**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](#_Toc96502106)

[第3章 主要研究内容及研究方案 8](#_Toc96502108)

[3.1 节标题 8](#_Toc96502109)

[3.1.1 条标题 8](#_Toc96502110)

[第4章 预期达到的目标 9](#_Toc96502111)

[4.1 节标题 9](#_Toc96502112)

[4.1.1 条标题 9](#_Toc96502113)

[第5章 已完成的研究工作与进度安排 10](#_Toc96502114)

[5.1 节标题 10](#_Toc96502115)

[5.1.1 条标题 10](#_Toc96502116)

[第6章 为完成课题已具备和所需的条件与经费 11](#_Toc96502117)

[6.1 节标题 11](#_Toc96502118)

[6.1.1 条标题 11](#_Toc96502119)

[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 12](#_Toc96502120)

[7.1 节标题 12](#_Toc96502121)

[7.1.1 条标题 12](#_Toc96502122)

[参考文献 16](#_Toc96502132)

# 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、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。

III-V族化合物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，SiGe BiCMOS工艺的各方面性能在原有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。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，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。

目前对Kitaev型QSL材料研究还在进行，具体情况如表1-1所示[35]。

表1‑1　Kitaev型QSL候选材料的基本性质汇总[35]

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Materials | Space groups | Tmag（K） | θCW（K） | Magnetic ground state | References |
| Na2IrO3 | *C*2/m | 15 | -176（*θ*ab）  -40（*θ*c） | Zigzag | [190] |
| *α*-Li2IrO3 | *C*2/m | 15 | 5（*θ*ab）  -250（*θ*c） | Spiral | [42,194] |
| *β*-Li2IrO3 | *F*ddd | 38 | -90.2（*θ*a）  12.9（*θ*b）  21.6（*θ*c） | Spiral | [57,191] |
|  |  |  |  |  | 续下页 |

续表1‑1　Kitaev型QSL候选材料的基本性质汇总[35]

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Materials | Space groups | Tmag（K） | θCW（K） | Magnetic ground state | References |
| *γ*-Li2IrO3 | *C*ccm | 39.5 | 40 | Spiral | [42] |
| *α*-RuCl3 | *C*2/m→ | 7 | 39.6（*θ*ab）-216.4（*θ*c） | Zigzag | [193] |
| Cu3LiIr2O6 | C2/c | 15 | -145 | Antiferromagnetic | [202] |
| Ag3LiIr2O6 |  | - | -142 | Suspected QSL | [207] |
| H3LiIr2O6 | C2/m | - | -105 | Suspected QSL | [48] |

# 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。

近年来，随着SiGe BiCMOS工艺的发展，SiGe BiCMOS工艺相较于传统III-V族化合物拥有更好的集成度、更小的芯片面积以及更低的成本，并且该工艺对比CMOS工艺又有更好的频率特性以及更高的击穿电压，因此 SiGe BiCMOS工艺成为当下研究射频移相器的主流工艺。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。

## 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，台湾的黄天伟团队基于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，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。

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。

# 主要研究内容及研究方案

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工艺设计一款工作在10-31GHz频段的6-bit宽带、低插损、高精度有源移相器，通过模块理论分析和详细的设计流程来解决相应的设计问题，并完成流片及测试。在明确移相器的关键性能指标的基础上，首先分析了移相器对相控阵系统的影响，然后提出了针对性的优化方法和实现结构。具体而言，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、插损补偿电流及DAC数模转换电路等关键模块，给出了各个模块的优化设计方案，以实现高精度的移相器。针对本研究课题，其具体的研究方案如下：

进行大量文献调研工作，了解宽带移相器的研究背景以及研究意义，详细分析其基本工作原理，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，并结合测试结果，分析与对比不同拓扑的优点与不足之处。根据以上比较，考虑到预期的性能指标，选择合适的各模块电路的拓扑结构，并在设计过程中结合设计目标对

第二，针对传统的分布式功率放大器结构，。说明传统结构存在效率低、抗干扰能力差、芯片体积大等缺点，引出本文需要提出一个改进的设计方案，并给出提高输出功率、效率等性能的方法并推导出设计公式。

第三，详细介绍该宽带功率放大器的设计过程。使用仿真软件进行设计、仿真与优化。首先根据设计指标选择GaN HEMT的型号以及尺寸，对其建立小信号模型，提取本征参数和寄生参数，并建立寄生参数模型。并进行后续电路设计，包括偏置电路、输出匹配网络、输入匹配网路、功率合成网络等，并对最终宽带功率放大器的输出功率、增益、S参数、效率、稳定性、三阶交调等结果进行仿真。

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

## 节标题

### 条标题

正文段落 … …

（1）条目标题

（2）条目标题

公式按章重新编号：

(4-1)

……

图题：

图4-1　示例XXX

表题：

表4‑1　示例XXX

**论文中段落文字中文使用宋体，英文和数字使用 Times New Roman ，字号 12磅（小四）**，两端对齐，段落首行左缩进 2 个汉字符，行距为固定值 20 磅，段前空 0 磅，段后空 0 磅。

# 已完成的研究工作与进度安排

## 节标题

### 条标题

正文段落 … …

（1）条目标题

（2）条目标题

公式按章重新编号：

(5-1)

……

图题：

图5-1　示例XXX

表题：

表5‑1　示例XXX

**论文中段落文字中文使用宋体，英文和数字使用 Times New Roman ，字号 12磅（小四）**，两端对齐，段落首行左缩进 2 个汉字符，行距为固定值 20 磅，段前空 0 磅，段后空 0 磅。

# 为完成课题已具备和所需的条件与经费

## 节标题

### 条标题

正文段落 … …

（1）条目标题

（2）条目标题

公式按章重新编号：

(6-1)

……

图题：

图6-1　示例XXX

表题：

表6‑1　示例XXX

**论文中段落文字中文使用宋体，英文和数字使用 Times New Roman ，字号 12磅（小四）**，两端对齐，段落首行左缩进 2 个汉字符，行距为固定值 20 磅，段前空 0 磅，段后空 0 磅。

# 预计研究过程中可能遇到的困难和问题及其解决措施

## 节标题

### 条标题

正文段落 … …

（1）条目标题

（2）条目标题

公式按章重新编号：

(7-1)

……

图题：

图7-1　示例XXX

表题：

表7‑1　示例XXX

**论文中段落文字中文使用宋体，英文和数字使用 Times New Roman ，字号 12磅（小四）**，两端对齐，段落首行左缩进 2 个汉字符，行距为固定值 20 磅，段前空 0 磅，段后空 0 磅。

# 章标题

## 节标题

### 条标题

正文段落 … …

（1）条目标题

（2）条目标题

公式按章重新编号：

(8-1)

……

图题：

图8-1　示例XXX

表题：

表8‑1　示例XXX

**论文中段落文字中文使用宋体，英文和数字使用 Times New Roman ，字号 12磅（小四）**，两端对齐，段落首行左缩进 2 个汉字符，行距为固定值 20 磅，段前空 0 磅，段后空 0 磅。

# 章标题

## 节标题

### 条标题

正文段落 … …

（1）条目标题

（2）条目标题

公式按章重新编号：

(9-1)

……

图题：

图9-1　示例XXX

表题：

表9‑1　示例XXX

**论文中段落文字中文使用宋体，英文和数字使用 Times New Roman ，字号 12磅（小四）**，两端对齐，段落首行左缩进 2 个汉字符，行距为固定值 20 磅，段前空 0 磅，段后空 0 磅。

# 章标题

## 节标题

### 条标题

正文段落 … …

（1）条目标题

（2）条目标题

公式按章重新编号：

(10-1)

……

图题：

图10-1　示例XXX

表题：

表10‑1　示例XXX

**论文中段落文字中文使用宋体，英文和数字使用 Times New Roman ，字号 12磅（小四）**，两端对齐，段落首行左缩进 2 个汉字符，行距为固定值 20 磅，段前空 0 磅，段后空 0 磅。

# 参考文献

参考文献中所涉及的标点符号均采用半角，阅后删除方框

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. 赵耀东. 新时代的工业工程师[M/OL]. 台北: 天下文化出版社. 1998 [1998- 09-26]. http://www.ie.nthu.edu.tw/info/ie.newie.htm.
15. 全国信息与文献工作标准化技术委员会出版物格式分委员会. 图书书名页: GB/T 12450-2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 1.
16. 全国出版专业职业资格考试办公室. 全国出版专业职业资格考试辅导教材: 出版专业理论与实务•中级[M]. 上海: 上海辞书出版社, 2004: 299-307.

文后著录的参考文献务必实事求是。论文中引用过的文献必须著录，未引用的文献不得出现。应遵循学术道德规范，避免涉嫌抄袭、剽窃等学术不端行为。

参考文献一般应是作者亲自考察过的对学位论文有参考价值的文献。除特殊情况外，一般不应间接引用。参考文献应有权威性，要注意引用最新的文献。所有被引用文献均要列入参考文献中，必须按顺序标注，但同一篇文章只用一个序号。尽量引用原始文献。当不能引用原始文献时，要将二次引用文献、原始文献同时标注。

博士学位论文的参考文献一般不少于100篇，**硕士学位论文的参考文献一般不少于40篇，其中外文文献一般不少于总数的1/2。参考文献中近五年的文献数一般应不少于总数的1/3，并应有近两年的参考文献**。

教材、产品说明书、国家标准、未公开发表的研究报告（著名的内部报告如PB、AD报告及著名大公司的企业技术报告等除外）等通常不宜作为参考文献引用。

引用网上参考文献时，应注明该文献的准确网页地址，网上参考文献和各类标准不包含在上述规定的文献数量之内。本人在攻读学位期间发表的学术论文不应列入参考文献中。

每一条文献的内容要尽量写在同一页内。遇有被迫分页的情况，可通过“留白”或微调本页行距的方式尽量将同一条文献内容放在一页。

**阅后请删除此提示框。**

**顺序编码制要求如下：**

参考文献标注采用顺序编码制，著录格式应遵照《文后参考文献著录规则》（GB/T7714-2015）的要求。

文献中的作者不超过三位时全部列出，超过三位时，一般**只列前三位**，中文的后面加 “**，等**”字，英文的后面加 “**, et al**”，作者姓名之间用**逗号**分开。

外国人名一般采用**姓在前，名在后**的著录法，**姓全部著录，字母全大写**，**名简写成单个大写字母且不加标点**，姓和名之间空1格，如：“METCALF S W”。

中文人名的英文表达方式，也采用**姓在前，名在后**的著录法，**姓全部著录，字母全大写，名简写成单个大写字母且不加标点**，如：“钱学森”，简写为“QIAN X S”。

**参考文献**表的正文部分用**五号字**，中文使用**宋体**，英文使用 **Times New Roman** ，行距采用固定值 16 磅， 段前空 3 磅，段后空 0 磅。**参考文献中涉及的标点符号均采用半角。**

具体要求和标志代码详见《南方科技大学研究生学位论文写作指南》。

**阅后请删除此提示框。**

具体要求和标志代码详见《南方科技大学研究生学位论文写作指南》。