

基于微波电子工艺制造的射频集成电路设计与制备研究

郭雪林

中国电科产业基础研究院先进集成研究所, 河北 石家庄 050051

[摘要] 随着通信、雷达、无线传感等领域的不断发展, 射频集成电路的设计与制备成为推动这一进程的重要驱动力。微波电子工艺作为射频集成电路领域中至关重要的一部分, 其发展历程承载着科技创新的轨迹。文章将探讨微波电子工艺的起源、发展历程, 以及射频集成电路设计与制备中的关键技术, 旨在揭示微波电子工艺在推动射频集成电路创新方面的重要作用。

[关键词] 微波电子工艺; 射频集成电路; 射频集成电路设计

DOI: 10.33142/hst.v7i2.11494

中图分类号: TN402

文献标识码: A

Design and Fabrication of RF Integrated Circuits Based on Microwave Electronic Technology Manufacturing

GUO Xuelin

Advanced Integration Research Institute of China Electric Technology Power Industry Basic Research Institute, Shijiazhuang, Hebei 050051, China

Abstract: With the continuous development of communication, radar, wireless sensing and other fields, the design and preparation of RF integrated circuits have become an important driving force to promote this process. Microwave electronic technology, as a crucial part of the RF integrated circuit field, carries the trajectory of technological innovation in its development process. The article will explore the origin and development history of microwave electronic technology, as well as key technologies in the design and fabrication of RF integrated circuits, aiming to reveal the important role of microwave electronic technology in promoting innovation in RF integrated circuits.

Keywords: microwave electronic technology; RF integrated circuit; RF integrated circuit design

引言

微波电子工艺是一门专注于处理微波频段电子元器件的技术, 其应用领域非常广泛, 包括通信、雷达、射频传感和无线网络等。微波电子工艺的发展伴随着电子学的进步, 起源于对高频电路性能的需求。随着射频集成电路在无线通信系统、雷达探测等领域中的广泛应用, 微波电子工艺的研究和应用也日益受到关注。

1 微波电子工艺的发展历程

微波电子工艺的发展历程最早可以追溯到 20 世纪初期。起初, 电磁波的理论基础由马克斯·普朗克和詹姆斯·克拉克·麦克斯韦等科学家奠定, 为微波电子工艺的成型提供了理论基础。在 30 年代, 科学家们开始对毫米波和微波频段的性质展开深入研究, 这一时期主要集中在基础理论研究和实验验证阶段。二战期间, 雷达技术的急剧发展成为微波电子工艺的重要推动力。包括早期雷达系统的建立, 如英国的 Chain Home 系统和德国的 Freya 雷达, 这一时期微波电子工艺的焦点主要在于解决微波频段中的传输、放大和探测技术问题。1945-1960 微波电子工艺逐步商业化, 关键器件如微波管、二极管和传输线等的进步推动了微波技术在通信和遥感领域的广泛应用, 这一时期, 微波电子工艺从军事领域逐渐扩展到民用领域, 为技术的进一步创新打下了基础。随着 20 世纪 60 年代集成

电路技术的崛起, 微波电子工艺进入了新的发展阶段, 引入新材料, 如 GaAs、InP 和 SiGe BiCMOS 等, 推动了微波集成电路设计的创新, 这一时期微波电子工艺见证了射频集成电路的兴起, 使得整个系统的尺寸减小、性能提高、成本降低。到了 21 世纪, 新一代通信技术的崛起以及对更高频率、更高性能的需求, 将进一步塑造微波电子工艺的未来发展方向。

2 射频集成电路的演进

2.1 射频电路的基础概念

射频电路的频率范围通常涵盖了从 30 kHz 到 300 GHz 的范围, 处于微波和毫米波频段, 这一频段的特性使得射频电路能够实现远距离通信和高分辨雷达系统的关键功能。在射频电路中, 信号的传输和调制是基础概念的核心^[1]。电磁波在射频范围内的传播特性受频率和波长的影响, 因此在设计射频电路时, 需要考虑电磁波的传播、反射和吸收等现象, 调制则涉及将信息(如语音、图像或数据)嵌入到射频信号中, 以便在通信或雷达系统中传输。

2.2 早期射频集成电路设计

在射频集成电路的早期, 晶体管是一个关键的组成部分, 20 世纪 40 年代初晶体管取代了原先使用的真空管, 具有更小的体积、更低的功耗和更好的可靠性, 为射频电路的集成和微型化奠定了基础。由于射频电路的频率较高,

电路中元件的布局和电磁耦合等问题变得更为复杂,这对工程师们提出了挑战。早期射频集成电路设计的一个突破性进展是集成调频放大器,它能够同时完成信号的放大和频率的调制,推动了射频技术在广播和通信系统中的发展,同时为后来集成电路技术的发展奠定了基础。虽然在早期,射频集成电路设计受到限制,但正是通过这一阶段的积累和实践,工程师们逐渐积累了宝贵的经验,为后来的集成电路技术提供了宝贵的经验和启示。

2.3 当代射频集成电路技术

2.3.1 SiGe BiCMOS 技术

SiGe BiCMOS 技术是一种集成电路制造技术,它结合了硅(Si)和锗(Ge)这两种材料的特性,为射频集成电路(RFIC)的设计提供了强大的工具。首先, SiGe BiCMOS 技术利用硅的优势,即其在数字电路方面的良好性能和成熟的制造工艺,与传统的纯硅 CMOS 相比, SiGe BiCMOS 技术引入了锗的元素,其具有较高的电子迁移率和更好的高频特性。在 SiGe BiCMOS 技术中,锗被引入硅晶体中形成硅锗异质结构,这改变了硅材料的电学性质,不仅提高了晶体管的电子迁移率,也降低了晶体管的噪声水平,从而改善了射频器件的性能。SiGe BiCMOS 技术在射频集成电路中的应用广泛,包括射频前端系统中的低噪声放大器(LNA)、混频器、频率合成器等关键模块。这种技术在通信系统中尤为重要,例如在移动通信和无线局域网(WLAN)中,其高性能和低功耗特性使得设备具备更好的通信性能。

2.3.2 GaAs 和 InP 材料的应用

GaAs(化合物半导体砷化镓)和 InP(磷化铟)等 III-V 族化合物半导体材料在射频集成电路中的应用标志着对更高频率、更高性能的需求,以适应射频通信和雷达等领域的不断发展。GaAs 和 InP 等化合物半导体材料相比于传统的硅材料,具有更高的电子迁移率和更好的高频特性,它们在高频频段中表现更为出色,适用于毫米波和太赫兹频段的应用。在射频集成电路中, GaAs 和 InP 广泛应用于各种射频器件,包括低噪声放大器(LNA)、功率放大器、混频器和频率合成器等,使得它们在通信系统和雷达前端等高频应用中成为理想的选择^[2]。在无线通信系统,尤其是移动通信和卫星通信,对高频、高速数据传输和低功耗的要求推动了对 GaAs 和 InP 等化合物半导体材料的广泛应用。

2.3.3 射频 MEMS 技术

射频微机电系统(RF MEMS)技术是一种结合微机电系统(MEMS)和射频技术的先进集成技术,为射频集成电路带来了新的可能性。RF MEMS 器件是微小机械系统在射频频段的应用,通过微机电系统的集成,实现了射频器件的微调、可调谐性和频率选择性,为射频电路的优化提供了新的途径。其中, RF MEMS 的关键组件是微机电开关,它具有可控制的机械运动,可在射频电路中实现开关、电容

和电感等功能。RF MEMS 技术的应用广泛,例如在通信系统中的天线匹配网络和频率选择器件,通过使用 RF MEMS 开关,可以实现天线与射频电路之间的即时切换,从而提高通信系统的性能和灵活性。另一个重要的应用领域是无线通信中的可调谐电容器和电感器,通过在电路中引入 RF MEMS 元件,可以实现在不同频率下调整电容和电感值的功能,从而提高射频电路的适应性,适用于多频段、多模式的通信系统。RF MEMS 技术还在毫米波和太赫兹射频电路中发挥着关键作用,对于高速通信和成像应用具有重要意义,而 RF MEMS 的微调 and 可调谐性特性使得器件能够适应这些频段的要求。

2.4 射频集成电路在通信和雷达系统中的应用

射频集成电路在通信和雷达系统中的广泛应用是现代无线通信和雷达技术取得重大进展的关键因素之一。集成电路在系统中扮演着核心角色,从信号的产生、调制、放大,到信号的传输、接收和处理,都发挥着至关重要的作用。

在无线通信系统中,射频集成电路承担着将信息从发送端传输到接收端的任务。信号发生器产生射频信号,接着,通过集成的调制电路和调制器元件将信息嵌入到射频信号中。在发送端,功率放大器通过集成电路实现信号的放大,以便在传输过程中保持信号强度。在接收端,射频集成电路的低噪声放大器用于提升接收信号的强度,并在信号传输过程中降低噪声水平,确保接收端的灵敏度。此外,射频集成电路还在通信系统中用于频率合成、频率选择和滤波等关键功能。这些电路元件通过高度集成的设计,使得通信系统更为紧凑、节省空间,同时提高了系统的性能和效率。

在雷达系统中,射频集成电路同样具有关键作用。雷达系统的前端射频电路需要处理接收到的微弱雷达信号,因此需要高性能的射频集成电路来应对。射频集成电路中的低噪声放大器对接收到的信号进行放大,以确保系统能够有效地探测目标,混频器用于将接收到的雷达信号和本地振荡器产生的信号混合,以得到中频信号进行进一步处理。射频集成电路在雷达系统中还用于功率放大、频率合成和调制解调等关键功能,通过集成电路的使用,雷达系统得以更高的可靠性、更小的体积和更低的功耗。

3 微波电子工艺在射频集成电路中的应用

3.1 微波电子工艺的基本原理

3.1.1 微波频段特性

微波频段通常涵盖 1 GHz 到 300 GHz 的频率范围,处于射频频段的高频范围。微波频段的波长相对较短,通常在毫米到厘米的尺度上,短波长带来了一些显著的特性,其中之一是微波信号在传输过程中相对于较低频段的信号表现出更好的直线传播特性。微波频段的能量较高,能够在空间中穿透一些材料,同时受到大气吸收的影响较小,

使得微波在大气传播和穿透方面具有有一些优势,对于一些特殊环境下的通信和传感应用具有重要价值。

3.1.2 微波元器件的特性与应用

微波元器件在射频集成电路中发挥着关键作用,支持系统的放大、调制、混频等功能。①微波放大器:用于放大微波信号的微波放大器是射频集成电路中的重要组件,多数采用高频率的晶体管或其他放大器技术,以确保在系统中信号的高增益和低噪声水平。②微波滤波器:微波滤波器用于选择或屏蔽特定频率范围的信号,在射频集成电路中,微波滤波器起到频率选择和信号整形的关键作用,确保系统对特定频带的信号有良好的响应^[3]。③微波开关:微波开关允许在射频电路中切换或调整信号的路径。这对于实现频率调谐、信号路由和调制等功能至关重要。④微波天线:在通信和雷达系统中,微波天线用于辐射和接收微波信号。

3.2 微波电子工艺在射频集成电路设计中的优势

3.2.1 高频率性能

微波电子工艺在射频集成电路具有显著的高频率性。高频率性能是指射频电路在处理高频微波信号时的响应速度和准确性。在高频率下,信号的周期变得非常短,因此电路的响应时间变得至关重要。微波电子工艺采用高度集成的设计和优越的材料特性,确保电路元件能够在极短的时间内完成信号的放大、调制、混频等处理,满足高频率应用的实时性需求。微波电子工艺通过采用优秀的传输线设计、减小电路中的衍射损耗,并优化材料特性,提高了射频集成电路在高频率下的传输效率和信号完整性。

3.2.2 集成度与微小化

集成度指的是在一个芯片上集成多个功能模块,而微小化则是指将整个电路设计尽可能地缩小,减小射频系统的物理尺寸。高度集成的射频集成电路通过将各种微波元器件、放大器、开关、滤波器等功能集成在一个芯片上,降低了系统中的连接线路,减少了传输损耗,并提高了系统的整体可靠性。微小化通过采用微细加工工艺和优化的封装技术,将射频电路的体积最小化,对于便携式设备、嵌入式系统以及对空间要求较为苛刻的应用,如卫星通信系统等,具有显著的优势。

3.2.3 低功耗与高效能

微波电子工艺在射频集成电路设计中追求低功耗和高效能的目标。通过优化电路设计、采用低功耗材料,以及引入先进的功率管理技术,微波电子工艺实现了射频集成电路的低功耗设计,对于移动通信设备、传感器节点以及需要长时间运行的无线传感网络等应用非常重要,延长了电池寿命,减少了能源消耗。通过微波电子工艺的优化,射频电路在高频率下能够更有效地进行信号放大、频率合成和调制解调等操作,提高了整个系统的效能。

3.3 微波电子工艺制造的键合机在实际生产中的应用

微波电子工艺制造中的键合机技术是实现射频集成

电路元件互联的关键环节,其在实际生产中发挥着至关重要的作用。键合机通过精密的焊接过程,将微小而复杂的电子元器件精准地连接到芯片或基板上,实现电路的完整性和功能性。在实际生产中,键合机的应用主要体现在以下几个方面:①键合机实现了微波集成电路的高度集成。由于微波电子工艺涉及的元器件尺寸非常微小,键合机能够在微米级别的尺度上进行焊接,确保电路中的每个元器件都得以精准放置,从而提高了整个集成电路的复杂度和性能。②键合机实现了生产效率的显著提升。在微波电子工艺中,相较于传统的手工焊接,键合机能够以更快的速度和更高的一致性完成焊接过程,从而大幅度提高了生产效率,降低了制造成本。③键合机降低了制造中的误差率。微波射频电路对于元器件之间的精确度和一致性要求极高,手工焊接容易受到人为因素的干扰,而键合机则能够通过自动控制确保焊接的精准性,减小了因人为操作而引入的误差,提高了电路的可靠性和稳定性。微波电子工艺制造中的键合机技术,通过实现高度集成、提高生产效率和降低误差率,键合机为微波射频集成电路的制造提供了关键技术支持,推动了整个领域的不断创新和发展。

4 微波射频集成电路设计与制备的关键技术

4.1 射频电路设计基础

4.1.1 无源元件设计

无源元件的设计关注于在高频率范围内保持稳定的电学特性,并确保其在集成电路中的性能优越。对于微波射频集成电路而言,电阻经常被用于匹配电路的阻抗,同时要注意在高频率范围内的电导率、传输线效应以及与其他元件的耦合效应。高频下,电容和电感会呈现出复杂的等效电路行为,因此需要精心选择材料和结构,以最大程度地减小损耗和提高元件的Q值(品质因数)。在无源元件的设计中,对于电阻、电容和电感等参数的精确控制,通常需要借助电磁场仿真软件进行模拟和优化。

4.1.2 有源元件设计

有源元件包括放大器、振荡器等,其设计旨在提供对信号的能量增益,需要兼顾增益、噪声、频率稳定性等多方面的要求。在高频率下,放大器需要平衡增益和噪声。优化的设计需要考虑晶体管的工作点、匹配电路,以及功耗,以达到对信号的有效放大。在微波射频集成电路中,振荡器通常用于产生稳定的高频信号。其设计需要考虑晶体管的非线性特性、电源噪声,以及对环境变化的敏感性,以确保振荡器在高频环境下能够产生高质量的信号。微波集成电路的尺寸相对较小,因此对于晶体管和其他元件的微观结构和制备工艺的精密要求更为严格。

4.2 微波电子工艺制备流程

4.2.1 基板选择与准备

微波射频集成电路的性能受到所选基板的影响,常用的基板材料包括高频玻璃纤维增强聚酰亚胺(FR-4)、铝

氮化硼 (AlN)、氧化铝陶瓷等。基板的选择要根据应用需求,考虑介电常数、热导率、机械强度等因素。FR-4 基板通常用于一般性射频应用,其成本低廉且易加工。AlN 基板因其良好的导热性和高介电常数,适用于高功率射频放大器等需要散热的应用。氧化铝陶瓷基板则常用于要求高度稳定性和精密度的微波射频集成电路设计。

4.2.2 微波电子工艺步骤

微波电子工艺的制备步骤有多个关键阶段,包括光刻、蒸镀、刻蚀、退火等。①光刻:在微波射频集成电路中,光刻用于形成导线、电容和电感等元件,通过光刻,可以实现微小尺度的电路结构,确保高频电路的性能。②蒸镀:在微波射频电路中,蒸镀用于形成导体层、金属电极等。蒸镀的均匀性和沉积速率是影响电路性能的重要因素。③刻蚀:刻蚀是通过化学或物理手段去除多余的材料,形成所需的电路结构,刻蚀的精度决定了电路的几何形状和尺寸,直接影响电路的电学性能。④退火:退火是通过加热材料,使其达到一定温度并保持一段时间,以改善晶体结构、减小内应力和提高材料性能,退火用于优化电阻、电容、电感等元件的性能。

5 结论

微波电子工艺在射频集成电路设计与制备领域的发展与应用取得了显著的成就。微波电子工艺与射频集成电路的研究不仅推动了微波技术的发展,也为无线通信、雷达系统等现代领域的创新提供了坚实的基础。在未来,随着科技的不断进步,微波射频集成电路必将继续发挥重要作用,为无线通信和雷达技术的不断演进注入新的活力。

[参考文献]

- [1]朱樟明,尹湘坤,刘晓贤,等.硅基三维集成射频无源器件及电路研究进展[J].微电子学与计算机,2023(1):11-17.
- [2]卢阳旭.射频集成电路收发测试模块设计与实现[D].成都:电子科技大学,2023.
- [3]徐魁文,苏江涛,赵文生,等.强电磁干扰下射频集成微系统防护的挑战与机遇[J].安全与电磁兼容,2023(4):9-17.

作者简介:郭雪林(1992.11—),女,汉族,毕业学校:河北工业大学,现工作单位:中国电科产业基础研究院先进集成研究所。