2.1 开关延迟线移相器	177
17.2.2 反射型移相器	177
17.2.3 I-Q 矢量调制器	178
17.2.4 开关滤波型移相器	179
17.3 数控移相器主要指标	183
17.3.1 插入损耗	183
17.3.2 移相精度	183
17.3.3 附加衰减	183

17.3.4	切换时间	183
17.3.5	功率容量	183
17.4	数控移相器设计	184
17.4.1	设计指标	184
17.4.2	设计步骤	184
	参考文献	193
第 18 章	MMIC 设计实例——数控延时器	194
18.1	数控延时器概述	194
18.2	数控延时器基本原理	196
18.3	数控延时器主要指标	197
18.3.1	插入损耗	197
18.3.2	延时精度	197
18.3.3	附加衰减	197
18.3.4	切换时间	198
18.3.5	功率容量	198
18.4	数控延时器设计	198
18.4.1	设计指标	198
18.4.2	设计步骤	198
第 19 章	MMIC 设计实例——逻辑控制电路	209
19.1	数字电路概述	209
19.2	基本逻辑电路及其工作原理	210
19.2.1	非门	210
19.2.2	或非门	213
19.2.3	与非门	214
19.2.4	异或门	215
19.2.5	同或门	215
19.2.6	译码器	216
19.2.7	比较器	216
19.2.8	锁存器	217
19.2.9	触发器	218
19.2.10	寄存器	220
19.2.11	计数器	220
19.3	四通道波束合成串行控制电路设计	221

19.3.1 设计指标	221
19.3.2 设计步骤	222
参考文献	230
第 20 章 MMIC 设计实例——低噪声放大器	231
20.1 放大器概述	231
20.2 放大器基本原理	231
20.3 放大器主要指标	232
20.3.1 增益	232
20.3.2 噪声系数	232
20.3.3 功率压缩点	233
20.3.4 功率附加效率	234
20.3.5 三阶交调截点	235
20.3.6 耐受功率	236
20.4 常见放大电路	236
20.4.1 基本放大电路	236
20.4.2 组合放大电路	237
20.5 放大器偏置方式	241
20.6 晶体管：耗尽型 vs. 增强型	242
20.7 低噪声放大器设计	243
20.7.1 设计指标	243
20.7.2 设计步骤	243
参考文献	257
第 21 章 MMIC 设计实例——功率放大器	258
21.1 功率放大器基本理论	258
21.1.1 负载线理论	259
21.1.2 负载牵引理论	260
21.1.3 阻抗匹配理论	261
21.2 功率放大器设计	263
21.2.1 设计指标	264
21.2.2 设计步骤	264
参考文献	278

第 22 章 MMIC 设计实例——多功能芯片	279
22.1 多功能芯片设计	279
22.1.1 功能框图	279
22.1.2 引脚定义	280
22.1.3 设计指标	281
22.1.4 设计步骤	281
第 23 章 芯片测试	297
23.1 直流测试	298
23.2 射频测试	298
23.2.1 测试项目	298
23.2.2 仪器校准	299
23.2.3 TRL 校准	302
23.3 可靠性测试	306
23.3.1 环境应力可靠性测试	306
23.3.2 寿命与老化测试	307
23.3.3 封装与组装可靠性测试	307
23.3.4 缺陷筛查与失效分析	307
23.3.5 特殊应用场景测试	308
参考文献	308
第 24 章 数据处理	309
24.1 snp 文件使用	309
24.1.1 ADS 导入	309
24.1.2 ADS 导出	309
24.1.3 将多个 s2p 文件合并成一个多端口 snp 文件	310
24.1.4 MATLAB 绘图	311
24.2 MDF 文件使用	317
24.2.1 ADS 导入	318
24.2.2 将多个 s2p 文件合并成一个 MDF 文件	323
术语表	326
缩略词表	327

Help!

1.1 从软件开发说起

资深的软件工程师深知文档在软件开发过程中占据着非常重要的地位，甚至可以说软件开发几乎就是编写各类文档的过程。优秀的设计文档与项目的成功之间有着密切的联系，越是大型、流行的商业软件，其各类文档越丰富和完善。在这些文档中，帮助文档与用户关系最为密切。帮助文档既可能是软件安装后自带的 *.chm 或 *.html 文件，也可能是官网的帮助网页，让用户很容易找到。一个对用户友好的软件帮助文档有如下特点：

- 对于初次接触软件的用户，帮助文档可以让其快速入门。
- 对于长时间使用软件的用户，帮助文档提示的小技巧可以帮助其提高工作效率。
- 对于遇到问题的用户，帮助文档可以第一时间提供解决方案。

因此，帮助文档的意义在于协助用户使用软件完成工作，并减少用户解决软件使用问题的时间。

作者对帮助文档的以上几个特点深有体会，上手的几乎所有专业软件，例如 MATLAB、ADS、ANSYS、Visual Studio 等，都是通过查阅帮助文档自学的。可以说帮助文档能够解决软件使用的绝大部分问题。很多工具书、软件教程的内容即便不是从软件的帮助文档中摘抄或翻译过来的，至少也是重要参考。所以作者建议读者：有问题先看 *help*，而不是先叫 *help*！

作者查阅帮助文档的习惯要从 MATLAB 说起：大学期间开设了 MATLAB 实验课，熟悉 MATLAB 的人都知道它的函数库成千上万，每个函数可能有多个输入

或者输出参数,还可以有多种用法,因此课程老师也经常建议随时使用 help 命令 (MATLAB 可以输入 help function 来查看某个 function 的帮助信息,新版 MATLAB 支持 F1 浮动显示帮助信息) 或者直接在帮助窗口中进行查找。虽然这门课程仅介绍了 MATLAB 的一些最基本的入门知识和常用函数,但得益于查阅帮助文档习惯的养成,后期的学习工作中通过 MATLAB 进行各种数据采集、数据处理、图表绘制等工作都可以通过帮助文档自学完成。GUI 编程、远程控制仪器自动测试 (图 1.1~图 1.3) 等也都可以轻易上手。

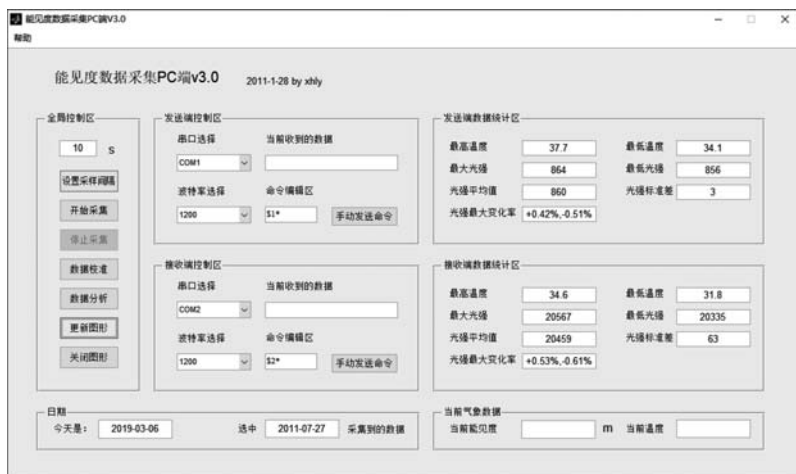


图 1.1 能能见度测试仪调测程序

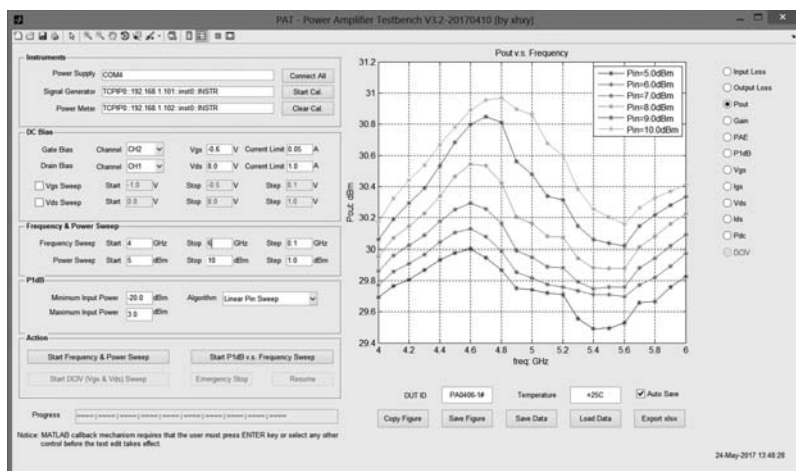


图 1.2 功放自动测试程序

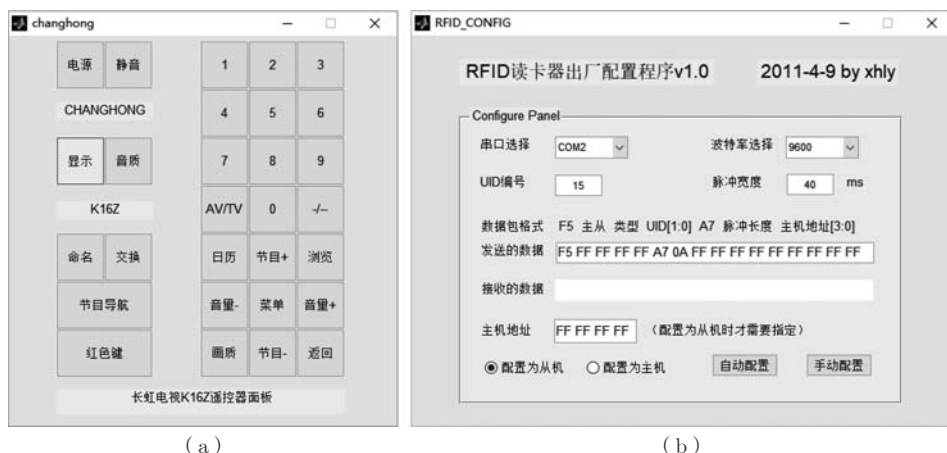


图 1.3 其他用 MATLAB 编写的 GUI 小程序
(a) 电视遥控器；(b) 电路板参数配置

作者认为：MATLAB 的帮助文档内容丰富、阐述详尽、条理清晰（图 1.4），是作者用过的体验最好的帮助文档，其次是 ADS。相比之下，ANSYS 和 Cadence 的帮助文档则不太友好，不过这只是一家之言，毕竟也可能跟个人习惯有关。

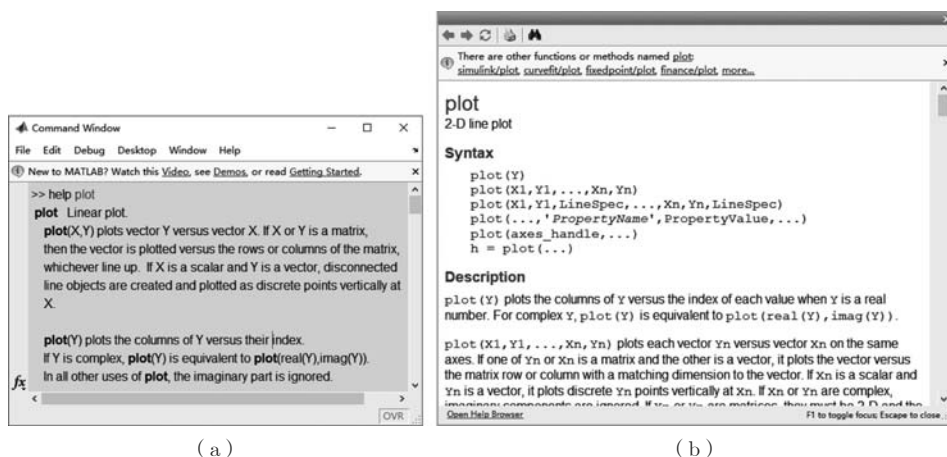


图 1.4 MATLAB 的帮助文档
(a) help 命令；(b) 帮助窗口

1.2 用好 ADS 的帮助文档

ADS 的帮助文档也是非常详尽和完善的，以下从个人的习惯出发，介绍如何利用好其帮助文档。

1.2.1 快捷帮助

大部分软件的启动帮助文档的快捷键都是 F1，ADS 也一样，鼠标指针未聚焦特定对象时按 F1 键打开帮助文档 Home 页面，如图 1.5 所示。

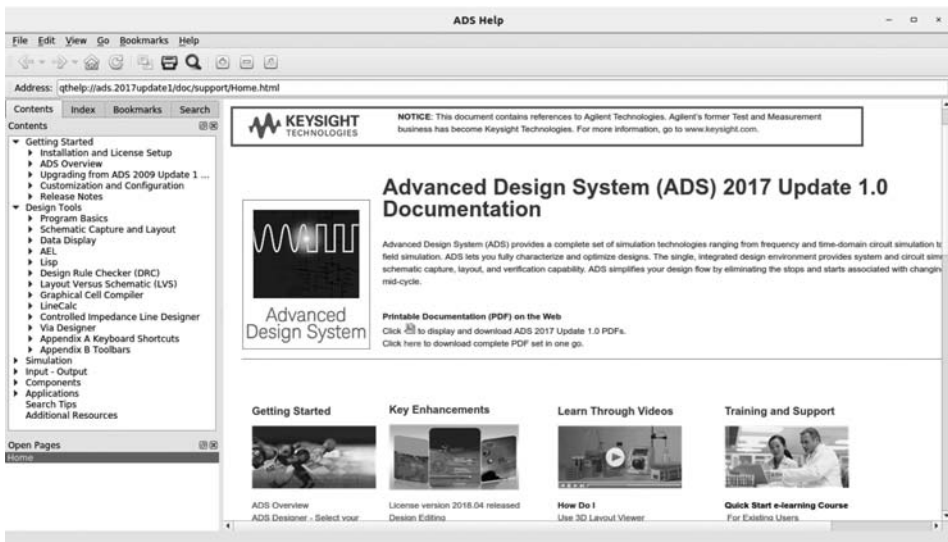


图 1.5 ADS 帮助文档首页

当鼠标指向 ADS 元件面板的内建元件库（Built-in Library）的元件时按 F1 键，跳转到该元件对应的帮助文档页面，如图 1.6 所示。图 1.7 为 TLines-Microstrip 内建元件库中 TFR 的帮助页面，详细介绍了元件参数含义、默认取值和取值范围等信息。

对于非 ADS 内建元件库，取决于 PDK 厂商的设置，查看帮助文档会有三种结果：

- 跳转到该元件对应的 html 帮助网页（图 1.8）；

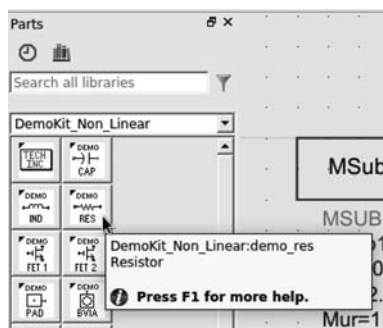


图 1.6 快捷获取内置元件帮助信息

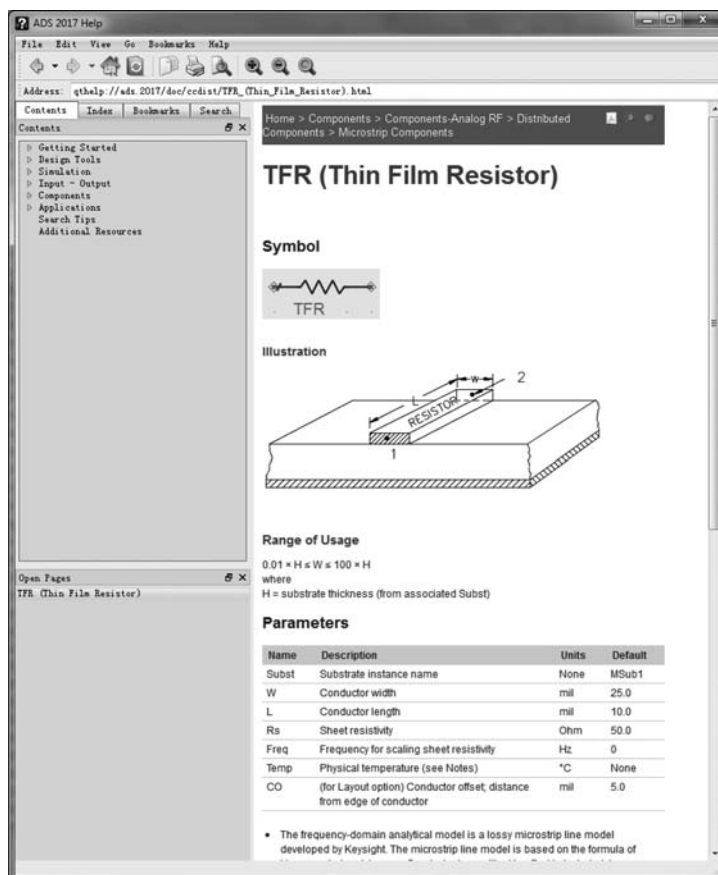


图 1.7 TFR 帮助页面

demo_res - Mozilla Firefox

File Edit View History Bookmarks Tools Help

微软 Bing 搜索 - 国 demo_bvia demo_res

file:///opt/ADS201 80%

Most Visited WeChat for Web 微信公众平台

demo_res

1. Symbol:



2. Demo kit Resistors:

a) Parameters:

Name	Description	Unit	Default
Type	Two types of resistors are available. One for Mesa and the other for NiCr. Details are given below.	nil	res1
Resistance(R)	Valid resistance range	Ohm	100
Width(w)	The width to be fixed, depending on current carrying requirements.	um	20
Length(l)	Length is automatically calculated for a given Resistance and width. Non editable.	um	8
Sheet Resistance(Rsh)	Sheet resistance of the material (MESA or NiCr) for information. Non editable.	Ohm/square	250

b) Range:

Type1 (res1); MESA resistor; $R = (25 \text{ to } 10000 \text{ Ohm})$; $w = (5 \text{ to } 50 \text{ um})$
 Type2 (res2); NiCr resistor; $R = (5 \text{ to } 2000 \text{ Ohm})$; $w = (5 \text{ to } 50 \text{ um})$

3. Equivalent Circuit:

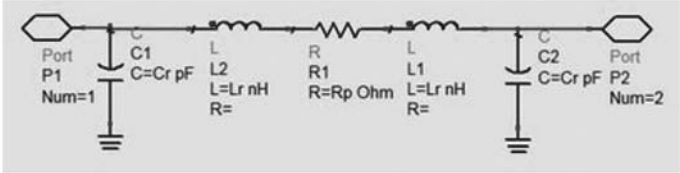


图 1.8 html 帮助页面

- 跳转到 pdf/word 或者其他格式的说明文档 (图 1.9);

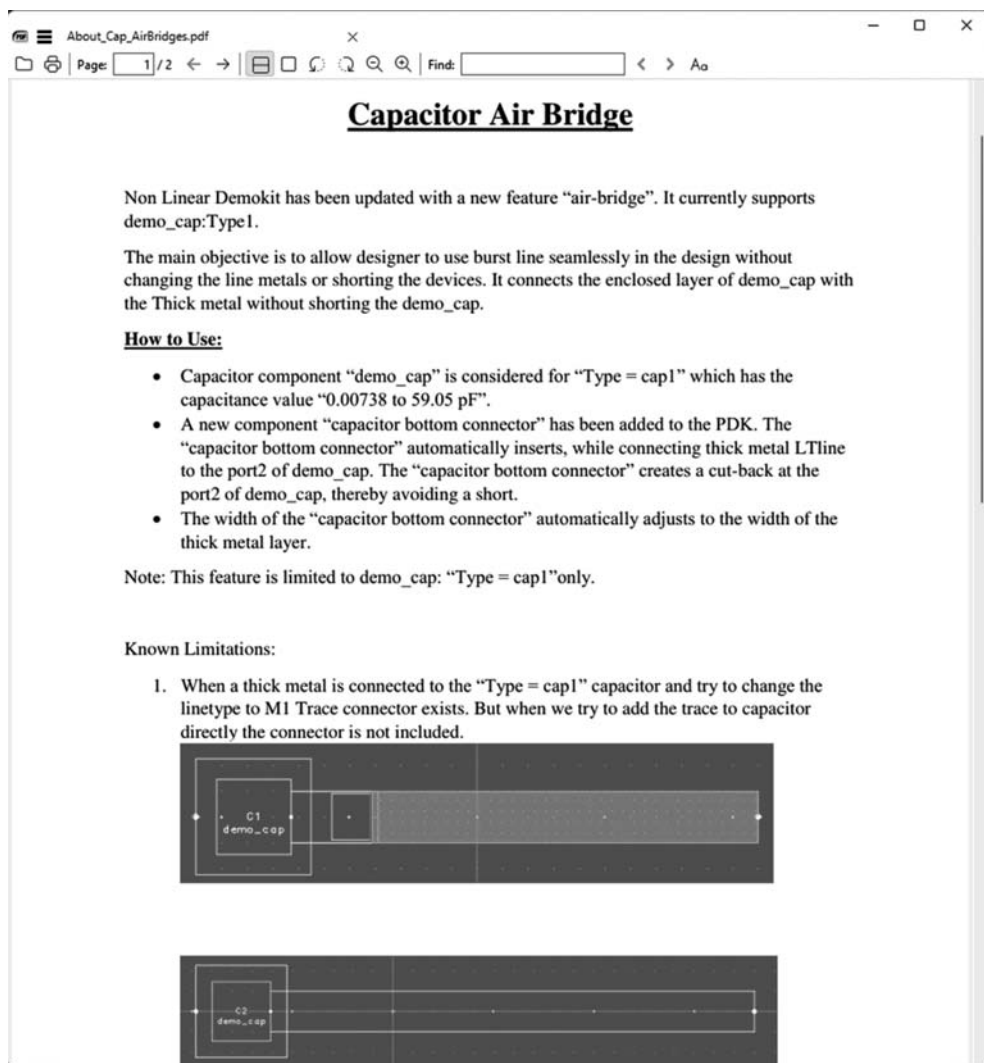


图 1.9 pdf 帮助页面

- 元件没有关联任何帮助信息，跳转到默认提示网页（图 1.10）。

对于 Schematic 或者 Layout 中的任何元件、仿真控件，双击弹出参数编辑窗口后，右下角都有一个【Help】按钮，如图 1.11 所示，单击该按钮同样可以打开对应的帮助页面。除元件参数编辑窗口，任何有【Help】按钮的地方都可以打开跟当前对象相关的帮助页面。

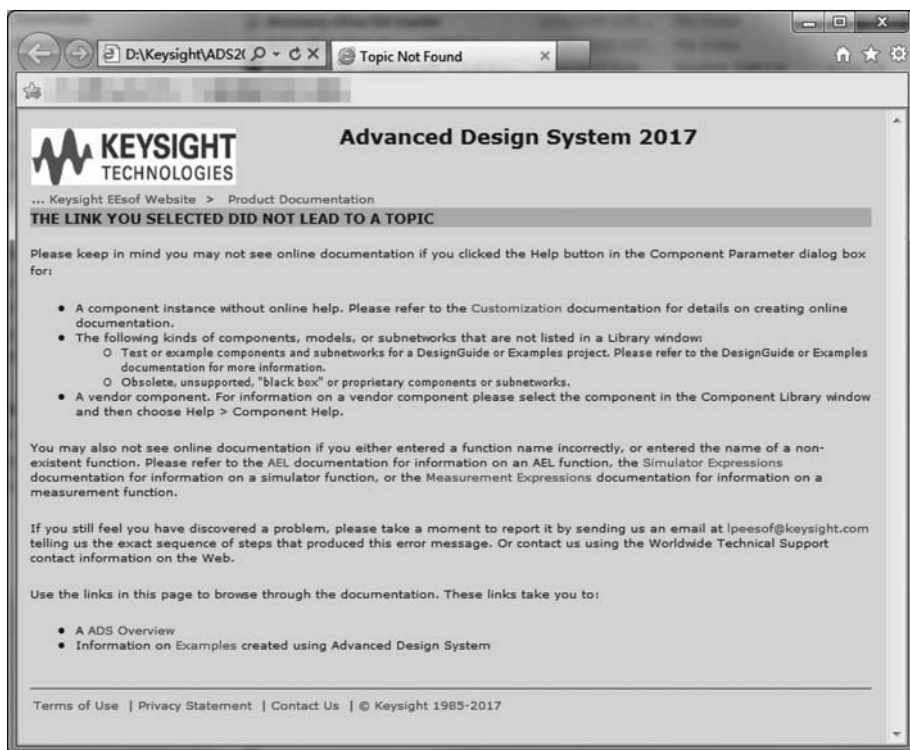


图 1.10 默认提示页面

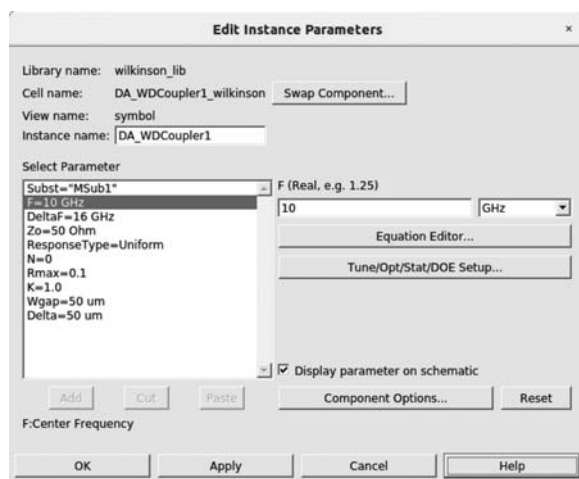


图 1.11 帮助按钮

1.2.2 搜索帮助

对于没有快捷跳转方式的帮助信息，可以先打开帮助文档的主页，从左侧目录按主题类别展开查找，这种方式适用于有比较明确分类的场合，如图 1.12 ~ 图 1.15 所示。

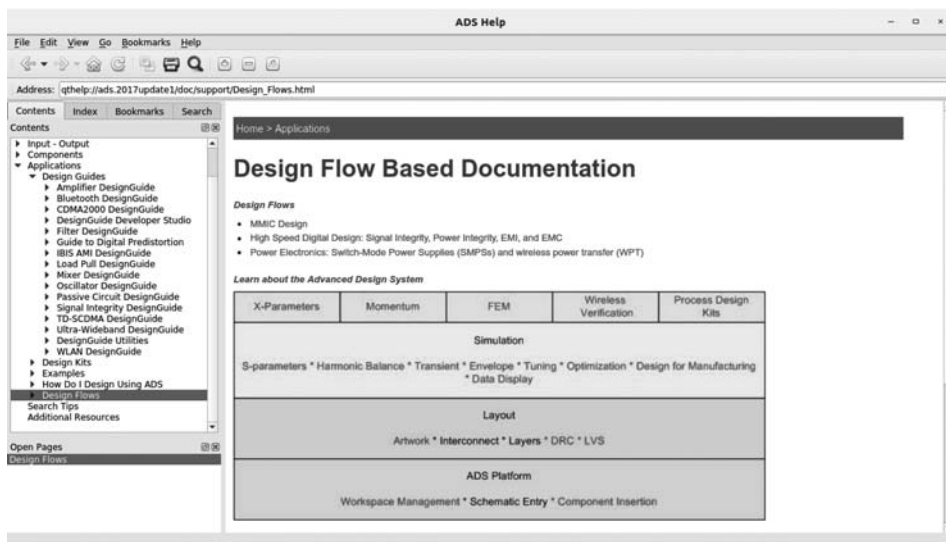


图 1.12 ADS 设计流程

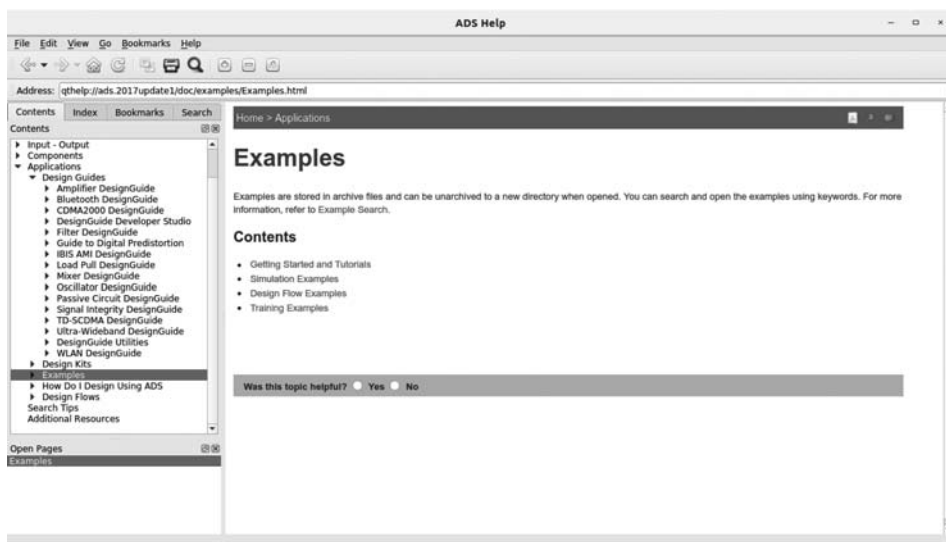


图 1.13 ADS 示例主页

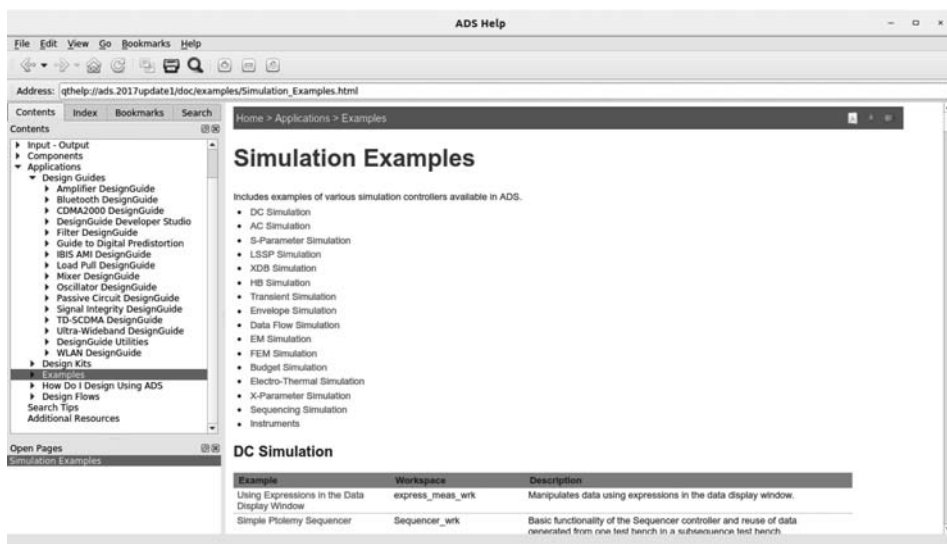


图 1.14 ADS 仿真示例



图 1.15 MMIC 概述

绝大多数情况下，我们并不清楚遇到的问题归属于哪类主题，因此最常用的方式是直接输入关键词进行搜索，再快速浏览搜索到的主题列表，打开可能相关的主题看其内容是否命中需求，否则更换关键词重新搜索。图 1.16 是利用关键词“mmic”搜索到 MMIC 相关的设计示例，点击示例名称的超链接可以跳转到具体说明页面。

1.2.3 搜索技巧

要想更好地利用 ADS 的帮助搜索功能从而快速检索到期望的帮助信息，有必要了解其基本特点和搜索技巧。以下内容完全参考自 ADS 的帮助文档。

1. 基础搜索

ADS 帮助文档的搜索功能是不区分大小写的，基础搜索框支持以下几种搜索方式：

- 单个关键词

simulation

搜索所有包含关键词 *simulation* 的页面。

- 两个或多个关键词

simulation manager

搜索所有同时包含关键词 *simulation* 和 *manager* 的页面，不限制各个关键词出现的顺序，也允许关键词被其他字词分隔开。

ads simulation manager

搜索所有同时包含关键词 *ads*、*simulation* 和 *manager* 的页面，不限制各个关键词出现的顺序，也允许关键词被其他字词分隔开。

- 短语

“simulation manager”

搜索所有包含短语 “*simulation manager*” 的页面，短语必须加上英文的双引号（“ ”），且短语不可分割、严格限制顺序。

“manager simulation”

搜索所有包含短语 “*manager simulation*” 的页面，短语必须加上英文的双引号（“ ”），且短语不可分割、严格限制顺序。本例与 “*simulation manager*” 结果不同。

- 通配符 (*, ?) ^①

*simu**

搜索所有包含以 *simu* 开头词语的页面，星号 (*) 代表任意多个字符，例如包含 *simulink*、*simulation*、*simulation manager* 之类关键词的页面。

*te*t*

搜索所有包含形如 *test*、*text*、*tetravalent*、*tenet* 之类词语的页面，星号 (*) 代表任意多个字符。

simu?

^① 不允许使用通配符作为任何关键词或者短语的第一个字符。

搜索所有包含以`simu` 开头后边最多仅跟一个字符结尾的词语的页面，问号 (?) 代表任意一个字符，例如包含`simu`、`simul`、`simu2`、`simus` 之类关键词的页面。

`te?t`

搜索所有包含形如`test`、`text` 之类词语的页面，问号 (?) 代表任意一个字符。

- 排除关键词

`simulation—manager`

搜索所有包含关键词 `simulation` 且不包含关键词 `manager` 的页面，减号 (–) 代表排除右侧关键词。

2. 高级搜索

当基础搜索结果不满意时可以考虑使用高级搜索来进行复杂查找，点击基础搜索框下方的加号 (+) 按钮即可展开高级搜索框，高级搜索框支持以下类型的搜索操作：

- 形如某个关键词；
- 不包含某些关键词；
- 包含某个特定的短语；
- 同时包含多个关键词；
- 至少包含多个关键词中的一个。

以上选项依次对应图 1.18 的搜索框。

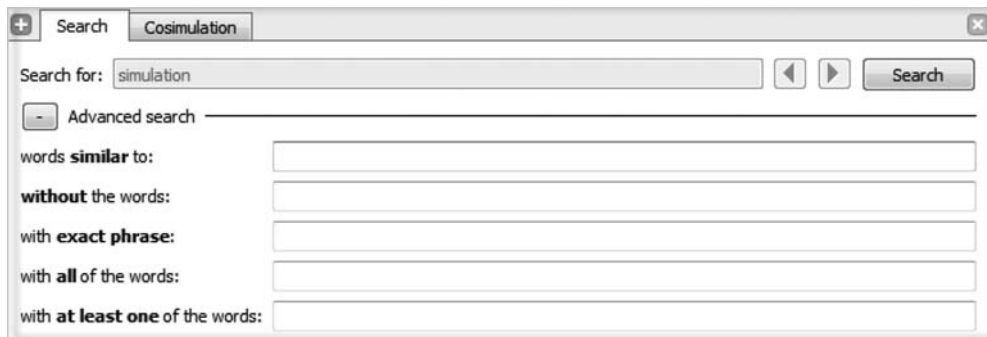


图 1.18 ADS 高级搜索框

记住，F1 快捷键是获取帮助的最快方式，无论你是在设计还是仿真过程中遇到问题，都可以随时按下 F1 快捷键来快速获得帮助。

第2章

关于PDK

由于 PDK 都是代工厂（Foundry）有条件提供给签订了保密合作协议的机构（用户）的，不允许泄露给任何第三方组织或个人。不同 Foundry 的 PDK 会有所不同。这里仅以稳懋半导体（WIN Foundry）提供的 PDK 为例简单介绍一下 MMIC 设计用到的 PDK 通常包含的内容，供刚接触 MMIC 设计的朋友参考。

2.1 PDK 资源包主要文件

2.1.1 Readme

之所以把这个文件放在首位，是因为 Readme 在任何资源包中都应该首先查看。这个文件概要描述了 PDK 压缩包一共包含了哪些资源，以及这些资源的版本和用途信息。

2.1.2 工艺介绍

工艺合格报告，一般会给出器件的主要性能参数、典型曲线、工艺制程简介以及可靠性测试报告。

2.1.3 不同软件平台对应的 PDK

大部分 Foundry 都同时提供 ADS、MWO 的 PDK，一般 Cadence 下没有完整意义上的 PDK，因为只支持 Layout、LVS、DRC，没有用于仿真的电路模型。

2.1.4 测试数据

本工艺中一些典型器件（如电阻、晶体管、二极管）的 DCIV 测试数据，包括典型尺寸和不同偏置条件下晶体管的负载牵引（Load pull）数据，晶体管的噪声实测数据，晶体管、二极管等器件的实测 S 参数等。

2.1.5 History File

记录本文档包中各个文件的版本历史。

2.1.6 Model Handbook

本 PDK 中主要器件的模型介绍、典型实测数据与模型曲线。

2.1.7 Design Manual

本工艺规定的图层信息、设计规则（DRC 要求，例如线宽、间距）、材料厚度、电导率等属性。

2.2 PDK 的安装与使用

下面以 ADS 自带的 Demo Design Kit 为例介绍 PDK 的安装与使用。

（1）在 ADS 主界面中选择【DesignKits】-【Manage Favorite Design Kits...】，如图 2.1 所示。

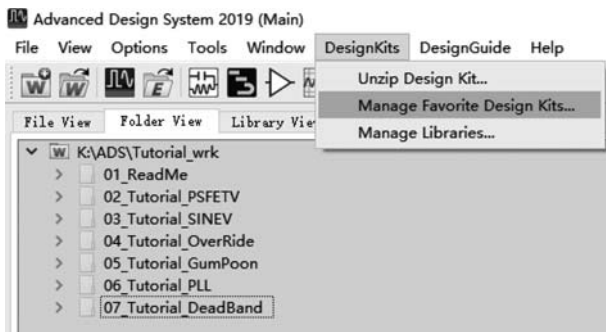


图 2.1 管理常用 PDK

（2）选择【Add Zipped Design Kit...】，浏览到 Foundry 提供的 ADS 平台的 PDK 压缩包：“*.zip”，如图 2.2 所示。

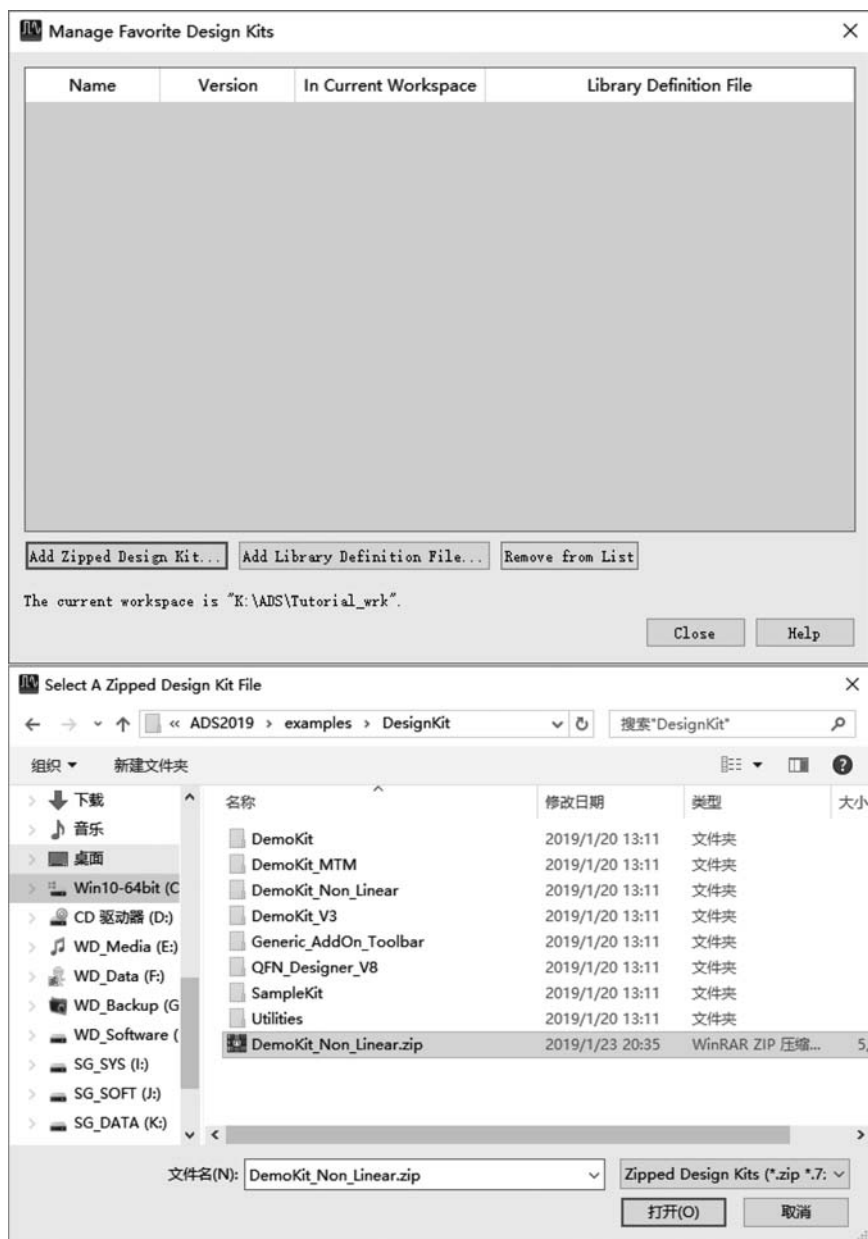


图 2.2 添加 PDK 压缩包

(3) 也可以先自行将 zip 压缩包解压到 PDK 文件夹, 再选择【Add Library Definition File...】, 浏览到解压后 PDK 文件夹, 选择“lib.defs”, 如图 2.3 所示。

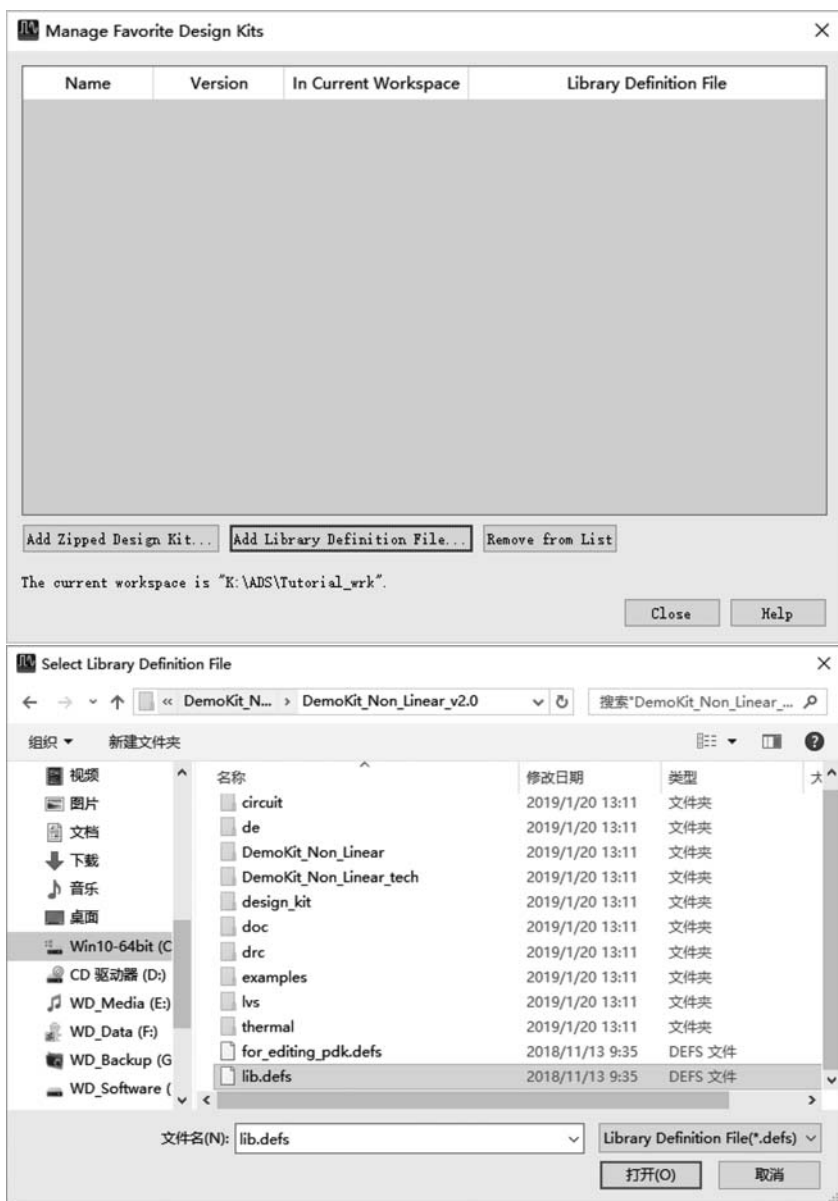
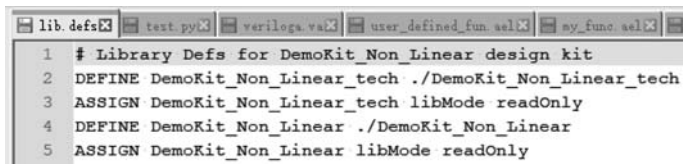


图 2.3 添加解压后的 PDK

“lib.defs”是一个用于定义 Library 的文本文件,类似 Cadence 环境中的“cds.lib”文件,其内容如图 2.4 所示。

(4) 如果要移除当前工程中的某个 PDK 或者 Library,在 ADS 主界面菜单

选择【DesignKits】-【Manage Libraries...】，此时会列出当前工程中添加的所有 Library。选中想要移除的 Library，点击【Remove】按钮，如图 2.5 所示。



```

1 # Library Defs for DemoKit_Non_Linear design kit
2 DEFINE DemoKit_Non_Linear_tech ./DemoKit_Non_Linear_tech
3 ASSIGN DemoKit_Non_Linear_tech libMode readOnly
4 DEFINE DemoKit_Non_Linear ./DemoKit_Non_Linear
5 ASSIGN DemoKit_Non_Linear libMode readOnly

```

图 2.4 lib.defs 文件内容

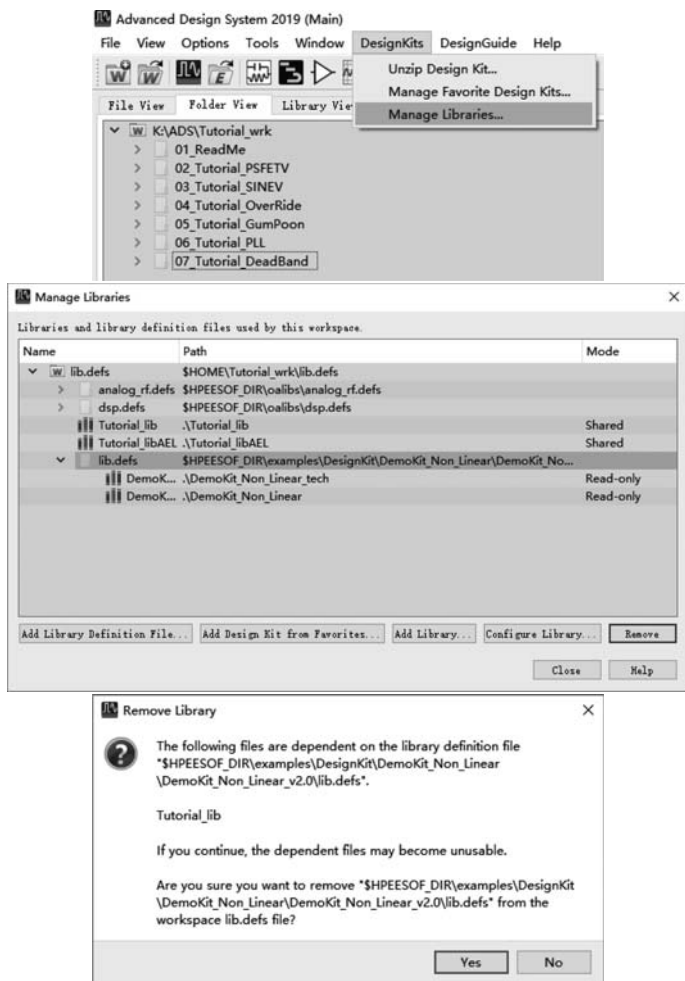


图 2.5 移除 PDK/Library

(5) 添加完 PDK 就可以在元件面板上看到该 PDK 提供的所有元件了, 点击相应元件即可将该元件放置到 Schematic 或者 Layout 中, 如图 2.6 所示。绝大部分 ADS 标准的 PDK 都有一个工艺包含控件 (TechnologyInclude), 用于将该工艺相关的参数和模型设置都包含进来, 有点类似于 C 语言中的 “*.h” 头文件。若某个 Schematic 用到了该 PDK 的电路元件, 则必须添加一个该 TechnologyInclude 控件才能在那个 Schematic 中进行仿真。

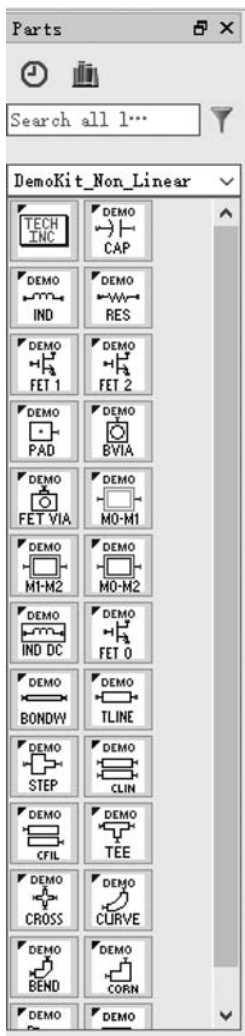


图 2.6 PDK 元件面板

GaAs工艺简介

半导体材料在过去主要历经了三代。第一代半导体材料以硅 (Si) 和锗 (Ge) 等元素半导体为代表, 主要应用于低压、低频、中功率晶体管、光电探测器等。第二代半导体材料以砷化镓 (GaAs) 和磷化铟 (InP) 等化合物半导体为代表, 主要应用于微波器件、毫米波器件、发光器件等。第三代半导体材料以氮化镓 (GaN)、碳化硅 (SiC) 等宽禁带化合物半导体为代表, 主要应用于高温、高频、抗辐射、大功率器件、半导体激光器等领域。与第一代单质半导体相比, 第二代和第三代化合物半导体材料具有高热导率、高击穿场强、高饱和电子漂移速率和高键合能等优点, 可以满足现代电子技术在高温、高功率、高压、高频以及抗辐射等恶劣条件下的新要求。化合物半导体材料是半导体材料领域最有前景的材料, 在国防、航空、航天、石油勘探、光存储等领域有着重要的应用前景, 在宽带通信、太阳能、汽车制造、半导体照明、智能电网等众多战略性行业可以降低 50% 以上的能量损失, 最高可以使装备体积减小 75% 以上, 对人类科技的发展具有里程碑意义。

化合物半导体典型材料包括 GaAs、InP、GaN、SiC 以及以氧化镓 (Ga_2O_3) 和金刚石为代表的超宽禁带化合物半导体。半绝缘 GaAs 材料在制作电子器件和集成电路方面有着广泛的应用。GaAs 金属-半导体场效应晶体管 (MESFET)、高电子迁移率晶体管 (HEMT)、GaAs 基异质结双极晶体管 (HBT) 等器件在民用通信、微波通信以及国防军事领域中有着重要的应用, 这对推进 GaAs 的发展起到了非常大的促进作用。在光电子器件方面, GaAs 材料主要用于制作发光二极管 (LED)、激光器 (LD) 以及太阳能电池。GaAs 材料制备的光电子器件主要应用于光通信、交通信号灯以及国防军事等领域。针对已经市场化应用的化合物半导体 GaAs、InP、GaN、SiC, 其器件类型以及应用领域总结如表 3.1。

射频器件包括射频开关 (RF Switd)、低噪声放大器 (LNA)、功率放大器 (PA)、滤波器、调谐器和毫米波射频前端模组 (FEM) 等, 其中 PA 和滤波器是射频器件的重要部分。基于功耗和成本等因素, 消费终端产品更多采用互补金属氧化物半导体 (CMOS) 技术; 客户终端设备 (CPE) 采用 CMOS 和锗硅双极互补金属氧化物半导体 (SiGe BiCMOS); 低功耗接入点则采用 CMOS、SiGe BiCMOS 和 GaAs。4G 长期演进技术 (LTE) 频段, 射频 PA 采用的工艺分别是 GaAs、绝缘体上硅 (SOI)、CMOS 和 SiGe, 4G 智能手机中 PA 均采用 GaAS, GaAs 占有绝对地位; 射频开关采用绝缘体上硅 (SOI)、GaAs 工艺; LTE LNA 采用的工艺多为 SOI、CMOS; 宏基站、小基站领域则是 GaAs 和 GaN 并存。

表 3.1 主要化合物半导体器件类型和应用领域总结

应用领域	器件类型	器件种类	材料			
			InP	GaAs	GaN	SiC
5G 通信、国防	射频器件	HEMT	✓	✓	✓	
		pHEMT		✓		
		MESFET		✓		✓
		HBT	✓	✓		
		DHBT		✓		
		MMIC/RFIC		✓		
照明、3D 传感	光电器件	半导体激光器	✓		✓	
		APD/PD	✓			
		LED		✓	✓	✓
汽车、电力电子	功率器件	HEMT			✓	
		Cascode				✓
		SBD			✓	✓
		MOSFET				✓
		IGBT				✓

5G Sub-6GHz 频段, 手机射频器件仍是 GaAs 的主场, 基站端会采用硅基氮化镓 (GaN-on-Si) 射频器件; 射频前端将向封装集成、单片集成、天线集成发展, RFIC/MMIC 是芯片集成趋势。

5G 毫米波频段, GaN-on-SiC、GaN-on-GaN 射频器件有很大潜力, 传统的 GaN HEMT 不能满足要求, AlGaN/GaN HEMT 高频器件还在研究阶段^[1]。

3.1 GaAs

GaAs 是一种重要的半导体材料, 属 III-V 族化合物半导体, 属闪锌矿型晶格结构, 晶格常数为 $5.65 \times 10^{-10} \text{m}$, 熔点 1237°C , 禁带宽度 1.4eV 。GaAs 于 1964

年进入实用阶段，可以制成电阻率比 Si、Ge 高 3 个数量级以上的半绝缘高阻材料，用来制作集成电路衬底、红外探测器、 γ 光子探测器等。由于其电子迁移率比 Si 大 5~6 倍，故在制作微波器件和高速数字电路方面有着重要应用。用 GaAs 制成的半导体器件具有高频、高温、低温性能好、噪声小、抗辐射能力强等优点。此外，还可以用于制作转移器件——体效应器件。GaAs 是半导体材料中兼具多方面优点的材料，但用它制作的晶体三极管的放大倍数小、导热性差，不适宜制作大功率器件。虽然 GaAs 具有优越的性能，但由于它会在高温下分解，故要生产理想化学配比的高纯单晶材料，技术上要求还比较高。

3.2 pHEMT

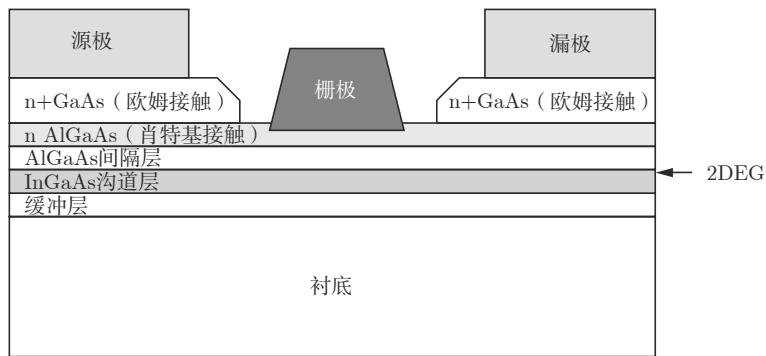
像传统的 Si 半导体发展出 BJT、CMOS、BiCMOS 工艺一样，GaAs 半导体也发展出了多种不同晶体管类型：HEMT、pHEMT、BiHEMT、HBT 等。不同工艺有不同的特点，应用场合也有差异。比如 HEMT 尤其适合低噪声和高线性的场合，HBT 主要用于 VCO 和手机 PA，BiHEMT 是 HEMT 和 HBT 的结合产物，类似于 BiCMOS 是 BJT 和 CMOS 的结合产物。本节着重介绍 pHEMT 工艺。

pHEMT 是对 HEMT 的一种改进结构，也称为栅调制掺杂异质结场效应晶体管 (PMODFET)。pHEMT 中的 2-DEG 要比普通 HEMT 中的受到更多限制（有势阱两边的双重限制作用），从而具有更高的电子面密度（约高 2 倍）；同时，其电子迁移率也较高（比 GaAs 中的高 9%），因此 pHEMT 的性能更加优越。总之，pHEMT 具有双异质结的结构，这不仅提高了器件阈值电压的温度稳定性，而且改善了器件的输出伏安特性，使得器件具有更大的输出电阻、更高的跨导、更大的电流处理能力以及更高的工作频率、更低的噪声等。

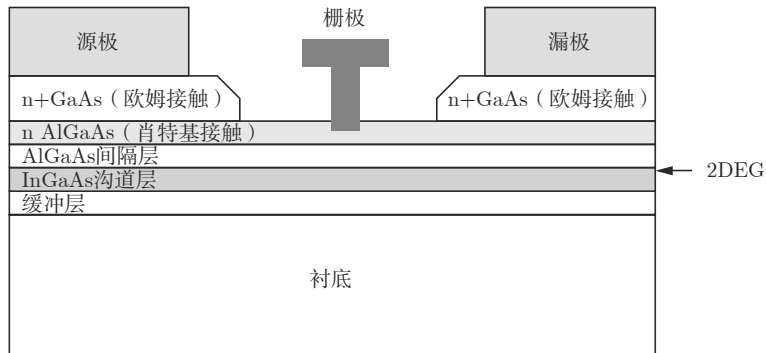
pHEMT 结构的截面如图 3.1 所示，可见图中的漏极 (D) 和源极 (S) 是关于栅极 (G) 对称的，因此漏极和源极在使用中是可以互换的。但是，在一些侧重 PA 应用的 pHEMT 工艺中，为了提高漏极和栅极之间的击穿电压 $V_{DG|BR}$ ，会有意将栅极远离漏极而靠近源极，这时对称性就不成立了。

几乎所有 GaAs 工艺的互连金属都是金。金属的导电率是跟截面尺寸相关的，对于栅长较大，如 $0.5\mu\text{m}$ 以上的工艺，栅极一般是梯形或者矩形截面。对于工作频率较高、栅长较小，如 $0.25\mu\text{m}$ 以下的工艺，其根基部位的截面尺寸即栅长，向上延伸呈 T 形或者 Y 形，这是为了减小栅极金属的电阻，从而提升性能。

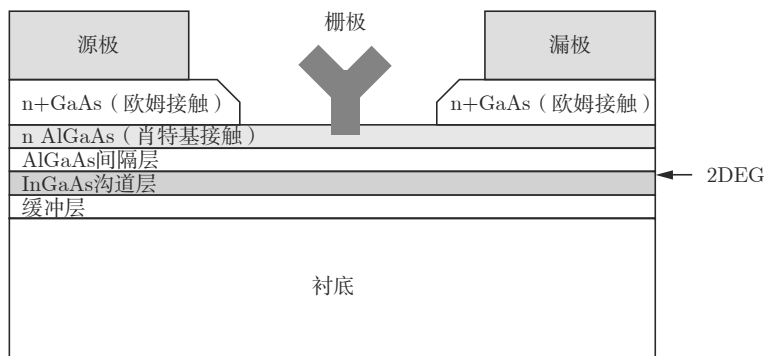
GaAs 工艺的互连金属一般只有两层，作者见过最多的有三层，故走线复杂程度非常有限，为了满足走线宽度和间距等设计规则，布局布线时一般只能增加面积。这也就使 GaAs 工艺所制作的 MMIC 芯片的集成度和规模都远远不及 CMOS。



(a)



(b)



(c)

图 3.1 pHEMT 截面图
(a) 梯形^[2]; (b) T 形; (c) Y 形

3.3 主要元件

GaAs 工艺一般支持以下元件：电阻、电容、电感、pHEMT 晶体管、肖特基二极管和静电放电（Electro-Static Discharge, ESD）保护二极管。

3.3.1 电阻

1. TFR 电阻

电阻又分为薄膜电阻（TFR）、体电阻（Mesa）。绝大部分射频应用的 GaAs 工艺中，薄膜电阻的方阻值是 50Ω ，跟陶瓷薄膜工艺类似，采用镍铬（NiCr）等合金材料，一般用于阻值较小、精度较高、温度系数较敏感的场所，比如衰减器、匹配负载。有些特殊工艺中也提供了一种高值 TFR 的选项，其方阻高达 5000Ω ，适合于需要较复杂逻辑控制电路的多功能芯片中。TFR 的平面版图示例如图 3.2(a) 所示。

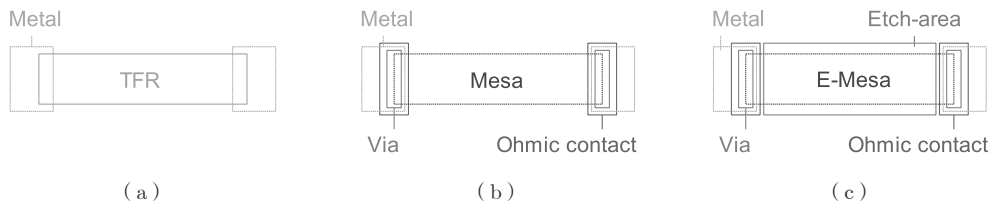


图 3.2 电阻
(a) TFR; (b) Mesa; (c) Etched-Mesa

2. Mesa 电阻

本节所述“体”借用了硅工艺中“Bulk”的概念，体电阻是利用 GaAs 表面的外延层本征导电性而制作的电阻，或者对 GaAs 衬底局部掺杂（离子注入），并通过控制其掺杂浓度以及掺杂深度控制其电阻率。方阻值会随工艺波动，一般在 $200\sim 250\Omega$ 之间。Mesa 电阻的另一个缺点是存在较强的非线性，即不同电流下对应的阻值不同，通常是电流越大阻值变化越剧烈，因此 Mesa 电阻多用于电流较小、阻值较大、精度不高、温度系数不敏感的场所。Mesa 是平顶、台面的意思，当电阻区域周边被刻蚀后，电阻自身就形成一个略高的平台；又由于在外延层，有些工艺也称为 Epi 电阻。Mesa 电阻的平面版图示例如图 3.2 (b) 所示，电阻两端金属引线半导体材料使用欧姆接触进行连接，避免形成肖特基接触。有些工艺还会在普通 Mesa 电阻的基础上，将其表面进行局部刻蚀，等效于掺杂深度减小，导电层变薄；也可能是对其侧边衬底材料进行刻蚀以增强绝缘性，称为 Etched Mesa 或 Recessed Mesa，方阻值提高到 $400\sim 500\Omega$ ，其平面版图示例如图 3.2 (c) 所示。

3.3.2 电容

1. 叉指电容

交指电容是一种单层平面结构的电容，利用两个互相交叉、有一定间距的金属电极，电极的侧边形成微小的互耦电容，形状类似交叉的手指，也称为叉指电容，如图 3.3(a) 所示。容值大小取决于“手指”的数量与间距，数量越大，间距越小，容值越大。这种电容的容值一般在 500fF 以下，精度优于 5%，适用于毫米波等高频应用中。

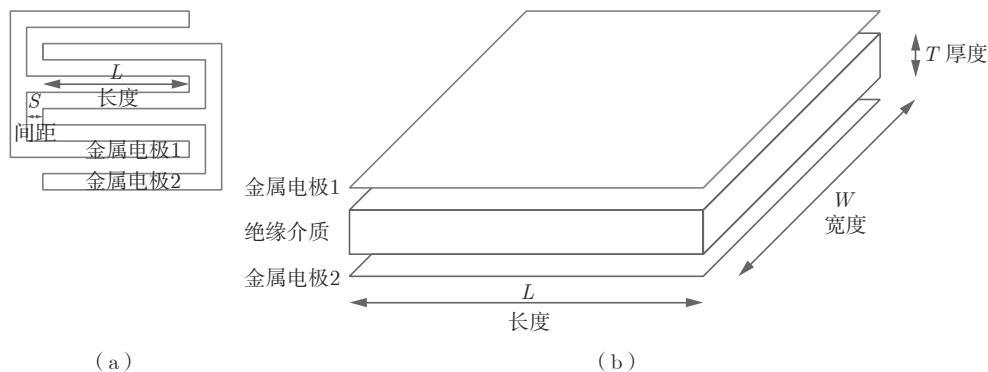


图 3.3 电容
(a) 叉指电容; (b) MIM 电容

2. MIM 电容

GaAs 工艺中最常见的电容为金属 (metal)-绝缘介质 (insulator)-金属 (metal) 叠层结构，如图 3.3(b) 所示，称为 MIM 电容。其实就是中学课本里讲的平行板电容。金属一般是金，绝缘介质一般是二氧化硅 (SiO_2) 或者氮化硅 (SiN)。金属极板面积越大、金属极板间距 (绝缘层厚度) 越小、绝缘介质的介电常数越大，则容值越大。一般的 MIM 电容密度为 $300 \sim 600\text{pF}/\text{mm}^2$ ，容值精度一般在 5%~20%，适用于绝大部分微波电路。

3. Stack 电容

有些具有三层互连金属的工艺，或者把栅极金属层加上两层互连金属，支持 MIMIM 的多层重叠结构，即 Stack 电容。这种电容可以看成共用一个电极板的两个 MIM 电容，使用中既可以把上层和下层金属短接作为一个电极，中间层为另一个电极，等价于两个 MIM 电容并联，容值加倍，如图 3.4 (a) 所示；也可以把上下层金属分别作为一个电极，中间层金属悬空，等价于两个 MIM 电容串联，容值减半，如图 3.4 (b) 所示。

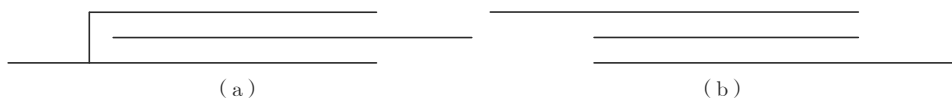


图 3.4 Stack 电容
(a) 并联；(b) 串联

3.3.3 电感

由于是平面电路，集成电路中的电感不像分离器件那样绕成立体螺线圈，而只能是平面上半径逐渐增加的阿基米德螺旋或方形或八角形线圈，如图 3.5 所示。又由于整个线圈对地、匝间都存在寄生电容，所以自谐振频率偏低。电感量增大，需要绕制的圈数和长度都需要增加，金属线自身的直流电阻也随之增大，则欧姆损耗增大，电感的 Q 值降低。分离器件中，绕线电感 Q 值为 100~500，陶瓷电感 Q 值为 50~100。而集成电路中的电感 Q 值一般为 10~50，因此用 GaAs 工艺制造的平面 LC 滤波器损耗较大，矩形系数较低。

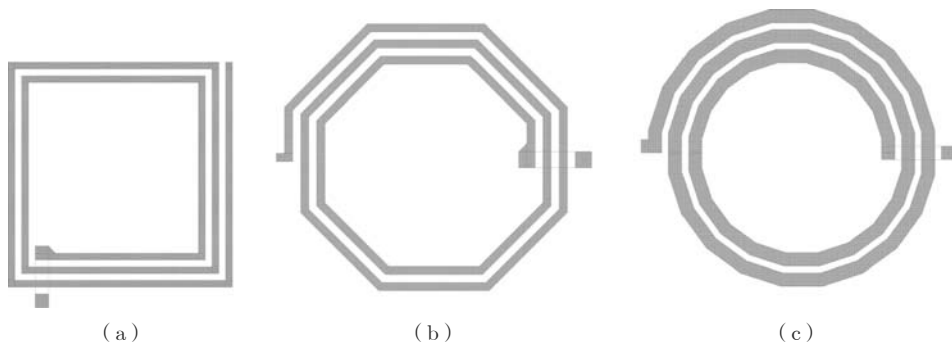


图 3.5 平面电感
(a) 方形；(b) 八角形；(c) 螺旋形

3.3.4 晶体管

典型的 pHEMT 晶体管版图示例如图 3.6(a) 所示，这里展示的是一种 D 极、S 极关于 G 极对称的结构，多个呈并联关系的电极之间是通过金属互连的，G 极和 D 极引线分别在左右两侧，比较适用于放大器的布局。对于射频开关，晶体管一般都是按共栅极的方式使用，为了布局方便，通常会将 D 极、S 极从左右侧引出，G 极从上下侧引出，设计为如图 3.6(b) 所示的结构。

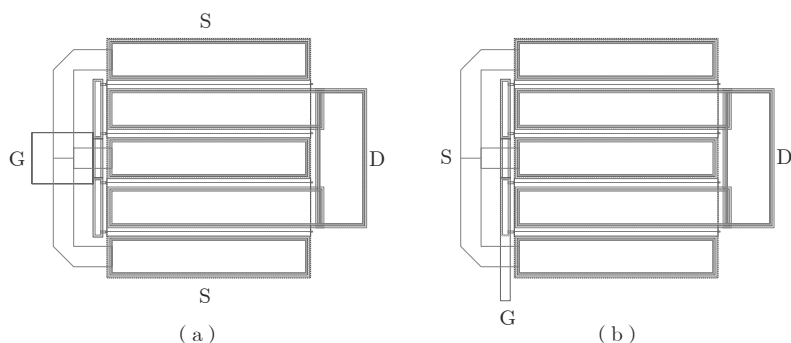


图 3.6 pHEMT 平面图
(a) 放大管；(b) 开关管

3.3.5 二极管

1. 肖特基二极管

金属通过欧姆金属与半导体表面产生欧姆接触，即形成一个肖特基二极管。MMIC 工艺中的肖特基二极管一般做法是把 pHEMT 晶体管的 D 极、S 极短路作为阴极，把 G 极作为阳极，平面版图示例如图 3.7 (a) 所示。一些特殊或者专用的分立二极管元件结构会有差异，但其机理相同。如图 3.7 (b) 所示为一对反向并联点接触肖特基二极管的显微照片。

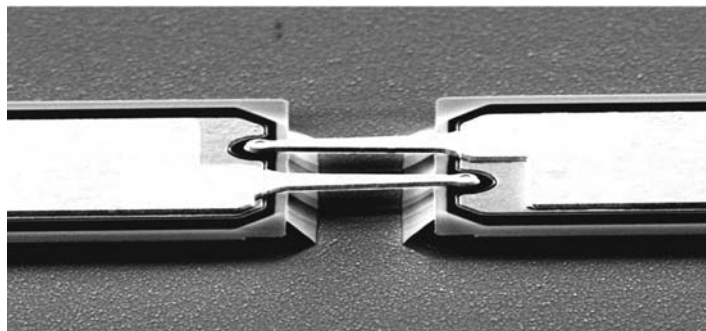
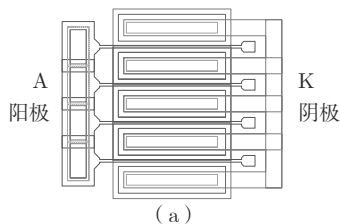


图 3.7 肖特基二极管
(a) 平面版图示例；(b) 一对反向并联的点接触肖特基二极管

2. ESD 保护二极管

常见的静电放电（ESD）保护手段都是双向并联二极管，这里的二极管主要有两种：肖特基二极管和 PN 二极管。但是如上节介绍的将 pHEMT 晶体管 D 极、S 极短接得到肖特基二极管，由于 G 极栅长较小，其能承受的最大电流有限，很难承受 ESD 的瞬间高压大电流。如果用肖特基二极管做 ESD 保护，一般会故意将其栅长做大，达到 $2\mu\text{m}$ 左右，WIN Foundry 将其称为“胖栅”肖特基二极管（fat-gate schottky diode），如图 3.8（a）所示。作者认为，GaAs 中的 PN 二极管其实是 HBT 工艺的产物，类似于 BJT，通过 P 掺杂和 N 掺杂形成 PN 结，一些代工厂（Foundry）将 HBT 中的 PN 二极管整合到标准 pHEMT 工艺中，以满足 ESD 的应用需求，如图 3.8（b）所示。

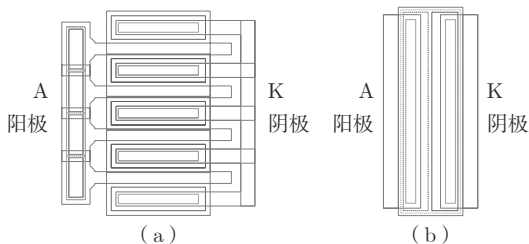


图 3.8 ESD 保护二极管
(a) “胖栅”肖特基二极管；(b) PN 二极管

3.3.6 焊盘

芯片一般通过金丝或者铝丝键合的方式与外部电路进行连接，而金丝或铝丝的起始点（键合点）都需要足够厚度的裸露同质金属。芯片上提供的键合点即称为焊盘，得名和作用均类似于传统印制电路板（PCB）中提供器件焊接或者引线的焊盘。焊盘也可以为探针测试提供接触连接点。GaAs 工艺的焊盘一般是两层金属，或者至少有顶层厚金属，厚度一般大于 $2\mu\text{m}$ ，否则不利于键合。对于芯片表面有保护层的工艺，需要给焊盘部位增加保护层开窗（即不覆盖保护层）以确保金属裸露，否则无法键合，类似于传统 PCB 表面的阻焊层。图 3.9 为一段 CPWG 直通校准件，其两端为常见的供射频探针测试的 GSG 焊盘。

3.3.7 地孔

MMIC 芯片的背面一般是全部金属化的，作为顶层走线的参考地。GaAs 支持衬底通孔（through-substrate-via, TSV）接地，即贯穿衬底的金属化介质通孔，直接将正面金属与背面金属连通，达到接地的目的，称为地孔或背孔（back via）。不

同工艺中的地孔形状和尺寸多有差异，有些是圆形，有些是椭圆形。图 3.9 中展示的地孔为圆形。

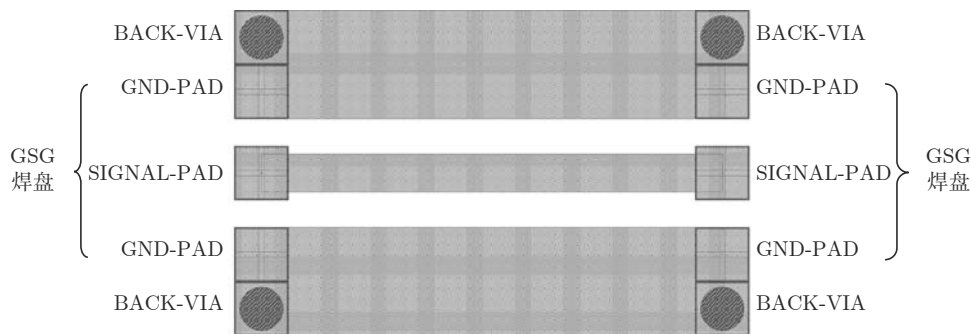


图 3.9 直通校准件两端的 GSG 焊盘

参考文献

- [1] 黄嘉晔, 王轶滢, 叶树梅, 等. 化合物半导体发展现状分析 [J]. 功能材料与器件学报, 2020, 26(3): 177-183.
- [2] Saravanan G, Bhatk M, Muraleedharan K, et al. Ohmic contacts to pseudomorphic HEMTs with low contact resistance due to enhanced Ge penetration through Al GaAs layers[J]. Semiconductor Science and Technology, 2008, 23(2): 169-177.

MMIC设计第一步

作者刚接触 MMIC 设计时也是一片茫然，除了查阅文献、看参考书和 ADS 帮助文档，还特意找了很多 MMIC 实物到显微镜下观察研究，顺便把照片拍下来方便随时查看。虽然还不知道 MMIC 是怎么设计出来的，但是作为学习的第一步，多看看别人做出来的 MMIC 长什么样子总是有意义的。还记得在显微镜下研究的第一片放大器是 HMC451，第一片混频器是 HMC553。

以下分享一些从网络文献、参考书籍以及作者自行拍摄的 MMIC 照片供读者了解学习，部分照片由于考虑到版权问题特地对芯片型号和生产商名称进行了涂抹遮盖。

4.1 放大器

放大器根据应用场合不同，指标侧重点也有所不同。接收机的噪声系数主要受输入级放大器影响，故输入级放大器尤其侧重低噪声，必须采用低噪声放大器；中间级对噪声贡献较小，主要提供小信号增益，故一般采用通用放大器；接收机的输出级放大器和发射机的末级输出放大器则会重点考虑输出功率，一般采用功率放大器。

4.1.1 低噪声放大器

如图 4.1 所示为一个低噪声放大器的原理图与版图^[1]，电路采用了电流复用的结构，其两级放大器在直流通路上是串联的关系，电流相等；射频通路上两级放大器可以看作两个共源放大器前后级联，增益相乘（对数相加）。版图中特意标注出了

主要元件，请读者结合 3.3 节的介绍，对比原理图与版图识别各个元件，熟悉主要元件的版图与实物图的对应关系。

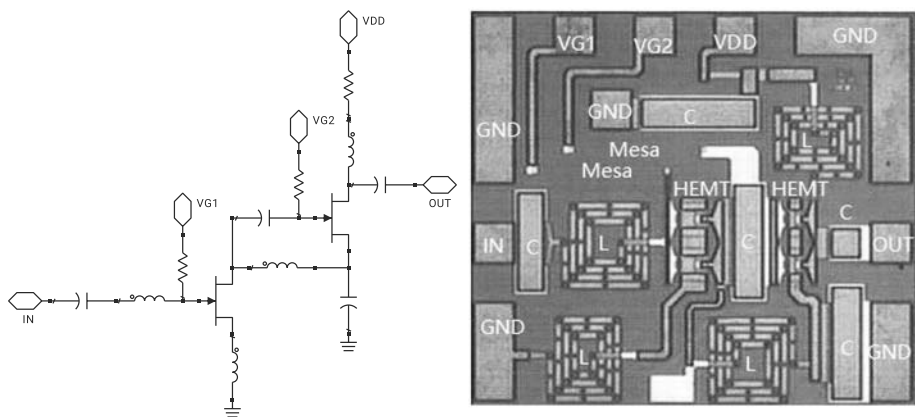
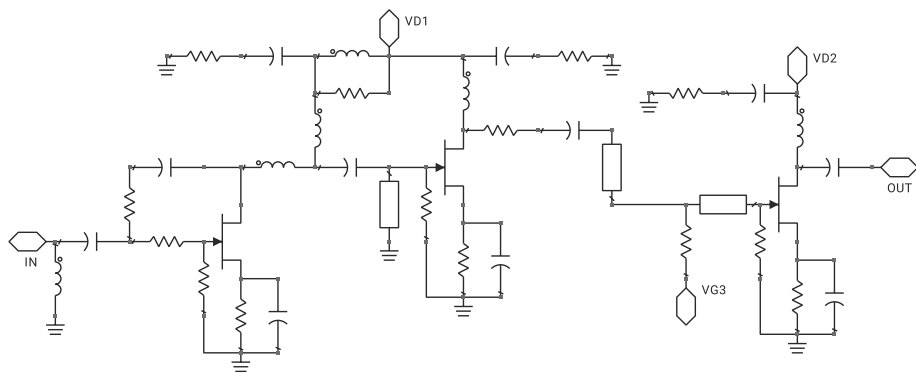


图 4.1 低噪声放大器 1
(a) 原理图；(b) 版图

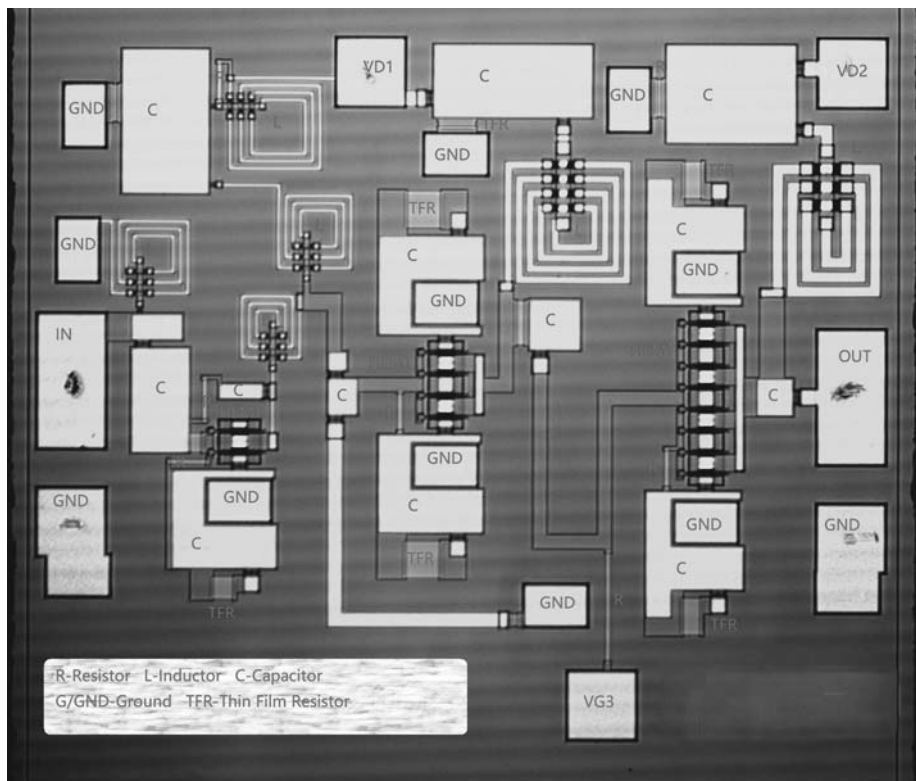
4.1.2 通用放大器

如图 4.2 所示为一个三级通用放大器，每一级均采用了自偏置的供电方式，省去了给栅极施加负电源的需求，仅需给漏极提供正电源；仅第一级增加了负反馈，后两级均无负反馈。值得一提的是，所有电源焊盘均增加了接地的去耦电容。为了避免谐振，给每个去耦电容均串联了一个小电阻，这是一个非常常见的馈电处理手段。图中部分电阻几乎可以肯定是薄膜电阻，直接标注为 TFR，其他标注为 R 的电阻可能是 TFR，也可能是 Mesa。

如图 4.3 所示为一个三级通用放大器，每一级均采用了自偏置的供电方式，省去了给栅极施加负电源的需求，仅需给漏极提供正电源。三级放大级均无负反馈，优点是反向隔离度较高，但要想保持高带宽、高增益平坦度，匹配电路设计上需要花工夫。值得一提的是，所有电源焊盘均增加了接地的去耦电容。图中部分电阻几乎可以肯定是薄膜电阻，直接标注为 TFR，其他标注为 R 的电阻可能是 TFR，也可能是 Mesa。



(a)



(b)

图 4.2 通用放大器 1
(a) 原理图; (b) 版图

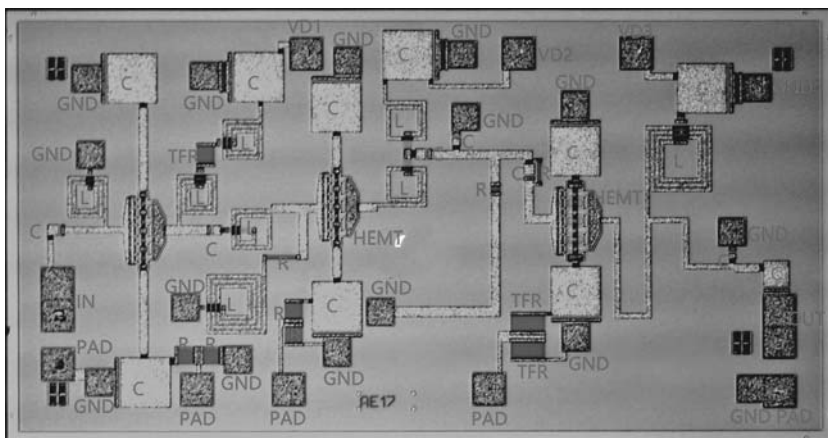


图 4.3 通用放大器 2

4.1.3 功率放大器

为了提高输出功率，功率放大器几乎通行的做法是增大晶体管尺寸和多个晶体管并联、多路放大器合成。图 4.4 是一款两级 GaN 功率放大器，输入匹配网络一分四到前级四只晶体管，然后又分别驱动后级两只晶体管，末级匹配网络完成八只晶体管的功率合成。除了各处电源均添加了去耦电容，值得一提的是图中相邻两个并联晶体管的栅极和栅极、漏极和漏极之间均并联了稳定电阻，用于防止奇模振荡，这也是非常普遍的做法。这种功率放大器原理上是相对简洁明了的，版图结构也非常相似，这里就不再一一分析，更多示例可以参考文献 [2]—[4]。

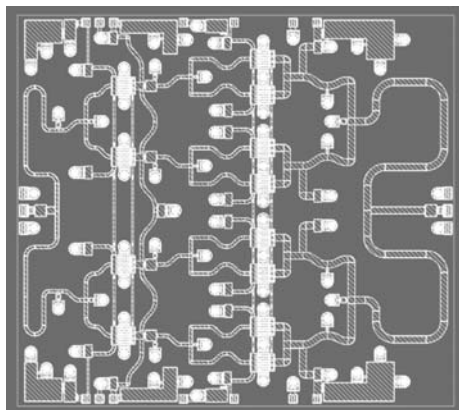


图 4.4 功率放大器

4.2 双平衡混频器

双平衡混频器是常用的变频器件，其主要优点是隔离度高、偶次交调产物抑制能力强、变频损耗小。

双平衡混频器的原理如图 4.5 所示，LO 和 RF 端口通过巴伦将不平衡（单端）信号转换成平衡（差分）信号，两组平衡信号分别加在环形二极管桥的两对顶点上。IF 既可以取两个巴伦的中心抽头作为一对差分输出，也可以将 LO 巴伦的中心抽头接地，取 RF 巴伦的中心抽头作为单端 IF 输出。从 LO 巴伦引出 IF 也是可以的，但由于巴伦的平衡度并非理想，LO 会泄漏到 IF 中，导致 LO-IF 隔离度偏低。因此 IF 一般从 RF 巴伦中心抽头引出，此时的 RF-IF 隔离度相较于 LO-IF 隔离度偏低。

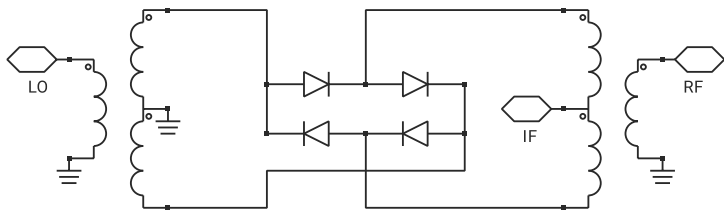


图 4.5 双平衡混频器原理图

最常见的传输线巴伦是 Marchand 巴伦，低频工作需要的 $1/4$ 波长传输线较长，故 Ku 波段以下的 Marchand 巴伦通常会将传输线进行折叠绕成类似于平面电感的形状以节省面积。其一次侧和二次侧的绕线如图 4.6 所示，C1 和 C2 为匹配元件。

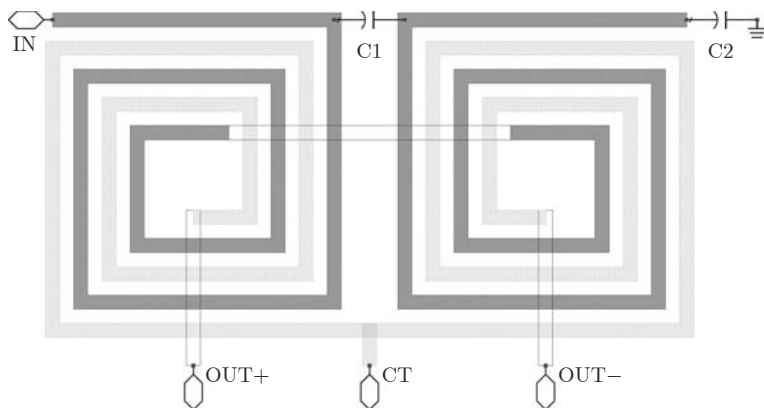


图 4.6 折叠式的 Marchand 巴伦

文献 [3] 展示了一个采用如图 4.6 所示巴伦的双平衡混频器，IF 抽头点添加了

小电容接地，用于提供 RF 旁路，从而提高 RF-IF 隔离度。而图 4.7所示的双平衡混频器总体结构仍然相似，只不过 RF/LO 输入时增加了 L、C 匹配元件，同时省去了图 4.6 中的 C2，改为直接接地。

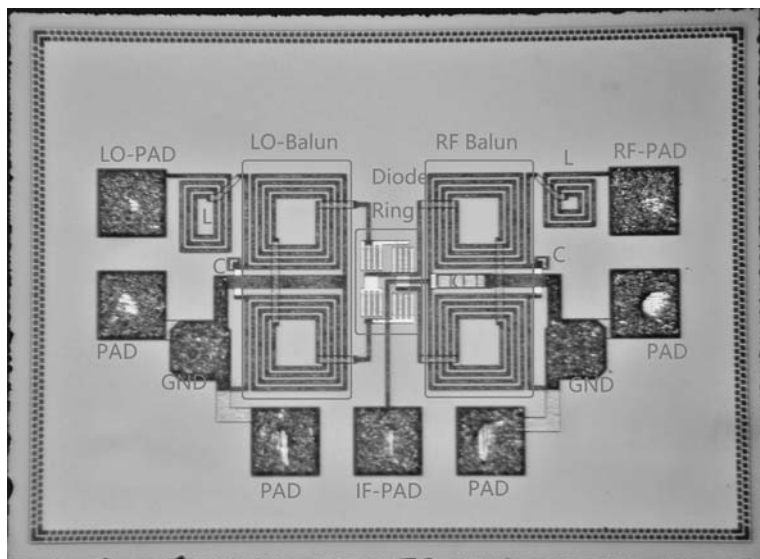


图 4.7 双平衡混频器 2

4.3 射频开关

射频开关也是非常基本的射频元件，用于在合适的控制信号作用下选择性地接通或者断开某条射频通路，达到控制射频信号通断或者走向的目的。常用的有单刀双掷（SPDT/SP2T）、双刀双掷（DPDT/2P2T）、单刀三掷（SP3T）、单刀四掷（SP4T）。其中单刀双掷开关最基本、最常用。

基本的反射式单刀双掷开关一般采用如图 4.8 所示的一串一并结构，串联管和并联管的数量直接影响插入损耗和隔离度，通常需要在各个指标之间折中考虑。

图 4.9 是一款反射式单刀双掷开关示例，采用了一串一并的基本结构。文献 [2] 还展示了两款类似开关的实物照片。

图 4.10 为一串两并结构的单刀双掷开关原理图^①，图 4.11 为一款一串三并结构的单刀双掷开关显微照片。一串多并开关结构的相邻两个开关会插入 $1/4$ 波长传输线，也称为分布式开关。

^① 引自 ADS 软件帮助文档。

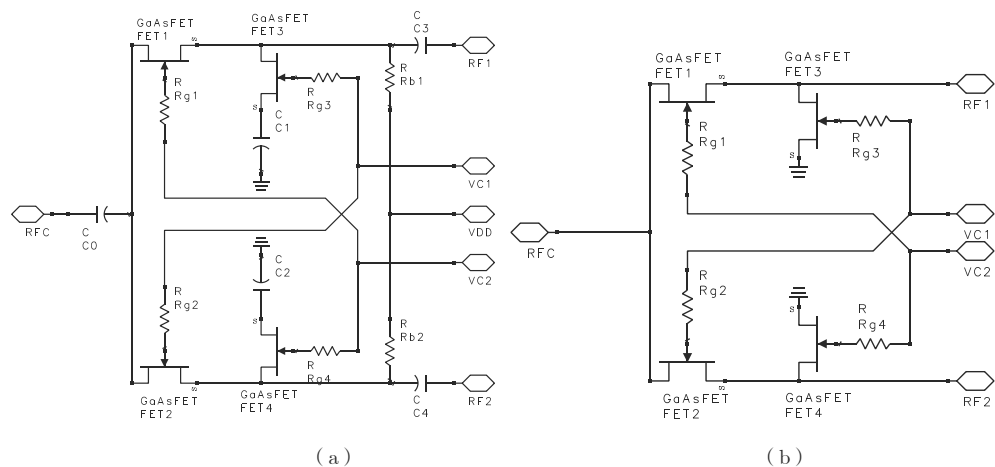


图 4.8 基本的反射式单刀双掷开关原理图
(a) 原理图 1; (b) 原理图 2

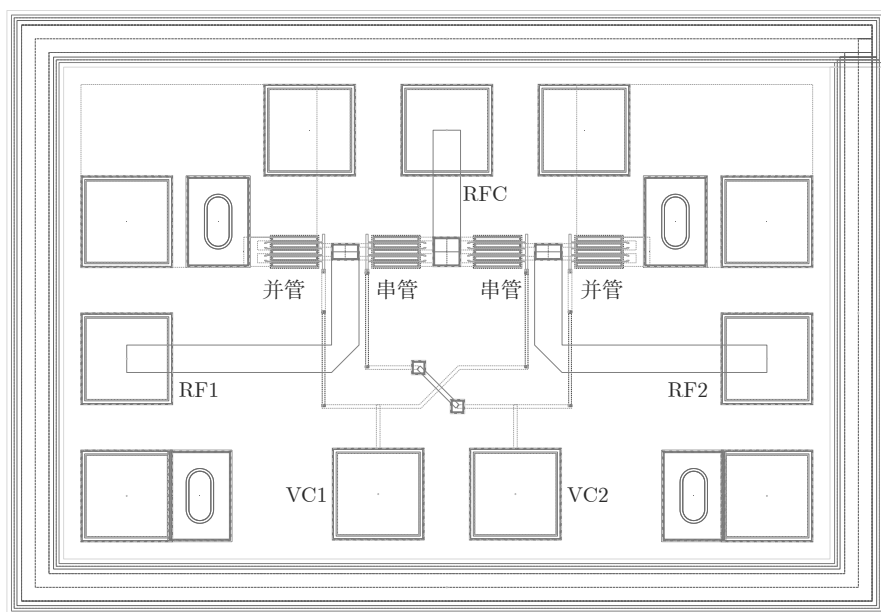


图 4.9 一串一并的反射式单刀双掷开关 1

4.4 数控衰减器

衰减器是一种提供衰减的电子元件，广泛地应用于电子设备中，它的主要用途是：①调整电路中信号的幅度大小；②在比较法测量电路中，可用来直读测网络的衰减值；③改善阻抗匹配，若某些电路要求有一个比较稳定的负载阻抗，可在此电路与实际负载阻抗之间插入一个衰减器，缓冲阻抗的变化。

在众多测试测量仪器、雷达、通信系统中，都需要在较大范围内、较精细地调整信号幅度大小，因此需要用到数控衰减器。一种基本的数控衰减器结构基于开关切换路径（switched-path）方式实现。如图 4.12 所示，通过一组联动的 SPDT 开关选择一个直通网络和一个固定衰减网络，衰减量取决于这两个网络的插入损耗之差。还有一种数控衰减器结构直接通过切换固定衰减器的电阻获得不同的衰减量，称为元件切换（switched-element）^[2]。

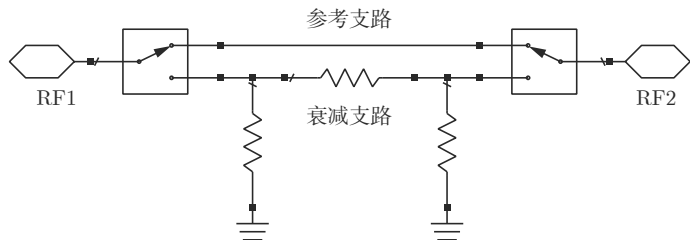


图 4.12 1 位数控衰减器原理图

多位数控衰减器即将多个基本的 1 位数控衰减器组合起来，这将导致总体的直通损耗（基态插入损耗）增加为各位直通损耗之和。为便于使用和数字化控制，每一位数控衰减器的衰减量按二进制取值，如 0.5dB、1dB、2dB、4dB、8dB、16dB、32dB。理想情况下，倾向于按大小顺序依次排列这些衰减位，但是由于各位衰减器的驻波、衰减精度并不一定都很好，在级联时会导致增益平坦度和衰减精度等恶化，因此组合级联时，会根据实际情况调整各位衰减器的排列顺序，从而尽量使整体的驻波、增益平坦度、衰减精度等指标等总体最优。

图 4.13 是一个 6 位的数控衰减器^[2]，可以看到各位衰减器整体是从大到小依次排列的，但最高位 bit6 拆分成了三个单元分别插入到其他几位衰减器之间，这便是如前文所述的原因。由于该数控衰减器没有集成开关驱动器，因此每一位衰减器都需要两个互补的控制信号（一般是 0/-5V）去控制开关切换。为减少控制信号数量、方便用户使用，通常会集成 TTL 输入、0/-5V 输出的开关驱动器，这样在省去负压控制的同时还使控制信号数量减半。

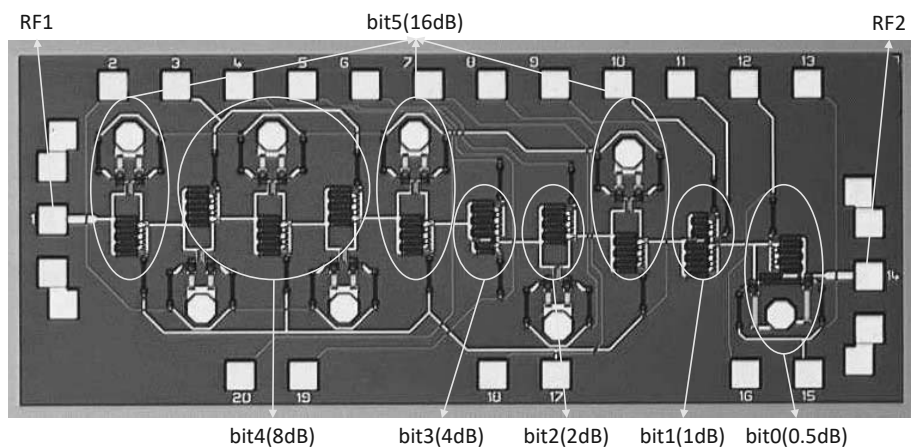
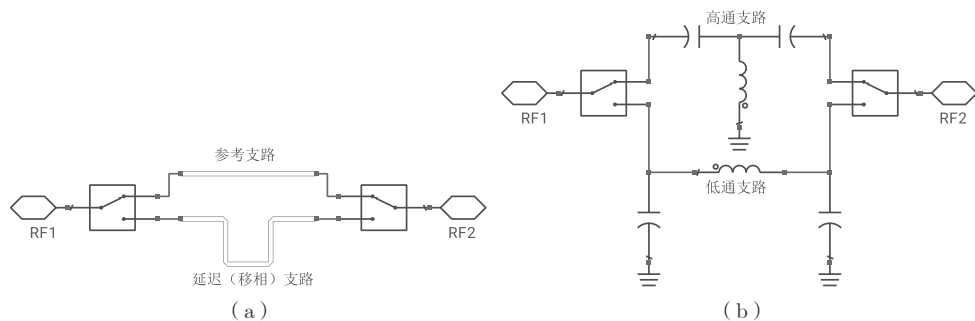


图 4.13 6 位数控衰减器

4.5 数控移相器

相控阵天线馈电系统、载波相干测量和众多通信系统中都需要用移相器对信号进行精确的程控移相操作。除模拟式移相器，数控移相器通常采用 SPDT 开关去切换两个具有不同相位延迟的传输网络，两个网络间的相位差即移相器的相移量。如图 4.14 (a) 所示，当相移量较小时，两个传输网络简化为两段长度不等的传输线，严格地讲其相时延（时间量纲）是常数而相位差（角度量纲）是频率的函数，但是在小步进、窄带范围内移相时，其相位差随频率的变化是可以忽略的。如图 4.14 (b) 所示，当相移量较大时，一般将两个传输网络做成高通、低通滤波器。熟悉滤波器幅频/相频特性的读者应该容易理解，其是利用高低通网络在通带内的线性相位差值来实现移相。

图 4.14 1 位数控移相器原理图^[2]

(a) 1 位开关延迟线移相器原理图；(b) 1 位开关高低通移相器原理图

类似地，多位的数控移相器即将多个基本的 1 位数控移相器组合起来，这将导致总体的直通损耗（基态插入损耗）增加为各位直通损耗之和。为便于使用和数字化控制，每一位数控移相器的相移量按二进制取值，比如 5.625° 、 11.25° 、 22.5° 、 45° 、 90° 、 180° 。

那么问题来了，为什么步进值会取 5.625° 、 12.25° 这样的值？这里有什么讲究吗？答案是由于相位的周期是 360° ，用 N -bit 的二进制数去分割时，被分为 2^N 等份，故步进值为 $\frac{360^\circ}{2^N}$ 。当 $N = 6$ 时，步进值即 5.625° 。这毕竟是人为地划分，如果一定要取其他步进值也并非不可以，比如 5° 、 10° 、 20° 、 $40^\circ \dots$ 。

理想情况下，倾向于按大小顺序依次排列这些移相位，但是由于各位移相器的驻波、移相精度并不一定都很好，在级联时会导致增益平坦度和移相精度等恶化，因此组合级联时，会根据实际情况调整各位移相器的排列顺序，从而尽量使整体的驻波、增益平坦度、移相精度等指标总体最优。

图 4.15 是一个 6 位数控移相器^[2]，可以看到大相移位采用了开关高低通结构，小相移位采用了开关延迟线结构，而且各位并没有严格按相移大小排序。

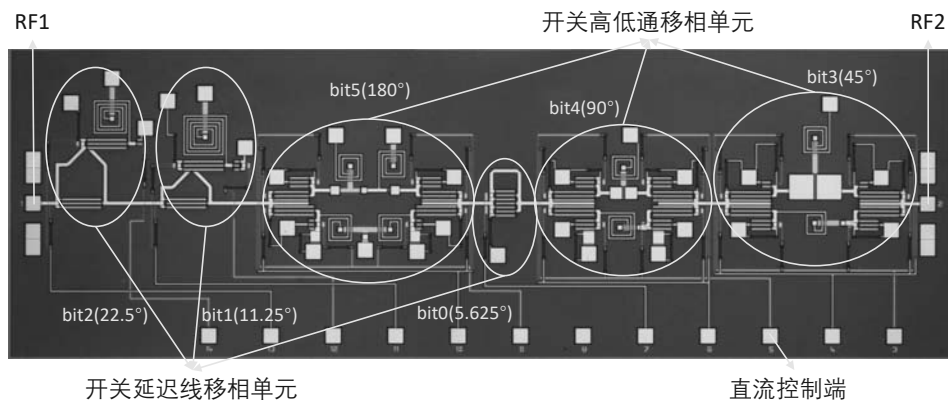


图 4.15 6 位数控移相器

参考文献

- [1] Yuk J S, Choi B G, Lee Y S, et al. Low-power pHEMT MMIC LNA for C-band applications[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2005, 48(2): 253-255.
- [2] Marsh S. MMIC design[M]. Norwood: Artech House Microwave Library, 2006.
- [3] Zhang T, Wang L, Xu R. A design of wide IF bandwidth GaAs passive mixer with new balun structure[C]//2014 IEEE International Conference on Communication Problem-solving. 2014: 566-568.

MMIC设计实例——固定衰减器

5.1 衰减器原理

固定衰减器是极为常用的射频器件，主要用于调节射频链路增益，改善级联器件之间的驻波，有时也用于吸收多余的功率。根据网络拓扑形状，固定衰减器有两种基本结构：Ⅱ型衰减器和 T 型衰减器。

5.1.1 Ⅱ型衰减器

如图 5.1 所示，Ⅱ型衰减器由三个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 构成。假定输入阻抗为 Z_i ，输入端激励电压为 V_i ，输出阻抗为 Z_o ，输出端的电压为 V_o ，则根据电路分析基础的知识很容易得到：

$$V_o = \frac{R_3 \parallel Z_o}{R_2 + R_3 \parallel Z_o} V_i \quad (5.1)$$

其中 R_3 和 Z_o 的并联阻值为

$$R_3 \parallel Z_o = \frac{R_3 + Z_o}{R_3 \times Z_o} \quad (5.2)$$

则衰减量为

$$\begin{aligned} A &= 20 \log \frac{V_o}{V_i} \\ &= 20 \log \frac{R_3 \parallel Z_o}{R_2 + R_3 \parallel Z_o} \end{aligned} \quad (5.3)$$

从式 (5.3) 看上去似乎衰减量只跟 R_2 、 R_3 和输出（负载）阻抗 Z_o 有关，跟 R_1 无关，但实际上因为这里只考虑了信号从网络左侧到右侧的传输损耗，并没有考虑输入侧的阻抗失配。为了使输入侧阻抗匹配到 Z_i ，则要求

$$Z_i = R_1 \parallel (R_2 + R_3 \parallel Z_o) \quad (5.4)$$

如果将输入输出互换，即信号传输方向改为从右侧到左侧，则衰减量为

$$\begin{aligned} A &= 20 \log \frac{V_i}{V_o} \\ &= 20 \log \frac{R_1 \parallel Z_i}{R_2 + R_1 \parallel Z_i} \end{aligned} \quad (5.5)$$

同样，为使输出阻抗匹配到 Z_o ，要求

$$Z_i = R_1 \parallel (R_2 + R_3 \parallel Z_o) \quad (5.6)$$

通常情况下，系统的输入输出参考阻抗都是统一的，即 $Z_i = Z_o$ （一般是 50Ω 或 75Ω ），则电阻 $R_1 = R_3$ 时，衰减器的网络参数双向对称、互易。对于给定的衰减量 A ，令 $Q = 10^{0.1A}$ ， $Z_i = Z_o = Z_0$ ， $R_1 = R_3 = R_p$ ， $R_2 = R_s$ ，联立式 (5.3) ~ 式 (5.6) 可以反解求得

$$\begin{cases} R_s = \frac{Z_0(Q-1)}{2\sqrt{Q}} \\ R_p = \frac{Z_0\sqrt{Q}+1}{\sqrt{Q}-1} \end{cases} \quad (5.7)$$

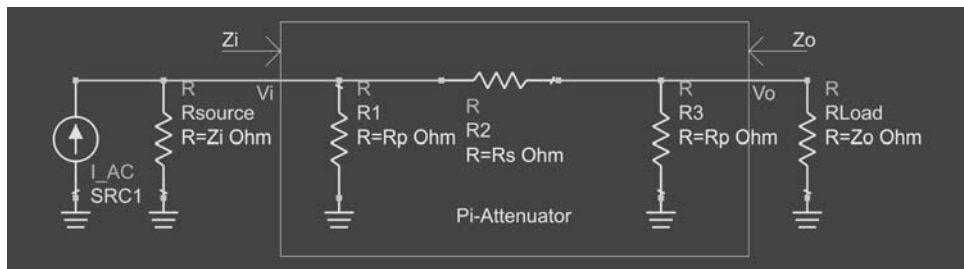


图 5.1 Π 型衰减器

为方便读者查阅，由式 (5.7) 计算得到 Π 型衰减器的衰减量 A 与 R_s 、 R_p 的对应取值见表 5.1。

表 5.1 Π 型衰减器电阻取值表

A/dB	R_s/Ω	R_p/Ω
1	5.8	869.5
2	11.6	436.2
3	17.6	292.4
4	23.8	221.0
5	30.4	178.5
6	37.4	150.5
7	44.8	130.7
8	52.8	116.1
9	61.6	105.0
10	71.2	96.2
20	247.5	61.1
30	789.8	53.3

5.1.2 T 型衰减器

T 型衰减器的网络结构如图 5.2 所示, 分析方法跟 Π 型衰减器类似, 在此不再详细阐述, 有兴趣的读者请自行完成。这里直接给出对应衰减量 A 的阻值计算公式:

$$\begin{cases} Q = 10^{0.1A} \\ R_p = \frac{2Z_0\sqrt{Q}}{Q-1} \\ R_s = Z_0 \frac{Q+1}{Q-1} - R_p \end{cases} \quad (5.8)$$

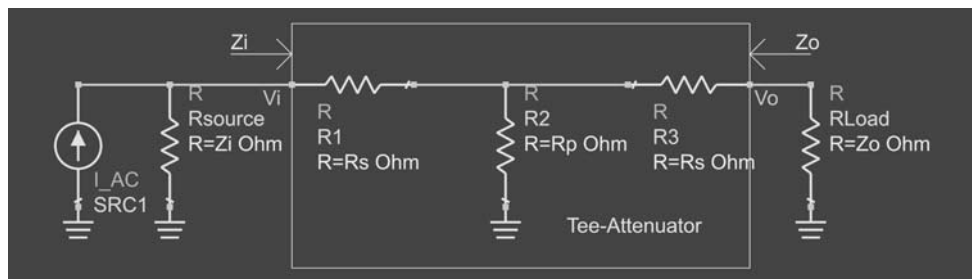


图 5.2 T 型衰减器

为方便读者查阅, 由式 (5.8) 计算得到 T 型衰减器的衰减量 A 与 R_s 、 R_p 的对应取值见表 5.2。

表 5.2 T 型衰减器电阻取值表

A/dB	R_s/Ω	R_p/Ω
1	2.9	433.3
2	5.7	215.2
3	8.5	141.9
4	11.3	104.8
5	14.0	82.2
6	16.6	66.9
7	19.1	55.8
8	21.5	47.3
9	23.8	40.6
10	26.0	35.1
20	40.9	10.1
30	46.9	3.2

5.1.3 耐受功率

衰减器的小信号特性或者说 S 参数取决于电阻值，上文已经作了分析。那么衰减器的耐受功率如何分析呢？

当线宽和线厚充足时，金属线的损耗较小，几乎可以忽略，衰减器吸收的绝大部分射频功率都被电阻转化为热功率，故其耐受功率主要由电阻决定。TFR 的通流能力与工艺参数有关，经验值约为 $1\text{mA}/\mu\text{m}$ ，即截面宽度 $1\mu\text{m}$ 的 TFR 可以承受 1mA 电流通过。电阻的热功率为 $P = I^2 R$ ，而薄膜电阻的阻值只与长宽比有关，与绝对尺寸无关。因此在保证阻值（长宽比）一定的条件下，加大 TFR 宽度可以增加其通流能力，从而提高耐受功率。

交流功率的有效值是用等效的直流热功率定义的，因此这里也可以通过给衰减器施加直流电源激励来分析其能承受的功率有效值。假定给图 5.1 左侧施加一直流电源，右侧接匹配负载，根据电路分析基础知识，很容易计算流经衰减器每个电阻的电流值。当 $R_1 \sim R_3$ 的取值和尺寸确定后，其允许通过的额定电流就确定了。如果逐渐增大电源功率，则每个电阻的电流都逐渐增大，当任何一个电阻的电流达到其额定值时，就成为限制衰减器耐受功率的瓶颈。

5.2 衰减器设计

5.2.1 设计指标

这里以 Π 型衰减器为例作为 MMIC 设计的第一个实例，设计指标为：

- 频率: DC~20GHz;
- 衰减: $(10 \pm 0.25)\text{dB}$;
- 回波: $\leq -20\text{dB}$;
- 功率: $\geq 25\text{dBm}$ 。

5.2.2 设计步骤

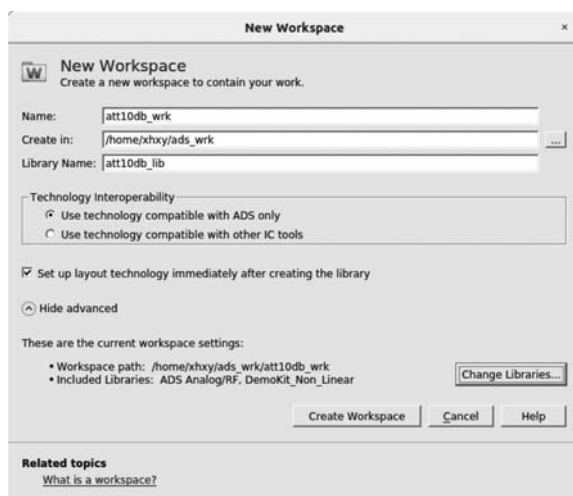
原本假定读者都是有一定 ADS 基础使用知识的, 计划侧重讲 MMIC 设计流程与方法, 考虑到这是系列设计实例的第一篇, 算得上是 MMIC 设计入门的“Hello World”, 因此本节尽可能给出详细的 ADS 操作步骤, 以便初学者有个初步的认识。后续的所有设计实例都将只给出关键步骤。

(1) 新建 Workspace, 添加或指定工艺 (图 5.3)。

(2) 新建 Cell 命名为 att10db 同时新建 Schematic, 插入 SP 仿真模板 (或手动放置 SP 控件和 Term), 修改 SP 仿真频率为 0.1~20GHz, 步进 0.1GHz。

(3) 从 PDK 元件面板选择 TechnologyInclude 控件添加到 Schematic 中。

(4) 通过理论计算或者查表得到串联电阻为 71Ω , 接地电阻为 96Ω , 从 PDK 元件面板选择添加电阻并按图 5.4 进行连接。连线默认快捷键为 Ctrl+W。



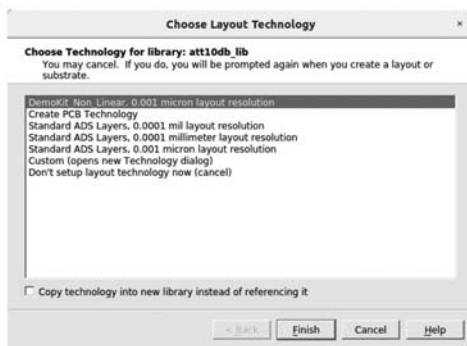
(a)

图 5.3 新建工程并指定工艺

(a) 新建 Workspace; (b) 指定 PDK; (c) 指定 Layout 工艺



(b)

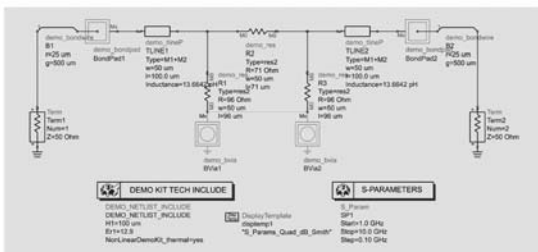


(c)

图 5-3 (续)



(a)



(b)

图 5.4 建立 Schematic
(a) 新建 Cell; (b) 绘制原理图

(5) 按快捷键 F7 启动仿真, 仿真完成后默认会自动弹出数据结果窗口 (dds)。如果 Schematic 中插入了显示模板 (DisplayTemplate), 则会按模板显示结果, 否则仅打开空白窗口, 由用户自行添加显示图表。

(6) 从左侧面板选择插入 Rectangular Plot, 弹出窗口中选择显示图表的数据来源为 S11、S22, 点击【Add】后会在此提示选择处理复数型数据, 默认取 dB 值。

同样方法添加绘制 S_{21}/S_{12} 结果 (图 5.5)。

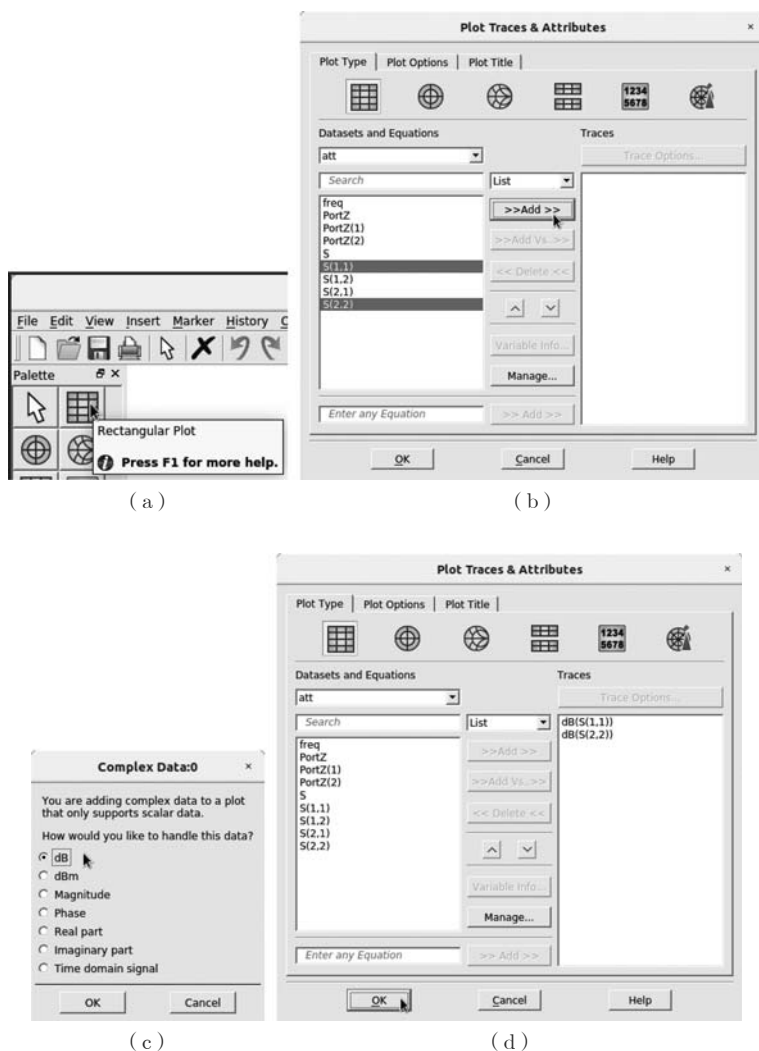


图 5.5 添加 S_{11}/S_{22} 结果

(a) 插入 Rectangular Plot; (b) 选择数据源; (c) 对数据取 dB; (d) 添加显示数据

(7) 如果当前的 Schematic 仿真结果不好, 可以微调优化或者增加匹配元件, 直到结果满意为止。很多时候 Schematic 和 Layout 仿真会有差异, 以 Layout 的 EM 仿真为准。

(8) 目前的 S 参数仿真结果稍微调整后就可以满足设计要求, 如图 5.6 所示。

但其能承受多大功率呢？如图 5.7 所示，关掉 SP 仿真控件，给衰减器输入添加直流电源（V_DC），给衰减器每个电阻支路添加电流探针（I_Probe）并添加 DC 仿真控件，设置 DC 控件对电源电压（Vdc）进行扫描，扫描范围 0~5V，步进 0.1V。

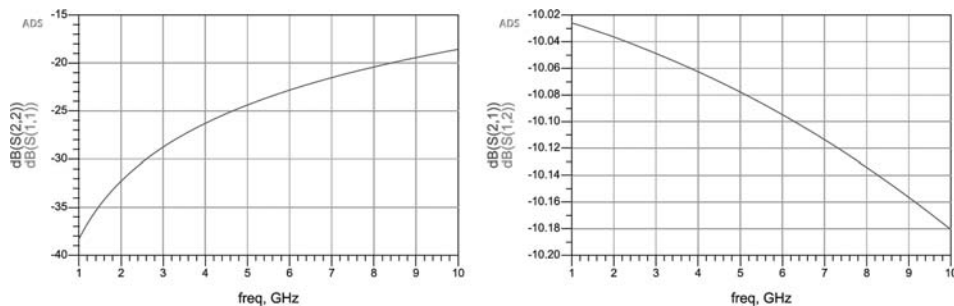


图 5.6 原理图 SP 仿真结果

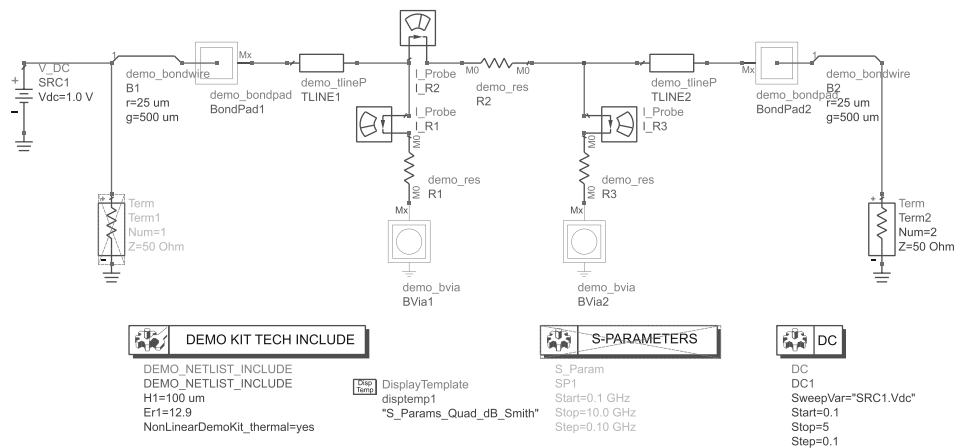


图 5.7 计算耐受功率

(9) 在 dds 窗口添加 Rectangle Plot，绘制出电流与电源电压的变化曲线如图 5.8 所示。添加一个 Line Marker 方便读出每条曲线的值，本例原理图 TFR 的宽度都是 50μm，通流能力取 50mA。移动 Marker 到 Vdc=4.8V 时，R1 首先达到其额定电流 50mA，此时电源电流为 96mA，故衰减器的耐受功率即此时的电源功率 $4.8\text{V} \times 96\text{mA} = 460.8\text{mW}$ ，换算后即 26.6dBm，满足功率要求。

(10) 在 Schematic 界面选择菜单【Layout】-【Generate/Update Layout】，弹出对话框用于约束自动生成 Layout 的方式，这里暂时不做介绍，直接选择【OK】，如图 5.9 所示。ADS 自动生成 Layout 时会根据每个元件连接端口的方向自动对齐，

除非 Schematic 和 Layout 完全对应且充分考虑了端口连接方向等各方面的细节, 否则自动生成 Layout 的元件排列和连接方向会看起来一片混乱, 尤其是比较复杂的电路, 需要设计者手动调整。

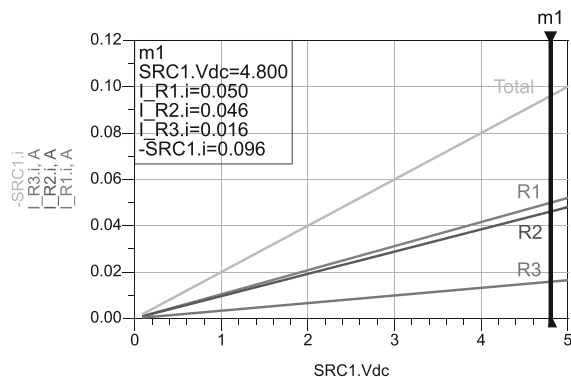


图 5.8 电流曲线

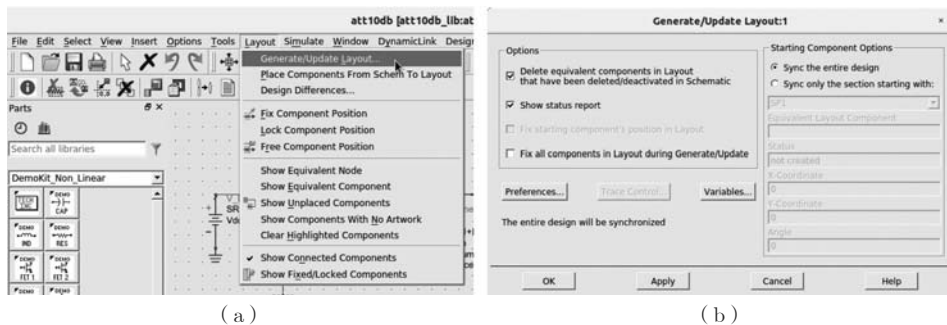


图 5.9 自动生成 Layout
(a) 自动生成 Layout; (b) 自动生成控制

(11) ADS 自动生成的 Layout 如图 5.10 (a) 所示, 手动调整元件摆放并为探针测试添加 GSG 焊盘后的 Layout 方案 1 如图 5.10 (b) 所示。每个人有自己的 Layout 风格, 元件的摆放位置和方向、元件的尺寸取值都是可以根据需要灵活调整的, 比如图 5.10 (c) 将 R1、R3 在保持阻值不变的条件下减小尺寸 (注意 TFR 电阻值仅跟长宽比有关, 与绝对尺寸无关), 从而接地金属可以与 PAD 齐平; 再比如图 5.10 (d) 同样保持 R1、R3 阻值不变, 但将其拆分成两个宽度减半的电阻并联, 这样对称分布在中线两侧, 看起来更加工整。总之, 在满足性能要求和设计规则的前提下, 设计者可以根据个人喜好和审美观点自由发挥。

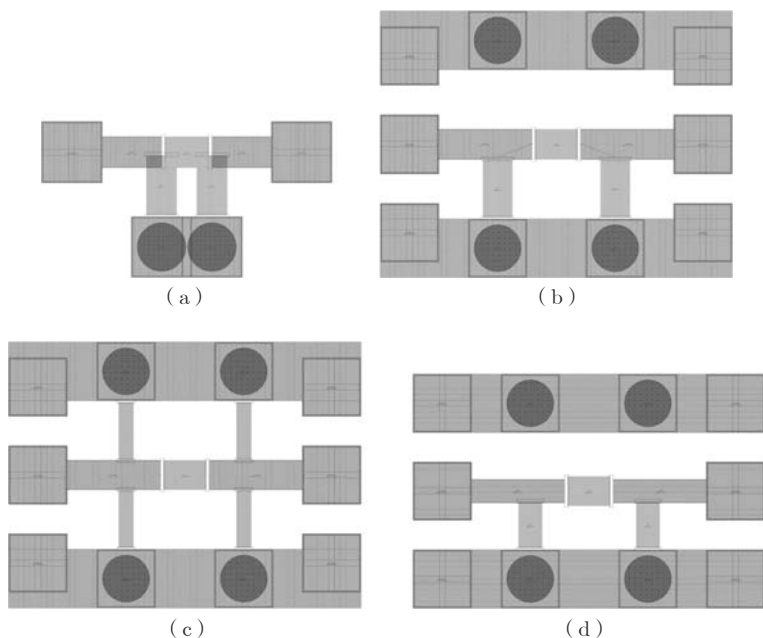


图 5.10 三种 Layout 方案

(a) 自动生成的 Layout; (b) Layout 方案 1; (c) Layout 方案 2; (d) Layout 方案 3

(12) Layout 绘制完成后, 给衰减器输入输出添加 EM 仿真端口, 如图 5.11 所示。ADS 默认端口必须从 1 开始连续编号, 它会根据端口处的金属图层自动设置端口为相同图层。一般情况下 ADS 自动识别的图层是没问题的, 对于多层加厚的金属线, 端口可以加在任何一个金属层。但需要注意端口一定不能加在过孔层, 否则 Momentum 仿真时一定会报错!

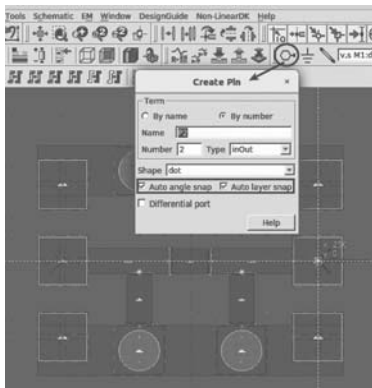


图 5.11 添加 EM 端口