**南方科技大学**

**硕士学位论文开题报告**

**题 目：基于BiCMOS工艺10~31GHz宽带6位MMIC有源移相器研究**

**院 （系） 深港微电子学院**

**学 科 集成电路工程**

**导 师 方小虎**

**研 究 生 庾小齐**

**学 号 12333346**

**开题报告日期 2024/12/20**

**研究生院制**

目　录

[第1章 课题来源及研究的目的和意义 1](#_Toc96502101)

[第2章 国内外在该方向的研究现状及分析 7](#_Toc96502105)

[2.1 国外研究现状 7](#_Toc96502106)

[2.2 国内研究现状 7](#国内研究现状)

[第3章 主要研究内容及研究方案 8](#_主要研究内容及研究方案)

[3.1 主要研究内容 8](#_主要研究内容)

[3.2 研究方案 8](#_研究方案)

[第4章 预期达到的目标 9](#_预期达到的目标)

[第5章 已完成的研究工作与进度安排 10](#_已完成的研究工作与进度安排)

[5.1 已完成的研究工作 10](#_已完成的研究工作)

[5.1.1 宽带无源巴伦 10](#_宽带输入无源巴伦)

[5.1.2 正交信号生成电路 10](#_正交信号生成电路)

[5.1.3 矢量合成单元 10](#_矢量合成单元)

[5.1.4 输出有源巴伦 10](#_输出有源巴伦)

[5.1.5 插损补偿放大电路 10](#_插损补偿放大电路)

[5.2 进度安排 10](#_进度安排)

[第6章 为完成课题已具备和所需的条件与经费 11](#_为完成课题已具备和所需的条件与经费)

[第7章](#_预计研究过程中可能遇到的困难和问题及其解决措施) [预计研究过程中可能遇到的困难和问题及其解决措施 12](#_预计研究过程中可能遇到的困难和问题及其解决措施)

[参考文献 16](#_参考文献)

# 课题来源及研究的目的和意义

随着现代无线通信技术和雷达系统的迅猛发展，人们对雷达探测、航空航天、卫星通信等领域的探索越来越深入，传统机械扫描式的雷达已无法满足社会的需求，而高性能、宽带和高集成度的微波及毫米波电路和新型雷达技术的需求在日益增长。相控阵雷达采用一种新型的电扫描方式，这种新型的电扫描方式克服了传统机械式扫描反应速度慢、抗干扰能力差等缺点。一个完整的相控阵雷达由多个可单独控制的天线单元组成，这些天线单元排成一个天线阵列，每个天线单元发射波束的时间差（即相位差）通过开关来控制，最终各天线单元发射的波束在空间进行矢量合成产生新的波束，波束的发射方向可以通过控制各天线单元之间的相位差来灵活改变，因此这种雷达可以在空间实现不同目标方向的扫描。最终合成的波束主波瓣得到增强，而旁瓣则因为干涉相消而大幅降低[1]。这种雷达相对传统雷达更新速率和反应速度更快，分辨率更高，目标追踪能力更强，且抗干扰能力更强，已被广泛投入到军用和民用系统中。

作为控制和改变电磁波相移的核心器件，移相器在相控阵系统中扮演着核心角色，决定了系统的波束指向和信号处理能力，其性能对整个相控阵系统起着至关重要的作用。高性能移相器需要满足一定的增益、宽的移相范围、高的移相精度和良好的输入输出匹配，移相器的性能参数将直接影响系统的灵敏度和抗干扰能力，以及系统的面积和成本，因此研究移相器在众多通信领域中都具有重要意义。

目前应用于相控阵系统的移相器多为无源移相器，传统无源移相器多采用分立元件或低集成度设计，其优点在于功耗低且移相精度较高，但也存在芯片面积较大、损耗较高、工作带宽较窄以及功耗高和一致性差等问题，难以满足现代系统对高性能和小型化的要求。因此设计一款具有低损耗、高精度、大带宽和较小芯片面积等优点的有源移相器成为当下一个研究热点。

基于III-V族化合物的半导体凭借其较小的衬底寄生参数、较好的隔离特性以及较高的工作截止频率等优点，一直是设计高性能半导体移相器的首选。然而 III-V族化合物较大的芯片面积、昂贵的成本，基于该类工艺的移相器在商用和民用领域的发展存在很大的劣势。传统的CMOS 工艺虽然集成度高且价格便宜，但其工作截止频率低、衬底寄生参数较大等缺点对于设计高性能的半导体移相器存在致命的缺陷。随着当下硅基集成电路技术的飞速发展，特别是SiGe BiCMOS工艺的发展，其各方面性能在原有CMOS工艺的基础上得到了极大地提高，因此该工艺被广泛应用于射频和微波频段。同时相对于III-V族半导体化合物，SiGe BiCMOS工艺集成度高且价格便宜等优点为相控阵系统的商用和民用开辟了道路。除此之外，X、 Ku 、K和Ka波段作为雷达探测、航空航天、卫星通信的常用工作频段，工作于该频段的相控阵系统的研究一直是业界一个巨大的难题。 因此，开展基于SiGe BiCMOS工艺的10~31GHz的宽带有源移相器的设计与研究具有巨大的学术研究价值与潜在的市场商业价值。

# 国内外在该方向的研究现状及分析

## 国外研究现状

移相器作为相控阵雷达中核心的模块，其发展一直伴随着工艺的发展和社会的需求。早在上世纪中期，由于技术水平的限制，人们对移相器的探索主要停留在传统复杂笨重的机械式结构上。这种传统机械扫描式移相器移相性能较差且反应速度也较慢。到了20世纪50年代后期，Reggia等人研究出了一种新型的铁氧体移相器，区别于传统机械扫描式移相器，该移相器采用天线阵列扫描的工作方式[1-2]，移相器的速度得到了极大地加快，移相器的各方面性能得到了全面地提高，该技术的提出为以铁氧体为材料的移相器的研究开辟了一条全新的道路。1968年，White 在电控式移相器的技术研究领域进行了探索。由于传统移相器中使用的射频开关的寄生参数较高，对移相器的性能造成了很大的影响，因此 White 对移相器中所涉及的射频开关均采用PIN二极管器件进行设计[3]，结合PIN二极管器件的性能优势，移相器的性能得到了很大地提高。在此技术的基础上，移相器的研究进入一个繁荣的阶段，出现了一批又一批优秀研究成果[4-6]。

20 世纪末期，III-V 族化合物的兴起在半导体行业刮起了一阵旋风，其中 GaAs 工艺作为 III-V族化合物最典型的代表在半导体器件中得到了广泛的应用。相对于传统工艺，III-V族化合物凭借较小的寄生参数、较好的高频性能等优势牢牢占据了半导体市场，该工艺推动了单片微波集成电路移相器的研究与发展。1982年，Yalcin Ayasli 团队基于GaAs工艺设计了一款工作于X波段4-bit 开关型单片移相器[7]，该移相器的工作状态通过 GaAs FET开关来切换，实现了22.5、45、90和180的相移，移相器芯片面积仅为6.4×7.9mm2，带内插损为5.1±0.6dB。

21世纪初，Campbell C F和Brown S A基于PHEMT工艺设计了一款工作于K波段5-bit单片微波集成电路(MMIC)移相器[8]，该移相器对电源电压的变化不敏感，测试结果表明：在19GHz处，相位误差RMS值仅为3，功率增益为5dB，芯片面积为1.27 mm2，当电源电压从-2.5V变化到-5V时，移相器功率增益变化仅为 0.5dB，相位误差RMS值变化仅为1.2。

2010年，Kwang-JinKohl和Gabriel M. Rebeiz基于0.18 SiGe BiCMOS工艺设计出一款6-18GHz 5-bit 有源移相器[9]，该移相器采用矢量调制式的有源移相器结构，创新性的提出了一种控制正交矢量信号幅度的大小实现移相的方法。测试结果表明：在6-18GHz 内，相位误差RMS值小于5.6°，增益误差RMS 值小于1.1dB，功率增益为16.5-19.5dB，噪声为 4-5.7dB，功耗为62mW，芯片面积为1.2×0.75mm2。

2015年，佐治亚理工学院T.W.L.等人提出基于65nm CMOS工艺的工作带宽为2-24GHz 矢量合成型有源移相器设计[10]，全频带范围内增益误差小于1.5dB，相位误差小于1.22，芯片尺寸1.2×1.8mm2，该论文提出一种新型基于折叠正交耦合器的三级多相网络作为正交信号发生器，此结构插入损耗小于2dB。

2023年，韩国科学技术院 (KAIST)的Geon-Ho Park等人基于**65nm CMOS工艺设计了一款工作于57–67 GHz** 毫米波频段的7位矢量合成型有源移相器[20]，提出了一种新的**X型衰减器**，采用**互补电压控制**机制，通过调节I/Q信号的增益实现高精度矢量调制。同时使用变压器耦合结构生成I/Q信号，相比传统多相滤波器减少损耗。最终实现了在全频段范围内相位误差RMS和幅度误差RMS值分别小于0.83°和0.55 dB，插入损耗 (IL) 平均**14 dB，**增益控制范围为**37 dB，芯片核心面积为0.24mm2。**

表2‑1　国外移相器对比

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 年份 | 机构 | | 工艺(*n*m) | 频段(GHz) | | 结构 | 移相精度bits | 相移误差(RMS)/ | 增益误差(RMS)/dB |
| 1982 | | Raytheon 公司研究部 | GaAs | X-band | 开关型 | | 4 | - | - |
| 2000 | | TriQuint半导体 | PHEMT | 17-21 | 开关型 | | 5 | <1.2 | <0.5 |
| 2010 | | 英特尔公司 | 180 SiGe | 6-18 | 矢量合成型 | | 5 | <5.6 | <1.1 |
| 2015 | | 佐治亚理工学院 | 65 CMOS | 2-24 | 矢量合成型 | | 6 | <1.22 | <1.5 |
| 2023 | | 韩国科学技术院 | 65 CMOS | 57–67 | 矢量合成型 | | 7 | <0.83 | <0.55 |

## 国内研究现状

相较国外，国内研究所和高校开展移相器研究多年，但由于大规模集成电路工艺和生产技术发展较慢，与国外移相器的研究存在一定的差距。

2013年，国立台湾大学的Wei-Tsung Li团队基于TSMC 90nm CMOS工艺设计了一款工作于 62GHz的5-bit有源移相器[11]，其中创造性的提出了一种相位补偿技术，应用该技术的VGA电路在进行正交矢量信号调制时，可以保证几乎恒定的相位特性，从而极大地降低了相控阵系统中相位调制的复杂度。测试结果表明：在57-64GHz内，相位误差RMS值小于10，增益波动小于1.8dB，且在62GHz 处相位误差RMS 值仅为2，芯片面积为0.34mm2。

2017年，东南大学的姚艳等人基于0.13 SiGe BiCMOS工艺设计一款工作于Ku波段的有源移相器[12]，该有源移相器基于矢量调制式有源移相器结构，其中输入巴伦采用 Marchand 无源巴伦结构，相对于有源巴伦和其他无源巴伦结构，该巴伦工作带宽较宽、输出信号误差较小，并且线性度较高。同时为了减小移相误差，该移相器中的正交信号产生电路采用两级级联的多相滤波器结构。后仿真结果表明：在12-18GHz内，相位误差RMS值小于2.61，增益误差RMS值小于0.4dB，带内插损为-11.16~-20.39dB，输入1dB压缩点为9.98dBm，功耗为44.2mW，版图面积为1.1×0.9mm2。

2018年，西安电子科技大学的全兴等人采用40nm CMOS工艺，设计了一款52-57GHz 6-bit移相器[13]，该移相器巧妙地结合了有源移相器和无源移相器结构。其中无源移相器采用开关 LC 结构，实现 5.625和 11.25的移相功能；有源移相器采用矢量调制式移相器结构，实现N\*22.5的移相功能。最终移相器在所需工作带宽内达到了 6-bit 移相精度，兼顾有源移相器高精度和无源移相器低面积的优点。测试结果表明：在 52-57GHz 内，带内相位误差RMS值小于 3.76，增益误差 RMS 值小于2.23dB，功耗为14.3mW，功率增益为-19~-9dB，输入1dB压缩点大于10dBm，芯片面积仅为0.5 mm×0.3mm。

2022年，清华大学Xia Bowen等人采用0.13 μm SiGe BiCMOS工艺，设计了一款工作在18–50GHz的准连续数字矢量调制移相器[19]，该移相器采用Δ–Σ调制技术，该技术提供准连续的高精度相位和增益控制，比传统的开关滤波移相器和矢量调制移相器性能更优。利用Δ–Σ调制器将量化噪声移到高频，通过低通滤波器去除噪声，从而进一步提高了控制精度。最终，该移相器实现6-bit移相精度，带内相位误差RMS值小于0.7°，增益误差RMS值小于0.1dB，插入损耗为7.4~11.8dB，芯片核心面积为0.2mm2。

对比国内外移相器研究现状，国外近年来在国际顶尖期刊上涌现了一批又一批优秀研究成果，并在移相器的结构上取得很大地改进和突破。而国内对移相器的研究投入也越来越大，发表优秀研究成果也逐渐增多，但在国际顶尖期刊上发表的论文较少。国内论文所引用的移相器结构和其中所涉及的技术广泛来源于国外多年前的研究成果，并没有在其中取得很大的改进与创新，并且移相器的各方面性能与国外也存在一定的差距。因此，国内必须加大对移相器的技术研究以加快追赶的步伐。

表2‑2　国内移相器对比

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 年份 | 机构 | | 工艺(*n*m) | 频段(GHz) | | 结构 | 移相精度bits | 相移误差(RMS)/ | 增益误差(RMS)/dB |
| 2013 | | 国立台湾大学 | 45 CMOS | 57–64 | 矢量合成型 | | 5 | <10 | <1.8 |
| 2017 | | 东南大学 | 130 SiGe | 12-18 | 矢量合成型 | | 6 | <2.61 | <0.4 |
| 2018 | | 西安电子科技大学 | 40 CMOS | 52-57 | 矢量合成型 | | 6 | <3.76 | <2.23 |
| 2022 | | 清华大学 | 130 SiGe | 18–50 | 矢量合成型 | | 6 | <0.7 | <0.1 |

# 主要研究内容及研究方案

## 主要研究内容

本课题以相控阵雷达系统需求为背景，本文旨在基于0.13 SiGe BiCMOS工艺开展10~31GHz宽带、低插损、高精度有源移相器芯片的设计和研究。降低移相器的相位误差和增益误差是本课题研究的难点和重点，同时兼顾移相器的工作带宽、功率增益、线性度、功耗等性能。主要研究内容包括：

1. 提高有源移相器的移相精度的技术研究。
2. 降低有源移相器的相位误差和增益误差的技术研究。
3. 扩展有源移相器的工作带宽的技术研究。
4. 提高有源移相器的功率增益的技术研究。
5. 提高有源移相器的线性度的技术研究。

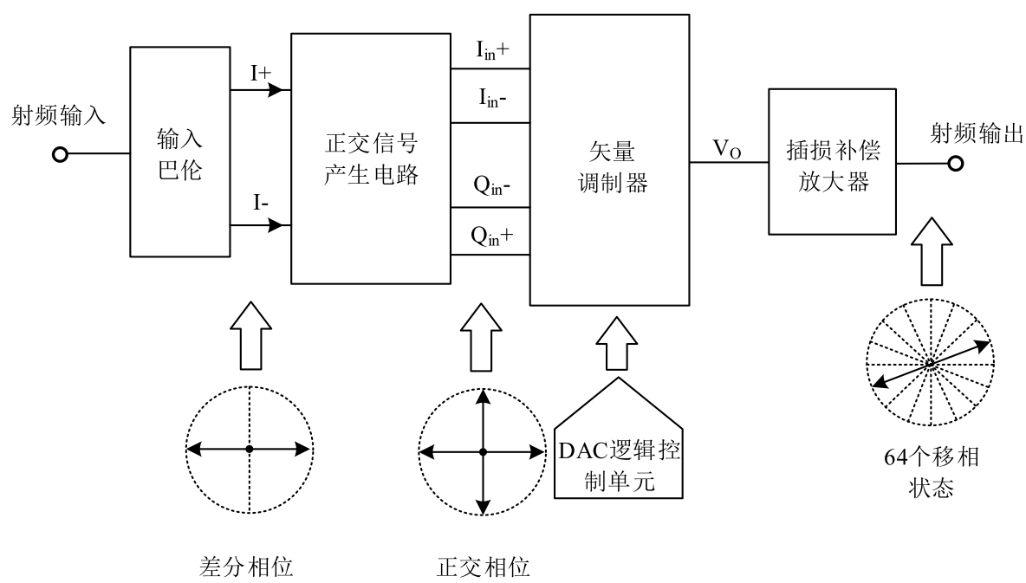
本设计采用矢量调制式的有源移相器结构，其系统框图如图3.1所示。具体而言，本研究重点分析了移相器的输入/输出巴伦、正交信号发生器、矢量合成模块、插损补偿电路及DAC数模转换电路等关键模块，给出各个模块的优化设计方案，以实现高精度的有源移相器。

图3.1 有源移相器的系统框图

同时，本设计具体电路工作流程为：首先输入巴伦将单端射频输入信号转化为差分信号、，然后差分信号通过正交信号产生电路转化为两组正交差分信号 、、、。两组正交差分信号输入矢量调制器转换为单端信号，其中矢量调制器由DAC逻辑控制单元来控制；最终矢量调制器输出的单端信号经过一个插损补偿电路放大输出。

## 研究方案

针对本研究课题，其具体的研究方案如下：

首先，进行大量文献调研工作，了解移相器的研究背景以及研究意义，总结移相器研究在国内外的发展现状及经典移相器的电路拓扑结构。

第二，对经典电路拓扑结构进行模块理论分析，针对传统的采用分立元件或低集成度设计的无源移相器结构，指出其存在芯片面积大、损耗高、工作带宽窄以及功耗高和一致性差等缺点，引出本研究应采用的有源移相器结构，并考虑预期的性能指标，最后选择出合适的各模块电路的拓扑结构。

第三，详细介绍该有源移相器的设计过程，在明确有源移相器的关键性能指标的基础上，提出针对性的优化方法和实现结构。主要介绍以下电路模块的功能及实现结构：输入无源巴伦、正交信号生成单元、矢量合成单元、输出有源巴伦以及插损补偿放大电路。然后结合各模块电路的仿真结果，重点关注它们输出端差分信号之间的相位误差和幅度误差，并结合仿真结果对其进行改善与优化。完成版图设计，并对最终宽带有源移相器的S参数、相移值、增益、稳定性、相位误差及增益误差等结果进行仿真。

第四，完成流片并进行测试，将仿真结果与测试结果进行对比，并分析其存在差别的原因及合理性，总结该设计的不足之处并对未来工作进行展望。

# 预期达到的目标

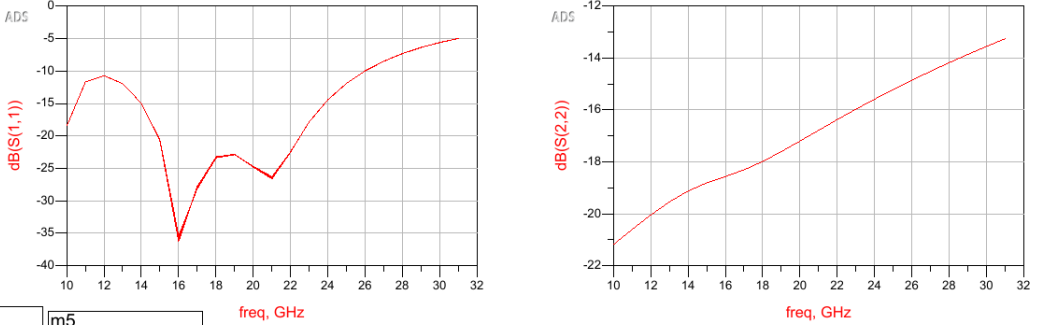
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 性能参数 | 工作频率/GHz | 位数/bits | 电源电压/V | S11/dB | S11/dB | 相位误差(RMS)/° | 增益误差(RMS)/dB |
| 设计指标 | **10~31** | **6** | **2.5/1.2** | **<-10** | **<-10** | **<2.8°** | **<0.25** |

# 已完成的研究工作与进度安排

## 已完成的研究工作

### 文献调研并确定电路拓扑结构

学习射频前端系统收发链路T/R组件中关于宽带有源移相器的设计理论，进行大量文献调研，了解当下矢量合成型宽带有源移相器的主流设计方法，并同导师和业界导师沟通，确定初步的宽带移相器设计方案。

目前所采用的电路拓扑结构如图3.1中所示，移相器从左至右由输入无源巴伦、正交信号生成电路、矢量合成单元、输出有源巴伦及插损补偿电路组成。目前已完成初步的电路前仿，得到的前仿结果图如下：

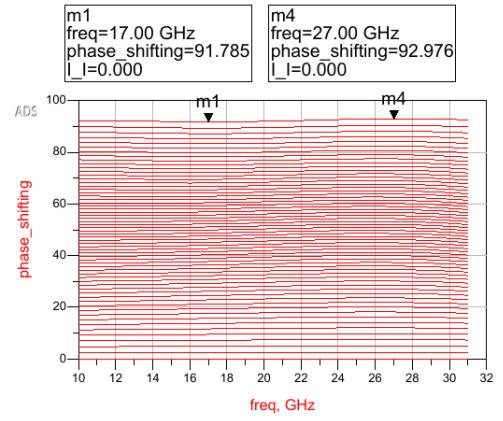
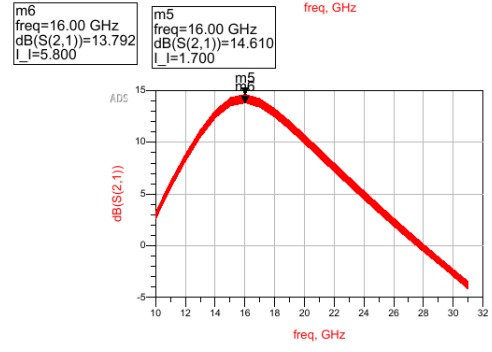
图5.1 移相器前仿输入与输出端回波损耗

图5.2 移相器0-90°移相情况与插入损耗

目前的前仿真结果显示，输入输出端的回波损耗与移相精度已大致达到设计指标要求，但移相器的增益误差与设计指标仍存在一定偏差，需要在后续电路的优化中改善输入巴伦与正交信号生成电路的幅值与相位误差。

## 进度安排

2024.6-2025.6 根据确定好的设计方案，进行宽带功率放大器的设计、仿真与优化；学习并完成版图绘制，完成联合仿真与优化。根据前面的电路分析与已有的仿真结果，目前仍然需要对前级电路中的Marchan Balun与正交信号生成电路进行优化与改进，以进一步减小由其产生的相移误差与幅度误差。同时，在版图绘制中，由于晶体管及电路走线所引起的寄生效应对差分信号的影响也不容忽视，需要在电路布局时小心处理。

2025.6-2025.12 提交版图，进行所设计有源移相器的流片；等待流片的同时，学习芯片的测试与测试代码的编写。

2025.12-2026.4 在拿到实物芯片之后进行测试，根据设计的芯片以及测试结果，进行文献调研，完成毕业论文的撰写。

# 为完成课题已具备和所需的条件与经费

报告提交人目前就读于南方科技大学深港微电子学院。该学院为国家示范性微电子学院。学院建有一流的科研平台，微纳工艺研发平台和IC设计与测试平台，聚焦集成电路设计方法学、集成电路芯片设计、集成电路制造与工艺、微纳系统与集成四大研究方向展开科学研究，在科研领域已获得多个国家级和省市级资质，包括国家示范性微电子学院（全国28家，华南地区仅有3家），教育部未来通信集成电路工程研究中心，广东省GaN器件工程技术研究中心，广东省三维集成工程研究中心和深圳市第三代半导体器件重点实验室。学院与国际知名企业Synopsys 和国内华大九天、鸿芯微纳等厂商合作，搭建IC 设计EDA 支撑平台（大学计划），该平台涵盖了Digital ASIC、Mixed-Signal IC、Analog IC、RF IC、三代半专用EDA、SoC 在内的多种集成电路设计所需的软件和硬件支持。

本课题的开展将依托的未来通信集成电路教育部工程研究中心，是由南方科技大学深港微电子学院与前沿与交叉科学研究院牵头建设的聚焦于未来通信（例如5G、6G等）集成电路领域的教育部工程研究中心。未来通信IC工程中心以国家科学与技术发展规划为指导，精准对接我国“以创新驱动5G发展，突破关键核心技术”等的战略需求，针对适用于当前5G和未来通信应用集成电路关键共性技术的下一代通信系统展开研究。中心已建立世界一流的IC 设计与测试平台，包括能够在微波和毫米波波段完成测试的网络分析仪、频谱分析仪、信号源、任意波形发生器以及其他高性能存储示波器等关键设备（图6-1），可很好地满足本项目中关于SiGe BiCMOS宽带有源移相器的测试和调试需求。另外，在射频电路的测试技能和加工要求方面，报告人的导师方小虎教授在多年的科研过程中，已经积累了大量的实践和调试技能，可以为本项目提供坚实的保障。课题组目前承担的深圳市科研项目（深圳市技术攻关重点项目—重2022N052“面向6G和卫星通信的多模多频射频前端芯片关键技术研究”，深圳市基础研究重点项目—基202200685G“高低轨卫星通信融合的射频前端和滤波器芯片设计研究”）。将为本课题中的研究提供经费支持。

图6-1 深港微电子学院未来通信集成电路教育部工程研究中心微波与毫米波测试设备

# 预计研究过程中可能遇到的困难和问题及其解决措施

理论分析方面：由于缺少设计经验，尽管在阅读了大量参考文献之后，报告人仍然可能遇到难以将理论分析和实际设计融汇贯通的问题，无法将理论应用到实践中来。应对该问题，报告人首先可以查阅更多分析了实际仿真过程的论文，另一方面可以请教导师或者有经验的师兄师姐。

电路仿真和设计：由于缺乏射频前端电路的设计经验，报告人在电路仿真过程中可能会遇到由于仿真设计不正确导致报错、对有源移相器的设计流程不熟悉、在仿真结果未达到指标的情况下无法及时做出正确的电路结构修改等。针对该问题，报告人需要查阅仿真相关的书籍与文献，经常向导师汇报进度，及时得到电路设计的不当之处与正确的指导。此外，由于报告人目前没有绘制射频微波电路版图的经验，且基于CMOS工艺的IC芯片的版图绘制十分考验技巧和经验，因此需要花费大量时间进行学习。

芯片测试方面：报告人目前仅具有少量芯片测试的经验，后续在测试的过程中需要继续学习测试代码的编写、每个仪器的使用方法等。

# 参考文献

1. Reggia F, Spencer E G. A New Technique in Ferrite Phase Shifting for Beam Scanning of Microwave Antennas[J]. Proceedings of the Ire, 1957, 45(11):1510-1517.
2. M. A. Treuhafat and L. M. Sliber. Use of microwave ferrite toroids to eliminate external magnets and reduce switching powers[J]. Proceedings of the Ire, 1958:1538.
3. White J F. Review of semiconductor microwave phase shifters[J]. Proceedings of the IEEE, 1968, 56.
4. Wu P S, Chang H Y, Tsai M D, et al. New miniature 15-20-GHz continuous-phase/amplitude control MMICs using 0.18μm CMOS technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(1):10-19.
5. Xue W, Sales S, Capmany J, et al. Microwave phase shifter with controllable power response based on slow- and fast-light effects in semiconductor optical amplifiers[J]. Optics Letters, 2009, 34(7):929-31.
6. Erker E G, Nagra A S, Liu Y, et al. Monolithic Ka-band phase shifter using voltage tunable BaSrTiO3 parallel plate capacitors[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 2002, 10(1):10-12.
7. Ayasli Y, Vorhaus J, et al. A monolithic single-chip X-band four-bit phase shifter[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1982, 30(12):2201-2206.
8. Campbell C F, Brown S A. A compact 5-bit phase-shifter MMIC for K-band satellite communication systems[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(12):2652-2656.
9. Koh K J, Rebeiz G M. A 6–18 GHz 5-bit active phase shifter[C]. IEEE Microwave Symposium Digest, 2010:792-795.
10. Li T W, Park J S, Wang H. A 2–24GHz 360° full-span differential vector modulator phase rotator with transformer-based poly-phase quadrature network[C]//2015 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC). IEEE, 2015: 1-4.
11. Li W T, Chiang Y C, Tsai J H, et al. 60-GHz 5-bit Phase Shifter With Integrated VGA Phase-Error Compensation[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(3):1224-1235.
12. Y. Yao, Z. Li, G. Cheng and L. Luo. A 6-bit active phase shifter for Ku-band phased arrays[C]. 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2017: 1-5.
13. Xing Q, Xiang Y, Boon C C, et al. A 52-57 GHz 6-Bit Phase Shifter With Hybrid of Passive and Active Structures[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018, 28(3):236-238.
14. Yao Y, Li Z, Cheng G, et al. A 6-bit active phase shifter for Ku-band phased arrays[C]//2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). IEEE, 2017: 1-5.
15. Yeh P C, Liu W C , Chiou H K . Compact 28-GHz subharmonically pumped resistive mixer MMIC using a lumped-element high-pass/band-pass balun[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15(2):62-64.
16. Cao J, Li Z, Li Q , et al. A Wideband Transformer Balun With Center Open Stub in CMOS Process[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014, 24(9):614-616.
17. Sang Y K, Kang D W, Koh K J, et al. An Improved Wideband All-Pass I/Q Network for Millimeter-Wave Phase Shifters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(11):3431-3439.
18. Duan Z, Ma Q, Liu Y, et al. A 6-bit CMOS Phase Shifter with Active Balun and Three-Stage Poly-Phase Filter for Phased Arrays[C]//2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). IEEE, 2020: 1-3.
19. Xia B, Chen W, Ghannouchi F M, et al. An 18–50-GHz Δ–Σ Modulated Quasi-Continuous Digital Vector-Modulation Phase Shifter With Variable Gain Control[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2021, 32(1): 60-63.
20. Park G H, Byeon C W, Park C S. 60 GHz 7-bit passive vector-sum phase shifter with an X-type attenuator[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2023, 70(7): 2355-2359.
21. Li T W, Park J S, Wang H. A 2–24-GHz 360° full-span differential vector modulator phase rotator with transformer-based poly-phase quadrature network[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2020, 28(12): 2623-2635.
22. 石伟,集成电路工程.基于40nm CMOS工艺的6~18GHz 6-bit有源移相器设计[D].[2024-12-30].
23. 薛永彬. 6~ 18GHz SiGe BiCMOS 宽带有源移相器设计[D]. 东南大学, 2019.
24. 袁刚,郭宽田,周小川,等.一种基于0.13μm SiGe BiCMOS工艺的Ka波段宽带有源移相器[J].微电子学, 2020, 50(5):6.