

# 微波移相器主体类型分析与铁电移相器 电路设计研究进展

马 华, 娄 菁<sup>✉</sup>, 王 军, 董博文, 冯明德, 李智强, 屈绍波

(空军工程大学 基础部, 西安, 710051)

**摘要** 移相器作为一种可调控导引波输出信号相位的功能性器件,被广泛应用于波束形成网络、相位调制器、相控阵天线等电子、雷达、通信系统并对相关系统性能的优劣有着最直接的影响。因此设计出满足未来发展需求的,兼具高性能、稳定性、小型化、低成本的实用化微波移相器对于微波技术的发展至关重要。为解决当前技术所面临的发展瓶颈,实现相关技术革新,需从整体上分析各类移相器的技术概况、优劣势与发展现状,精确梳理移相器未来发展趋势,更好地将相关领域学术研究的最新进展融入移相器的设计。基于以上目标,对移相器的发展进行了较为系统的总结,分别介绍了铁氧体移相器、PIN 二极管移相器、MEMS 移相器、铁电移相器的移相原理与性能指标,重点分析了基于 BST 铁电材料移相器的微波电路设计,并结合相关技术趋势对 BST 铁电移相器的发展做出了一定的展望。

**关键词** 微波功能器件;移相器;BST;铁电移相器;微波电路

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.02.009

**中图分类号** TN623 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)02-0053-13

## Analysis of Main Types of Microwave Phase Shifters and Research on Ferroelectric Phase Shifter Circuit Design

MA Hua, LOU Jing<sup>✉</sup>, WANG Jun, DONG Bowen, FENG Mingde, LI Zhiqiang, QU Shaobo  
(Department of Basic Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** A phase shifter is a kind of functional device used to regulate the phase of guiding wave output signal, and is widely used in beam formation network, phase modulator, phased array antenna and other electronic, radar and communication systems, and has the most direct impact on the performance of related systems. Therefore, it is very important to design a practical microwave phase shifter with high performance, stability, miniaturization and low cost to meet the future development needs. In order to solve the bottleneck of current technology development and realize relevant technical innovation, it is necessary to comprehensively analyze the technical overview, advantages and disadvantages and development status of various phase shifters, accurately sort out the future development trend of phase shifters, and better integrate the latest academic research progress in related fields into the design of phase shifters. Based on the goal mentioned above, the development of phase shifter, the ferrite phase shifter, PIN diode phase shifter,

**收稿日期:** 2018-12-10

**基金项目:** 国家自然科学基金(61671467)

**作者简介:** 马 华(1974—),男,甘肃会宁人,教授,博士生导师,主要从事超材料,光子晶体研究。E-mail:mahuar@163.com

**通信作者:** 娄 菁(1995—),男,河南新乡人,硕士生,主要从事铁电薄膜研究。E-mail:loujing9486@163.com

**引用格式:** 马华, 娄菁, 王军, 等. 微波移相器主体类型分析与铁电移相器电路设计研究进展[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(2): 53-65. Ma Hua, LOU Jing, WANG Jun, et al. Main Type Analysis of Microwave Phase Shifters and Research Progress of Ferroelectric Phase Shifter Circuit Design[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(2): 53-65.

MEMS phase shifter, ferroelectric phase shift principle and performance index of the phase shifter are analyzed separately in systematic summary based on BST ferroelectric material phase shifter microwave circuit design, and combined with the related technical trend, some prospects for the development of BST ferroelectric phase shifter are made to a certain extent.

**Key words:** microwave functional device; phase shifter; BST; ferroelectric phase shifter; microwave circuit

自 20 世纪五六十年代起,相控阵天线一经研究便在军事和民用领域得到快速的发展并逐渐得以普及。相控阵天线利用大量微波功能器件通过调制电磁波幅值、相位等电参量以形成特定的空间波束,在不进行机械转动<sup>[2]</sup>的情况下就可以完成目标的跟踪与扫描。相控阵天线较传统天线具有以下几个特点<sup>[3]</sup>:天线扫描速度快,相控阵天线的扫描速度高达微秒级别;天线扫描无惯性,可控性较好;波束指向灵活,通过改变相控阵天线各个单元电磁波的幅值和相位,整体波束形状随之发生改变;波束方向性好,可快速搜索捕捉目标。相控阵天线的出现极大地推动了天线雷达技术的发展。其中的移相器作为 T/R 组件的重要组成部分对于天线整体性能起着至关重要的作用,因其数量与基本辐射单元的数量相同,移相器的成本极大程度上决定着相控阵天线的制作成本<sup>[4]</sup>。此外,移相器作为相控阵天线的核心组件,它的整体微波性能直接决定了相控阵天线的波束指向。因此,现代天线与雷达技术的飞速发展也在促使移相器技术的不断革新。

在相控阵天线系统中,移相器作为发射天线前端的电磁波信号预处理器件,通过电信号激励可以调控输出信号相位信息。任何传输介质都会对波的传播产生相移,输入端与输出端的相位差为<sup>[5]</sup>:

$$\Delta\phi = 2\pi ft = 2\pi fl/v \quad (1)$$

式中: $f$ 为移相器工作频率即电磁波频率; $t$ 为电磁波信号通过该传输介质的时间; $l$ 为传输距离; $v$ 为电磁波在该传输介质中的相速度,移相器正是通过这一基本原理实现相移。

由输入端与输出端的相位差的参数可知,在确定的工作频率下,改变输出相位的基本方法为改变移相器的传输时间<sup>[6-8]</sup>,即改变传输路径长度或者改变电磁波在传输介质中的相速度。

考虑到为了满足雷达与天线技术的发展需求,应用于相控阵天线的移相器需要满足以下性能指标:环境性能稳定,移相性能受环境变化影响小;相移精度高,以保证高的天线扫描方向性;相移速度快,以满足天线快速扫描的需要;插入损耗小,以保证具有足够大的传输功率;移相器的寿命、体积、成本也要根据应用需求综合考虑。

## 1 移相器的分类

移相器的种类较多,按照移相器的移相原理和结构设计的不同,可以将移相器分为铁氧体移相器<sup>[9-21]</sup>,半导体二极管(PIN 二极管)移相器<sup>[22-25]</sup>,砷化镓场效应管(GaAs)移相器<sup>[26-27]</sup>,射频 MEMS 移相器<sup>[28-36]</sup>,光纤矩阵移相器<sup>[37]</sup>和铁电移相器<sup>[38-40]</sup>等。各类移相器具有相应的优缺点、工作条件,以及与之相适应的工作环境。总体来看,雷达与天线系统的发展推动移相器技术的不断革新,同时移相器移相机理与结构设计的创新从另一方面也在促使天线、雷达等通讯系统朝着更加成熟的方向迈进。

### 1.1 铁氧体移相器

国外对铁氧体移相器的研究较早,1949 年 Polder D<sup>[14]</sup>首次发现铁氧体的旋磁特性后,人们不断加强对于铁氧体移相器的研究,并开始利用铁氧体材料进行移相器的制作。铁氧体移相器的移相原理是通过施加外加磁场改变铁氧体的磁导率,进而改变电磁波的相速度,完成对传输相位的调控。

随着 1957 年 Reggia-Spencer(雷贾-斯本塞)互易性铁氧体移相器<sup>[15]</sup>的出现,铁氧体移相器得到了迅速的发展<sup>[16]</sup>。雷贾-斯本塞移相器波导形状是矩形或者圆形,波导中轴上放置纵向偏置的铁氧体棒,当棒的直径大于某个临界值时,圆极化场会被紧紧束缚在铁氧体棒内。该移相器中当铁氧体棒的长度较短时可以得到大的互易相移,但相移量在一定程度上对工作频率具有较高的敏感性。雷贾-斯本塞移相器因其具有移相量大、插入损耗小、互易性好等优点曾在 S 波段相控阵雷达使用<sup>[17]</sup>。但同时涡流损耗大、开关时间长、功率容量较低等缺点制约了该移相器的进一步发展。铁氧体移相器经过几十年的发展,目前已趋向成熟,在相控阵雷达中得到广泛的应用,除了互易类型,也出现了非互易型铁氧体移相器<sup>[18]</sup>,通过结构设计可改变铁氧体移相器的移相特性,目前常用的铁氧体移相器类型主要有环形移相器<sup>[19]</sup>,双模移相器<sup>[20]</sup>和旋转场移相器<sup>[21]</sup>等。

总体来看,铁氧体移相器具有承受功率高、插入损耗小、移相精度高、工作带宽宽等优点。但由于需

要偏置线圈提供外加磁场,体积庞大,结构复杂,不易于小型化,且对外部温度环境要求较高,因此在实际应用中存在着一定的局限性。

## 1.2 PIN 二极管移相器

移相器的电路类型有很多,移相量只能按照特定的数值进行变化的称为数字移相器<sup>[22-23]</sup>,移相量能连续变化的称为模拟移相器。数字移相器的相移是确定的,其相位只能阶跃变化。移相器的位数越多,对信号的控制越精细,移相器本身即控制电路也越复杂。PIN 二极管移相器<sup>[24-25]</sup>是典型的数字移相器。

PIN 二极管移相器主要依据 PIN 二极管自身固有特性进行移相设计。PIN 二极管的 V-A 特性使其具有正偏、反偏 2 种开关状态。当 PIN 二极管处于反偏状态时,电路产生小的串联结电容,二极管处于高阻抗状态;当 PIN 二极管处于正偏状态时,串联结电容消失<sup>[41]</sup>,此时二极管处于低阻抗状态,利用偏置信号可以控制 PIN 二极管的 2 种不同状态进而完成 RF 电路的设计。在进行 RF 电路设计时需考虑由于二极管封装所造成的寄生效应,同时还需注意当偏置信号加到 PIN 二极管上时,电路必须带有 RF 扼流装置和隔直流装置,使偏置信号与 RF 信号相隔离。

20 世纪 60 年代,为了解决铁氧体移相器体积质量较大的问题,用 PIN 二极管作为开关元件的移相器开始出现。移相器设计基本原理是利用 PIN 二极管正偏和反偏 2 种开关状态的相互转化来改变传输线的电长度、电容、电感、电阻等参量大小以实现相移。PIN 二极管移相器可分为开关线式移相器、加载线式移相器、反射型移相器等。开关线型移相器是最简易的类型,它使用 2 个单刀双掷开关使信号沿不同长度的传输线之一进行传输,其原理示意图文献 [24], 2 条路径信号差分相移<sup>[42]</sup>为:

$$\Delta\varphi = \beta l \quad (2)$$

式中: $\beta$  为传输线传播常数。当传输线上传输电磁波为 TEM 类型或准 TEM 类型,相移与频率呈线性关系可减少失真,同时该移相器本质上为互易系统,因此兼具收发信号功能。总体来看,PIN 二极管移相器具有体积小、重量轻、开关速度快、激励功率小等优点。但由于开关线性移相器的插入损耗为单刀双掷开关的损耗加上线损耗,导致损耗通常较大,同时工作频带较窄、传输功率较小、集成成本较高。

目前工程应用上主要采用四位到六位 PIN 二极管移相器,设计时需要考虑移相精度、承受功率、损耗、工作频带以及反应时间,同时必须选择性能较好的微波功能器件以及微波电路,综合权衡多方面

要求实现设计构想。1987 年, Richard J Lang 和 Brian J Edward<sup>[43]</sup> 采用 PIN 二极管设计出工作在 Ka 波段的四位移相器,可实现 22.5°、45°、91° 和 180° 的相移,测试结果显示在 35 GHz 移相器的插入损耗为 -3.9 dB。2002 年, Teshiba Mary 和 Leeuwen Robert Van<sup>[44]</sup> 等人在 7 GHz 到 11 GHz 设计了相移量为 5.625°、11.25°、22.5°、45°、91°、180° 的六位 PIN 二极管移相器,在该频带内,回波损耗小于 -10 dB,插入损耗在 -10 到 -13 dB 之间。

与 PIN 二极管移相器类似, 砷化镓 (GaAs) 场效应管移相器<sup>[26-27]</sup> 也是典型的数字移相器。砷化镓 (GaAs) 场效应管移相器利用场效应管的开关特性通过改变传输线的等效电容等电参数实现移相的功能。相比于 PIN 二极管移相器, 场效应管移相器具有更快的开关转换速度、更低的开关转换能耗、简单的直流偏置电路, 同时与集成电路的设计具有更好的适应性<sup>[45]</sup>。

## 1.3 MEMS 移相器

微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 是以半导体制造技术为基础采用 IC (集成电路) 工艺制作的微型器件与器件阵列, 是微电子技术 with 精密机械制造技术相结合的产物。MEMS 工艺技术起源于 IC 技术, 是采用薄膜沉积、光刻、IBE 刻蚀、剥离、封装等基本工艺来制造复杂三维结构的微加工技术。

自 1979 年低频 MEMS<sup>[28]</sup> 开关首次报道以来, MEMS 开关在军民领域均得到广泛应用。MEMS 开关<sup>[45]</sup> 与传统半导体开关相比具有一系列的优点: 插入损耗小、线性度高、隔离度高、频带宽、便于集成等。MEMS 组件的低插损、高线性度等优点促进了 MEMS 移相器的飞速发展。MEMS 分布电容式移相器的设计原理<sup>[29]</sup> 是通过周期性加载具有高电容变化率的 MEMS 电容, 将传输线变为慢波系统, 通过加载偏置电压改变 MEMS 分布电容, 进而改变传输线上的相速实现移相功能。

目前, 国内外对 MEMS 移相器研究较热, 相比于采用 PIN 二极管的数字移相器, 采用 MEMS 技术的移相器在 X 波段到 W 波段具有更小的插入损耗与更低的开关转换能量<sup>[30]</sup>, 其性能较 PIN 二极管移相器有了很大的改善。因为 MEMS 移相器的损耗主要来源于导体损耗而非介质损耗, 同时由于 MEMS 的电容介质为真空或空气, 其漏电流可以忽略, 因此 MEMS 移相器被广泛应用在要求低损耗与高频的场合。

MEMS 移相器从电路结构方面可以分为 2 大

类;第1类移相器类似于PIN二极管移相器,通过MEMS开关改变传输线的电参量以实现相移,该移相器为MEMS开关网络移相器<sup>[31]</sup>。第2类采用分布式MEMS传输线结构的分布式移相器<sup>[32]</sup>,通过调节可变电容的大小改变相速实现移相。1999年,美国密歇根大学的Barker博士<sup>[33]</sup>制备出工作在0~60 GHz的宽频段MEMS移相器,通过在共面波导结构上加载MEMS金属电桥,改变金属电桥高度实现改变电磁波相速度进而实现移相的效果,测试结果表明该移相器在40 GHz和60 GHz分别实现360°的相移量,移相器产生的插入损耗分别为-5.1 dB与-4 dB。2010年,Ponchel Freddy等人通过将BST作为MEMS开关移相器的介质层<sup>[34]</sup>,提高了分布电容的调谐率,改善了移相器的整体性能。

从总体上看,MEMS移相器<sup>[35]</sup>具有插入损耗低、寄生电容小、应用频带较宽<sup>[36]</sup>等优点。但由于MEMS理论与工艺尚不成熟,对于MEMS桥中残余力研究还不深入,造成悬臂的经典力学特性的理论模型不够完善。同时MEMS移相器制作工艺较为复杂,机械结构响应时间较长,与硅基CMOS单片集成难度较大,这些因素阻碍了MEMS移相器更为广泛的应用。

上述几类移相器具有各自的优缺点与性能指标见表1。

表1 各类移相器性能指标

性能指标	铁氧体移相器	PIN二极管移相器	MEMS移相器
成本	高	低	较高
工作频带	较宽	窄	宽
功率	大	小	较小
体积	大	较小	小
响应速度	慢	快	慢
开关转化能耗	高	低	低

近年来,随着微型单片雷达技术的迅速发展<sup>[46]</sup>,设计出兼具小体积、高频率、宽频带等特征的阵列天线是满足其发展的必然需要。同时由于雷达数据后处理系统电路设计普遍基于硅基CMOS集成,如何利用目前成本最低,工艺最成熟的硅工艺完成微型单片雷达的设计是需要解决的一个重要问题。

上述几类移相器在不同的方面各自存在优缺点,但都存在难以与硅基CMOS进行较好的单片集成的缺点。以铁电材料为核心的铁电介质移相器可以克服这一缺陷,同时因其结构设计简单、移相量易于调控、驱动功率低、响应速度快、综合成本较低而逐渐得到日益广泛的关注,并有望取代铁氧体移相

器和PIN二极管移相器走向实用化<sup>[47]</sup>。

#### 1.4 铁电移相器

铁电移相器中核心部件为铁电材料,常见的铁电材料多属于钙钛矿结构<sup>[48]</sup>,钙钛矿结构的晶格组成为 $ABO_3$ 型,其中A,B代表2种阳离子,O代表氧原子,A离子与 $O_2^-$ 构成fcc结构,B阳离子位于由氧原子构成的八面体的中心。铁电材料的介电非线性是指其介电常数在偏置直流电压的作用下呈现非线性变化。在外加直流电场作用下,介电常数呈现非线性变化的材料主要有铅基 $PbTiO_3$ <sup>[49-50]</sup>、 $(Pb, Sr)TiO_3$ <sup>[51]</sup>及其他铅基改性体系<sup>[52]</sup>、 $BaTiO_3$ <sup>[49-50]</sup>、 $SrTiO_3$ <sup>[49-50]</sup>、 $(Ba, Sr)TiO_3$ <sup>[49-50]</sup>、以及 $Cd_2Nb_2O_7$ <sup>[53]</sup>、 $KTaO_3$ <sup>[54]</sup>等。

铁电移相器的工作原理是通过外加直流偏压改变铁电材料的介电常数进而改变电磁波的相速度实现移相功能<sup>[55]</sup>。铁电移相器性能提升主要来自于2个方面:

1)选择具有更好微波性能的铁电材料。适用于移相器设计的铁电材料通常要求具有较小的介质损耗与较高的介电常数调谐率。并且要求所选铁电材料介电常数适中,防止出现介质损耗过大、系统阻抗难以匹配等问题。此外,选用的铁电材料的调谐率应当具有较好的温度稳定性确保移相器可在恶劣环境下正常工作。

2)在拥有较好微波性能铁电材料的基础上,需要设计出与之具有更好适应性的移相器微波电路,高效率地利用铁电材料的调谐率从而实现更好的移相功能。

## 2 铁电移相器的材料选取

在众多铁电材料中,具有钙钛矿结构的钛酸锶钡( $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ ,简称BST)因在顺电相表现出来高的介电常数调谐率与低的介质损耗被认为是未来最有潜力的移相器铁电材料<sup>[56-57]</sup>,目前应用在移相器中的BST<sup>[58-59]</sup>材料分为块材、厚膜和薄膜。

通常采用干压成型或等静压成型的方式制作BST块材,BST块材制作工艺简单,但BST块材存在介电常数过大,介质损耗较大等缺点。为了提高BST的微波介电性能,Sengupta L C等人提出利用Mg类改性剂进行BST材料改良<sup>[60]</sup>,测试结果表明通过MgO的添加,BST块材的介电常数明显降低,但导致BST介电常数调谐率有所下降。后续研究发现通过稀土类改性剂的添加可以进一步降低介质损耗<sup>[61]</sup>,同时提高介电常数调谐率。相比于BST块材,BST厚膜的厚度大大减小,降低了获得相同

电场强度所需的外加偏压。同时由于厚膜具有较小的表面应力,提高了器件抗老化的能力,使得移相器具有更强的实用性。BST 厚膜制作工艺主要有流延法<sup>[62]</sup>与丝网印刷法<sup>[63]</sup>等。

当前存在多种 BST 薄膜的制备方法,比较常用的有磁控溅射法、溶胶-凝胶法、化学气相沉积法、物理气相沉积法和脉冲激光沉积法等。如何制备性能更优的薄膜是 BST 薄膜制备过程中所关注的焦点,目前国内外学者主要从以下几个方面开展特性优化研究。

1) 选择合适衬底材料,通常选择与 BST 晶格匹配较好的,具有相对较低的介电常数与介质损耗的材料作为衬底材料。目前常用的衬底主要有 MgO、LaAlO<sub>3</sub>、蓝宝石等。2003 年, Moon S E<sup>[64]</sup> 等人利用脉冲激光沉积法(PLD)在(111)、(011)、(001)取向上得到不同择优取向的 BST 铁电薄膜,测试结果表明在(111)取向的 MgO 单晶基片制得的 BST 薄膜可以在不降低可调性的前提下获得更高的品质因子,更适合微波器件的制作。

2) 晶化退火处理<sup>[65-66]</sup>,通过退火处理后的 BST 薄膜可以实现向钙钛矿结构更好的转化,同时可以降低薄膜内应力,提高晶体质量。

3) 引入缓冲层,人们通常在 BST 薄膜与底电极之间引入缓冲层有助于解决薄膜与衬底之间存在的晶格失配减少薄膜内应力<sup>[67-68]</sup>,同时可以提高 BST 调谐率,降低介质损耗<sup>[69]</sup>。

4) 进行 BST 薄膜掺杂改性,通常在 BST 中掺杂低化合价元素<sup>[61]</sup>有利于降低薄膜介质损耗, Kongon A I 研究发现通过掺杂 Bi 元素<sup>[70]</sup>有助于减少 BST 薄膜漏电流与介质损耗。

5) 设置 BST 薄膜组份梯度<sup>[71]</sup>, Zhong S 等人研究表明具有组分梯度的 BST 薄膜可以在较宽的温度范围内同时拥有高的调谐率和低的介质损耗<sup>[72]</sup>。

1965 年,美国海军就提出铁电移相器的设计构想,但限于铁电材料的整体微波性能,一直无法达到预期效果。直到 20 世纪 90 年代,美国海军实验室的 Rao J B L 和 Patel D P 进行 BST 块材铁电移相器的研究,并成功研制出工作在 10 GHz 左右的压控铁电透镜移相器天线阵<sup>[38]</sup>,测试结果表明该移相器可以实现 360°相移、插入损耗为 -2.5 dB。此后,利用 BST 制作铁电移相器成为世界各国研究的热点。

### 3 铁电移相器微波电路设计

目前以 BST 作为铁电材料的移相器微波电路主要采用微带线结构与共面波导结构。在进行铁电

移相器的电路设计时需要同时考虑并不断平衡电路匹配、加电效率、插入损耗、介电常数调谐量利用率、结构尺寸等一系列设计指标。不同类型的微波电路具有各自的优缺点以及所适合的工作环境,通过选择并优化射频微波电路以满足移相器设计的性能指标要求是促进铁电移相器发展的一条重要途径。

#### 3.1 微带线结构

微带线结构移相器采用 BST 材料作为介质层,介质层上方是有源微带线,下方是金属接地板,通过将直流偏压加在微带线与接地板之间从而改变中间 BST 介质层的介电常数以实现移相功能。

1997 年,美国加州大学 Flaviss F D<sup>[39]</sup> 等人通过溶胶凝胶法(sol-gel)成功制造出 0.1 mm 厚的 BST 陶瓷基片,有效改善了铁电材料的介质损耗,大幅度降低所需的偏置电压。并将移相器微波电路设计为微带线结构,通过将直流偏压加在微带线与金属接地板之间改变 BST 陶瓷介电常数以实现相移。测试结果表明该移相器在 250 V 偏压, 2.4 GHz 工作频率下实现 165°的相移,插入损耗为 -3 dB。1999 年, Keuls F W Van 等人制作了工作在 Ku 波段的耦合微带线移相器<sup>[40]</sup>,并通过对比实验研究了不同厚度的 BST 薄膜、BST 薄膜有无掺杂 Mn 元素以及不同的介质衬底等因素对移相器移相效果所带来的影响。实验结果表明当选择 508 μm 的 MgO 介质衬底、掺杂了 1% Mn 的 0.5 μm 厚 BST 薄膜时,移相器移相性能最好,在 400 V 的直流偏压下,可实现 58.4°/dB 的 FOM 因子。

耦合微带线移相器的移相机制是通过在耦合微带线之间加载直流偏压来改变铁电材料的介电常数,进而改变电磁波相速以获得一定的相移度。由于微带线间距较大,为了获得一定的相移量,所加直流偏压通常较大,达到几百伏。2005 年,韩国电子电信研究所 Ryu Han-Cheol 等人通过电子束蒸发技术在 MgO 衬底上沉积 BST 薄膜制得耦合微带线移相器<sup>[73]</sup>。通过改变直流偏压到 200 V,该移相器在 29 GHz 实现 458°相移,插入损耗介于 -7.8 ~ 10.5 dB。

微带线结构是 BST 铁电移相器早期经典结构,结构简单,制作成本较低,但存在以下几个缺点:

1) 移相器可变电容变化幅度较小,通常需要较大的长度来获得足够的移相量,导致整体尺寸较大;

2) 微带线结构移相器具有相对较高的金属损耗,导致插入损耗过大;

3) BST 材料的介电常数调谐率不能被充分利用。这些因素都限制了微带型结构的进一步发展。

### 3.2 共面波导结构

铁电移相器的另外一种主要微波电路为共面波导结构。共面波导结构移相器结构简单,主要由 G-S-G 金属结构, BST 材料与介质衬底组成。其工作机制为通过在信号线与地线加载直流偏压以改变 BST 介电常数进而实现移相功能。与微带线结构移相器相比,共面波导移相器具有结构简单、工艺制备方便、插入损耗低、便于平面集成等优势。常用的共面波导结构通常分为:均匀共面波导型、分布电容加载共面波导型、左手传输线加载共面波导型与反射电路加载共面波导型 4 类。

#### 3.2.1 均匀共面波导

均匀共面波导型铁电移相器以简单的共面波导传输线为基本的微波电路设计,结构简单,利于平面电路集成。2001 年, Zimmermann F 等人采用共面波导结构制成 BST 厚膜移相器<sup>[74]</sup>。该移相器选择  $5 \mu\text{m}$  厚的  $\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3$  的铁电材料,损耗较低的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  衬底,通过在信号线与地线之间加载直流偏压以实现移相效果。测试结果显示由于介质损耗过大、电场强度过低,移相器在 24 GHz 实现 FOM 因子仅为  $4.84^\circ/\text{dB}$ 。2003 年, Yoon Hargsoon 等人通过在高阻硅上沉积 BST 薄膜<sup>[75]</sup>,并通过优化移相器电路设计提高了 BST 的调谐率。同时所采用的加工工艺与硅基 CMOS 技术具有很好的适应性。测试结果表明该移相器随着直流偏压的逐渐增大,在 25 GHz, 100 V 的偏压下可实现  $20^\circ$  的相移,插入损耗为  $-10.7 \text{ dB}$ ,回波损耗小于  $-15 \text{ dB}$ 。2004 年,英国伯明翰大学的 Suherman Phe M 等人通过改善 BST 薄膜的沉积过程<sup>[76]</sup>,使 BST 薄膜调谐率提高到 45%,同时降低了介质损耗。测试结果表明该均匀共面波导型移相器在 40 GHz 频率和  $2.8 \text{ kV/cm}$  的场强下可实现  $220^\circ$  的相移,插入损耗为  $-8 \text{ dB}$ 。2004 年,夏威夷大学的 Kim W<sup>[77]</sup>等人以共面波导结构为基础,通过在铁电材料与共面波导之间增加  $\text{SiO}_2$  缓冲层,明显降低了移相器的插入损耗,促进了铁电移相器的实用化进程。

为了增加相移量,2005 年韩国的 Kim Ki-Byoung 等人在均匀共面波导移相器的基础上通过设置 slot 结构实现了一种串联电感加载均匀共面波导型的电路形式<sup>[78]</sup>。在共面波导基础上均匀设置的 slot 结构起到了增加串联电感的作用,有效地增加了移相量,测试结果显示该移相器在  $16 \sim 18 \text{ GHz}$ , 50 V 的偏置电压下时可得  $98^\circ$  的相移量,插入损耗小于  $-1.5 \text{ dB}$ 。对于均匀的共面波导结构,移相器制作工艺简单,插入损耗较低。但当对器件有小型化的要求时,该微波电路形式很难实现较大

的相移量,由此产生了分布电容加载共面波导型移相器。

#### 3.2.2 分布电容加载共面波导

分布电容加载共面波导移相器是一种在共面波导结构上周期性加载可变电容拓扑结构的移相器。这类移相器的电路设计以并联电容,串联电感为基本电路单元。常用的结构与等效电路见图 1,通过在地线与信号线之间设置锯齿结构并以固定的间距咬合来增加并联电容大小。该等效电路中特征阻抗与传输信号相位分别为<sup>[5]</sup>:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C+C_i}} \quad (3)$$

$$\varphi = \omega \sqrt{L(C+C_i)} = \sqrt{LC} \sqrt{1 + \frac{C_i}{C}} \quad (4)$$

式中:  $L$  为单位长度等效电感;  $C$  为单位长度不可调等效电容;  $C_i$  为单位长度可调电容。由式(4)可知,在一定工作频率下,相移量  $\Delta\varphi$  与  $\sqrt{L}$  成正比。当可调电容  $C_i$  从  $C_{i1}$  减少到  $C_{i2}$ ,  $\Delta C_i = C_{i1} - C_{i2}$ , 相移量为:

$$\Delta\varphi = \omega \sqrt{L} (\sqrt{C+C_{i1}} - \sqrt{C+C_{i2}}) = \frac{\omega \sqrt{L} \Delta C_i}{\sqrt{C+C_{i1}} + \sqrt{C+C_{i2}}} \quad (5)$$

由式(5)可知,在单位长度等效电感不变的前提下,减少不可调电容或者增大可调电容调节量均可增大相移量。

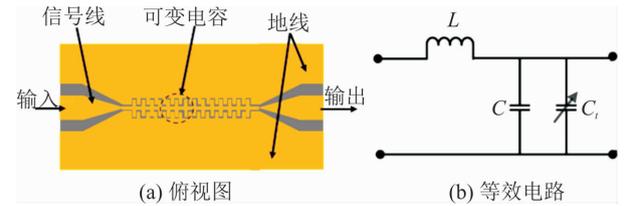


图 1 分布电容加载共面波导移相器

考虑到传统铁电移相器具有可变电容调谐幅度较小、导体损耗较大、BST 薄膜的调谐率利用率较低、控制直流偏压较高等局限性,2002 年, York R A<sup>[79]</sup>等人通过在共面波导结构中周期性加载分布电容制作出一种新型铁电移相器微波电路。该移相器通过在信号线与地线之间加载偏置电压实现改变 BST 的介电常数来调节分布电容大小进而实现移相功能。测试结果表明该移相器可实现在 30 GHz, 20 V 直流偏压下相移量从  $0$  到  $157^\circ$  的连续变化,插入损耗  $-5.8 \text{ dB}$ ,回波损耗低于  $-12 \text{ dB}$ 。2002 年 York R A 等人通过优化电极拓扑结构<sup>[80]</sup>,实现了在  $6.3 \text{ GHz}$  时  $93^\circ/\text{dB}$  以及  $8.5 \text{ GHz}$  时  $87^\circ/\text{dB}$  的 FOM 因子。

2006 年, Meng Qingduan<sup>[81]</sup>等人通过在共面波

导的基础上引入新的周期加载分布电容结构,有效地解决了宽频带阻抗匹配的问题。同时通过在信号线上加载周期性锥形电容,并在锥形电容与地线之间引入锯齿状电极结构,有效减小不可调电容的同时增大了可调电容的大小,有效地增大移相量。测试结果显示该移相器在 0~16 GHz 时回波损耗小于 -15 dB,同时在 9.4 GHz, 120 V 的偏压下实现 41° 的相移量。2007 年, Carru Jean-Claude<sup>[82]</sup> 等人选用 0.3 μm 厚的 Ba<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>TiO<sub>3</sub> 作为铁电薄膜,通过引入叉指电容结构,有效地减小了直流偏置电压的大小,在 40 V 的偏置电压下铁电薄膜的调谐率达到了 40%。测试结果表明该移相器在 40 GHz, 17 V 直流偏压下实现了 360° 的相移,在 40 V 的偏压下实现 600° 的相移, FOM 因子为 22°/dB。

为了更好地实现移相器尺寸小型化设计以及解决电路阻抗匹配问题, 2009 年, 新加坡的 Sheng Su<sup>[83]</sup> 等人引入了另外一种分布电容加载共面波导结构, 在 5 mm×10 mm 的高阻硅片上设计 6 个 8×10 μm MIM 电容结构, 底电极选用铂, 上层电极选用 2 μm 厚的金。测试结果表明移相器在 7 GHz, 25 V 的直流偏压下可以实现 170° 的相移, 插入损耗为 -2.3 dB。2010 年, 该课题组<sup>[84]</sup> 采用 MIM 分布电容加载共面波导结构, 在 LaAlO<sub>3</sub> 衬底上沉积 BST 薄膜, 在 8 GHz, 12 V 的直流偏压下实现 150° 的相移。

2010 年, He W<sup>[85]</sup> 等人在共面波导传输线结构的基础上引入底电极, 形成一个串联微带电容结构, 同时对 BST 进行了图形化处理。该移相器结构设计增大了可调电容的调节范围, 所设计的两种移相器结构在 18 GHz 时分别实现了 190° 与 262° 的相移, 但移相器结构制作工艺复杂且不利于硅基电路集成, 在目前工艺条件下实用性较差。

2014 年, Paolis Rosa De<sup>[86]</sup> 等人通过利用 MIM 分布电容加载共面波导在 60 GHz 实现移相, 移相器尺寸为 1.5 mm×0.8 mm。实验结构表明在 60 GHz 时 BST 的调谐率达到 80%, 不加直流偏压时介质损耗低于 0.16。当所加直流偏压为 30 V 时, 移相量与品质因子为 135° 与 23°/dB。所加直流偏压为 90 V 时, 移相量与品质因子为 150° 与 22°/dB, 回波损耗低于 -12 dB。2014 年, Kohler Christian 与 Friederich Andreas 一方面通过掺杂改性 BST 薄膜<sup>[87]</sup>, 另一方面通过丝网印刷与共烧技术, 制得了以银为金属材料的 MIM 加载共面波导移相器, 微观结构表明银与 BST 材料具有很好的兼容性, 同时该移相器结构实现在 1.72 GHz 时 70°/dB 的 FOM 因子。

2015 年, Ryu Han Cheol<sup>[88]</sup> 等人通过在 BST 掺杂 Mn 元素, 降低了 BST 的介质损耗并提高了 BST 的调谐率, 通过脉冲激光沉积法 (PLD) 在 MgO 衬底上镀了一层 400 nm 的薄膜, 通过设计电容加载 CPW 结构获得在 25~35 GHz 工作频率下 293° 的移相量, 在 35 GHz 的工作频率下随着偏置电压从 0 V 到 80 V, 插入损耗从 -11.3 dB 降低到 -1.4 dB。

2015 年, Nikfalazar M 等人提出一种基于喷墨打印技术的 MIM 加载共面波导移相器拓扑结构<sup>[89]</sup>, 该方法通过喷墨打印技术可以制作不同厚度的 BST 厚膜, 通过光刻与喷墨技术相结合制作的 MIM 可调电容制作工艺简单, 所需偏压较低, 实验结果显示, 移相器的 1.2 μm BST 厚膜在 8.5 GHz, 25 V 的偏置电压下具有 32% 的调谐率, 在 50 V 的偏置电压下具有 46% 的调谐率, 同时该移相器在 7 到 8 GHz 的工作频率下实现 FOM 因子大于 40°/dB, 具有较好的移相效果。2016 年, 该课题组通过喷墨打印技术设计出基于 BST 厚膜的平面相控阵天线<sup>[90]</sup>, 测试结果显示器件可以实现 E 平面与 H 平面 ±25° 的连续扫描。

### 3.2.3 左手传输线加载共面波导

近年来, 随着左手材料的兴起, 移相器也出现了左手传输线结构。左手结构移相器由具有负折射率的超材料与传输线结构构成。具有负折射率的超材料单元由集总元件电容器件与电感器件组成。实验结果表明相比于传统的右手结构移相器, 左手结构移相器的尺寸大大减小<sup>[91]</sup>, 在工作频段相移量与所加直流偏压具有更好的线性变化关系<sup>[92]</sup>。同时左手结构移相器电容结构具有相对较低的介电损耗, 较低的漏电流与较快的开关转换速度<sup>[93]</sup>。

共面波导的前 3 种移相器结构均属于右手传输线, 在无耗的情况下, 传输线单元等效为并联电容  $CR\Delta z$  和串联电感  $LR\Delta z$ , 设  $Z$  为串联阻抗,  $Y$  为并联导纳, 则单位长度上方程为<sup>[94]</sup>:

$$\frac{dV(z)}{dz} = j\omega L_R I(z) = ZI(z) \quad (6)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = j\omega C_R V(z) = YV(z) \quad (7)$$

对于纯右手传输线中传播的 TEM 电磁波来说, 其麦克斯韦方程组横向纵向场满足以下关系式:

$$\frac{dE_y}{dz} = j\omega\mu H_x \quad (8)$$

$$\frac{dH_x}{dz} = j\omega\epsilon E_y \quad (9)$$

由  $E_y$  映射  $V$ ,  $H_x$  映射  $I$  为可知:

$$Z = j\omega\mu \Rightarrow \mu = \mu(\omega) = L_R \quad (10)$$

$$Y = j\omega\epsilon \Rightarrow \epsilon = \epsilon(\omega) = C_R \quad (11)$$

由上式可知,右手传输线的介电常数与磁导率均为正值。而左手传输线中的无耗模型将右手传输线串联电感与并联电容位置互换,导致该模型中介电常数与磁导率均为负值,这就是左手传输线的理论基础。左手传输线移相器与右手传输线移相器相比具有单位长度内移相量大的优点,许多课题组因此开展了相关结构的设计与理论的研究。

2006年瑞典查尔姆斯理工大学的Gevorgian Spartak课题组<sup>[95]</sup>首次提出左手传输线加载共面波导型移相器结构,通过周期性加载9个左手结构单元引入周期性的串联电容与并联电感。测试结果表明该移相器在20 GHz,20 V的直流偏压下可实现 $250^\circ$ 的相移量,在8.7 GHz到10.9 GHz实现FOM因子优于 $30^\circ/\text{dB}$ 。

2006年,德国达姆施塔特工业大学的Jakoby Rolf课题组<sup>[96]</sup>,通过在BST厚膜上设计加载3个左手单元结构的移相器结构,在2.8 GHz可实现FOM因子为 $29^\circ/\text{dB}$ ,工作频率相对带宽为10%。2010年该课题组<sup>[97]</sup>利用丝网印刷技术在 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 衬底上制作了一层BST厚膜并设计制作出一种长度为3 mm的左手传输线结构,通过加载直流偏压改变串联电容实现移相功能。测试结果表明该移相器工作在8到10 GHz可实现FOM因子为 $52^\circ/\text{dB}$ 。2011年,该课题组<sup>[98]</sup>在之前工作的基础上,设计出2种不同的耦合微带线型左手传输线结构。两种不同的移相器结构长度分别为2.1 mm与3.8 mm,在10 GHz可分别实现FOM因子为 $37^\circ/\text{dB}$ 和 $51^\circ/\text{dB}$ 。

### 3.2.4 反射电路加载共面波导

当在传输线终端设置开路或者短路时,信号会被全部反射回去。反射电路加载共面波导移相器<sup>[99-100]</sup>电路设计正是基于这一原理,由1个3 dB耦合器和2个完全一样的相位可控LC网络和偏压电路构成。耦合器将射频信号等幅分配给2个LC电路,两射频信号相位差 $90^\circ$ ,通过加载直流偏压改变LC终端反射信号实现不同的相移。反射电路加载共面波导移相器结构较传统共面波导移相器结构具有较小的纵向长度,同时较大多数移相器具有更小的回波损耗<sup>[99]</sup>。

2002年,韩国的Kim Dongsu<sup>[100]</sup>等人以共面波导结构为基础制成反射性移相器。该移相器中3 dB耦合器采用折叠型Lange耦合器结构,具有体积小、带宽宽等优点,铁电材料选择调谐率较高的 $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ ,同时通过MEMS工艺在金属传输线上架设高于 $30\ \mu\text{m}$ 的电桥连接地线抑制寄生模式,减少耦合效应。测试结果表明该移相器在2.5

GHz,160 V的直流偏压下可实现 $133^\circ$ 的相移,插入损耗约为 $-2.2\ \text{dB}$ ,回波损耗低于 $-19\ \text{dB}$ ,同时在1.87 GHz实现FOM因子为 $89^\circ/\text{dB}$ 。

## 4 结论与展望

移相器的性能优劣对于未来相控阵天线、单片雷达等多种电子与通讯系统的发展起着至关重要的作用。设计出满足其要求且与之匹配性能良好的实用型移相器是综合多个不同领域的共同研究课题。本文主要分析了不同类型移相器的工作原理与性能指标,对比研究得到不同类型移相器各自优缺点:铁氧体移相器能够承受较大功率,同时具有相对较宽的工作带宽与较大的相移量,但体积成本较大,难以实现小型化;PIN二极管移相器体积小、质量轻、开关速度快,但插入损耗较大,不适用于高频场合;MEMS移相器插入损耗小、工作频带宽,但同时存在生产成本高、工艺复杂等一系列问题;铁电移相器易于与硅基CMOS集成,但也存在铁电材料介质高频损耗较大等缺陷。

同时本文重点研究了BST铁电移相器的发展进程与微波电路设计。铁电移相器较其他类别移相器易于硅基CMOS集成,适应于未来电子与通讯系统的发展趋势。设计出更具实用化的铁电移相器需要立足于研究铁电材料的微波性能。研究材料的微观结构对介电性能的影响,探索铁电材料介电非线性的本质因素,降低介电损耗,提高介电常数调谐率与环境稳定性。同时优化块材、厚膜、薄膜的制作工艺,降低材料的制作成本。此外需要在优化铁电材料整体微波性能的同时,合理设计与之相匹配的移相器微波电路,不断将相关领域的最新研究成果融入到电路设计。深入研究微波电路对于移相器性能的影响,充分利用铁电材料调谐率、优化铁电材料的加电方式、降低加载电压大小,同时还需做好阻抗匹配,减少额外的功率损耗。

近年来,随着对等离激元原理及应用研究的深入,人们利用等离激元的低损耗、高束缚、可调控等特性逐渐进行微波功能器件等方面的研究。通过对亚波长结构的调控,崔铁军课题组利用表面等离激元实现对电磁波在特定频段进行有效控制,并制得功分器,滤波器,环形器等一系列微波无源功能器件<sup>[101-102]</sup>。通过将表面等离激元与铁电材料相结合,将表面等离激元传输线融入到铁电移相器的微波电路设计,调控亚波长金属结构,利用表面等离激元传输过程中低损耗,高束缚特性进行移相器研究,对于铁电移相器的发展具有一定的意义。

对于未来的测控系统<sup>[103-104]</sup>,大规模集成、超宽带、高频段、小型化必定是相控阵天线的发展趋势。目前来看,大多数移相器的工作频段较低,处于微波频段。如何将移相器工作频段由微波向毫米波乃至光波频段过渡是移相器设计的一个新的研究方向。与此同时进行移相器结构优化设计,使其满足性能指标要求的同时,又能与其他 T/R 组件以及天线辐射单元完成一体化设计是移相器的另一个新的研究方向,通过将基于表面等离激元的天线与传输线相结合是实现相控阵天线一体化设计的一条重要途径。为满足单片雷达发展的需求,考虑到电磁兼容,器件面积与制备工艺等多个方面,如何在硅基 CMOS 集成工艺的基础上进行移相器与天线的阵列化设计是需要解决的另一个问题。总体来说,几十年来移相器得到飞速发展,但对于未来仍有很长的道路等待着科研工作者的探索与思考。

#### 参考文献(References):

- [1] 张光义. 相控阵雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社,1994.  
ZHANG G Y. Phased Array Radar System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1994. (in Chinese)
- [2] FOWLER C A. Old Radar Types Never Die; They just Phased Array or...55 years of Trying to Avoid Mechanical Scan[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine,1998, 13(9): 24A-24L.
- [3] YOON H,VARADAN V K. Design and Performance of Bilateral Interdigital Coplanar Waveguide Phase Shifter for RF Communication Applications[J]. Journal of Microlithography Microfabrication and Microsystems,2004, 3: 459-466.
- [4] PARKER D, ZIMMERMANN D C. Phased arrays-part II: Implementations, Applications, and Future Trends[J]. IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques,2002, 50(3): 688-698.
- [5] 宁希. 硅基铁电薄膜太赫兹信号移相器研制[D]. 长沙:国防科学技术大学,2016.  
NING X. Research on Silicon Integrated Ferroelectric Thin Film Phase Shifters at Tera-hertz[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016. (in Chinese)
- [6] 高参. BST 厚膜应用与铁电移相器的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.  
GAO S. Study on BST Thick Film for Ferroelectric Phase Shifter[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2011. (in Chinese)
- [7] 雷强. BST 铁电薄膜移相器的设计与工艺研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.  
LEI Q. Study of Design and Process of BST Ferroelectric Films Based Phase Shifter[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [8] 李金阳. YIG 介质薄膜移相器的研制[D]. 成都:电子科技大学,2005.  
LI J Y. Development of YIG Dielectric Thin Film Phase Shifter [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2005. (in Chinese)
- [9] 田锦昌,武向辉,史崇德,等. 相控阵雷达铁氧体移相器设计[J]. 舰船电子对抗,2006,29(2):16-18.  
TIAN J C WU X H, SHI C D, et al. Design of Ferrite Phase Shifter Utilized in Phased Array Radar [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2006, 29(2):16-18. (in Chinese)
- [10] LAX B, BUTTON K J, ROTH L M. Ferrite Phase Shifters in Rectangular Wave Guide[J]. Journal of Applied Physics,1954, 25(11): 1413-1421.
- [11] YEO K S K,LANCASTER M J. High Temperature Superconducting Ferrite Phase Shifter with New Latching Structure [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001,11(1): 430-433.
- [12] SHEIKH S I M, GOBSON A A P, BASORRAH M, et al. Analog/Digital Ferrite Phase Shifter for Phased Array Antennas [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2010, 9: 319-321.
- [13] 邓广健,黄文华,巴涛,等. 高功率铁氧体移相器的设计与实验研究[J]. 现代应用物理,2016, 7(3): 12-17.  
DENG G J, HUANG W H, BA T, et al. Design and Experiment of a High Ferrite Phase Shifter[J]. Modern Applied Physics, 2016, 7(3): 12-17. (in Chinese)
- [14] POLDER D. On the Theory of Ferromagnetic Resonance[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1949, 40: 100-115.
- [15] 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.
- [16] CLAVIN A. Reciprocal Ferrite Phase shifters in Rectangular Waveguide [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,1958, 6(3): 334.
- [17] 李士根. 铁氧体移相器[J] 磁性材料与器件,1987,7: 30-35.  
LI S G. Ferrite Phase Shifter[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 1987, 7: 30-35. (in Chinese)
- [18] 黄小洋. Ka 波段非互易铁氧体移相器研制[D]. 成都:电子科技大学,2013.  
HUANG X Y. The Development of Ka Band Nonreciprocal Ferrite Phase Shifter[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,

2013. (in Chinese)
- [19] 温俊鼎. 背脊波导锁式铁氧体移相器的实验研究[J]. 电子学报, 1979, 7(3): 44-51.  
WEN J D. Experimental Studies of Latching Ferrite Phase Shifter of Back-Rigid [J]. Acta Electronica Sinica, 1979, 7(3): 44-51. (in Chinese)
- [20] BOYD C R. A Dual-Mode Latching Reciprocal Ferrite Phase Shifter[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1970, 18(12): 1119-1124.
- [21] 罗会安. 宽带圆极化铁氧体移相器[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.  
LUO H A. Wide-Band Circular Polarization Ferrite Phase Shifter [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [22] 杨朝霞. 相位可调可编程数字移相器的设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2016(6): 205-207.  
YANG C X. Design of Phase Adjustable Programmable Digital Phase Shifter[J]. Automation & Instrumentation, 2016(6): 205-207. (in Chinese)
- [23] 宋焯曦. Ka波段五位数字移相器的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.  
SONG Y X. Study on Ka Band Five Digit Phase Shifter[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)
- [24] WANG L, SUN P, YOU Y, et al. Highly Linear Ku-Band SiGe PIN Diode Phase Shifter in Standard SiGe BiCMOS Process [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2010, 20(1): 37-39.
- [25] GU L M, CHE W Q, LIU D T. Design Investigation of a Compact Broadband Reflection-type PIN Phase Shifter[C] //2011 International Workshop on Antenna Technology (IWAT). Hong Kong, China: [s. n.], 2011: 328-331.
- [26] MONDAL J P, MILNES A G, OAKES J G, et al. Phase Shifts in Single and Dual-Gate GaAs MESFET's for 2-4 GHz Quadrature Phase Shifters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1984, 32(10): 1280-1288.
- [27] NAGRA A S, XU J, ERKER E, et al. Monolithic GaAs Phase Shifter Circuit with Low Insertion and Continuous 0-360° Phase Shift at 20 GHz[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1999, 9(1): 31-33.
- [28] 杜亦佳. RF MEMS 移相器和太赫兹波导滤波器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.  
DU Y J. Studies on RF MEMS Phase Shifters and Terahertz Waveguide Filters [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
- [29] 卿健, 石艳玲, 赖宗声, 等. MEMS 移相器及其在微型通信系统中的应用[J]. 微电子学, 2002, 32(4): 241-244.  
QING J, SHI Y L, LAI Z S, et al. MEMS Phase Shifter and Its Application in Mini-Communication Systems[J]. Microelectronics, 2002, 32(4): 241-244. (in Chinese)
- [30] TETI JOSEPH G, DARREFF FRANCIS P. MEMS 2 Bit Phase-Shifter Failure Mode and Reliability Considerations for Large X-Band Arrays[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(2): 693-701.
- [31] BARKER S, REBEIZ G M. Distributed MEMS True-Time Delay Phase Shifters and Wide-Band Switches[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1998, 46(11): 1881-1890.
- [32] BARKER N S, REBEIZ G M. Optimizaton of Distributed MEMS Phase Shifters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(11): 1957-1966.
- [33] PONCHEL F, LEGIER J F, SOYER C, et al. Rigorous Extraction Tunability of Si-Integrated Ba<sub>0.3</sub> Sr<sub>0.7</sub> TiO<sub>3</sub> Thin Film up to 60 GHz[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(25): 1-3.
- [34] 李炜. 硅基微波 MEMS 移相器的优化设计与性能分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2004.  
LI W. Design and Analysis of Performance of Microwave MEMS Phase Shifter on Silicon Substrate. [D]. Shanghai: East China Normal University, 2004. (in Chinese)
- [35] LAMPEN J, MAJUMDER S, JI C, et al. Low-Loss, MEMS Based, Broadband Phase shifters[C] //2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Waltham, MA, USA: IEEE, 2010: 219-224.
- [36] 惠春, 徐爱兰, 高顺华. 一种用于相控阵天线的新型钛酸锶钡电光相移器[J]. 西安电子科技大学学报, 1998, 26(4): 514-519.  
HUI C, XU A L, GAO S H, et al. A Novel BSTO Electro-Optic Phase Shifters for Phase Array Antennas[J]. Journal of Xidian University, 1998, 26(4): 514-519. (in Chinese)
- [37] SHEN J G, WU G L, ZOU W W, et al. Frequency Transfer Over Optical Fiber Based on Photonic RF Phase Shifter[C] //2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC). Prague, Czech Republic: [s. n.], 2013: 314-316.
- [38] DE FLAVIIS F, ALEXOPOULOS N G, STAFSUDD O M. Planar Microwave Integrated Phase-Shifter Design with High Purity Ferroelectric Material[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45(6): 963-969.
- [39] VAN KEULS F W, MUELLER C H, MIRANDA F

- A, et al. Room Temperature Thin Film  $Ba_xSr_xTiO_3$  Ku-Band Coupled Microstrip Phase Shifters; Effects of Film Thickness, Doping, Annealing and Substrate Choice [C]//Microwave Symposium Digest (Cat no 99CH36282). Anaheim, CA, USA: [s. n], 1999: 737-740.
- [40] RYU H C, MOON S E, LEE S J, et al. Design of a Ka-Band Coupled Microstrip Line Ferroelectric Phase Shifters[J]. *Integrated Ferroelectrics*, 2005, 77(1): 129-137.
- [41] YNGVESSON S Y. *Microwave Semiconductor Devices* [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [42] POZAR DAVID M. *Microwave Engineering* (Third Edition) [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015: 445.
- [43] 薛正辉. *微波技术与微波电路* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002, 262-311.
- XUE Z H. *Microwave Technology and Microwave Circuits* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [44] TESHIBA M, VAN LEEUWEN R, SAKAMOTO G, et al. A SiGe MMIC 6-Bit PIN Diode Phase Shifter[J]. *IEEE Microwave And Wireless Components Letters*, 2002, 12(12): 500-501.
- [45] CHAKRABORTY A, GUPTA B. Paradigm Phase Shift [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2017, 17 : 22-41.
- [46] PETERSEN K E. Micromechanical Membrane Switches on Silicon[J]. *IBM Journal of Research and Development*, 1979, 23(4): 376-385.
- [47] ERKER E G, NAGRA A S, LIU Y, et al. Monolithic Ka-Band Phase Shifter Using Voltage Tunable  $BaSrTiO_3$  Parallel Plate Capacitors[J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 2000, 10(1): 10-12.
- [48] 丑修建, 翟继卫, 姚熹. 钛酸钡基铁电材料的介电非线性研究[J]. *硅酸盐学报*, 2007, 35(S1): 22-29.
- CHOU X J, ZHAI J W, YAO X. Research on Dielectric Non-Linearity of  $BaTiO_3$ -Based Ferroelectric Materials[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2007, 35(S1): 22-29. (in Chinese)
- [49] CHIU L H, ZHANG X, SENGUPTA L. Electronically Tunable Ceramic Materials Including Tunable Dielectric and Metal Silicate Phases: US6514895 [P]. 2003-02-04.
- [50] AASPERS C, UNDERHILL E, ZHANG X. Dielectric Composite Materials Including an Electrically Tunable Dielectric Phase and a Calcium and Oxygen-containing Compound Phase: US6960546 [P]. 2005-11-01.
- [51] SOMIYA Y, BHALLA A S, CROSS L E. Study of (Sr, Pb)  $TiO_3$  Ceramics on Dielectric and Physical Properties[J]. *International Journal of Inorganic Materials*, 2001, 3(7): 709-714.
- [52] WEN X W, FENG C D, CHEN L D, et al. Dielectric Tunability and Imprint Effect in  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $PbTiO_3$  Ceramics [J]. *Ceramics International*, 2007, 33(5): 815-819.
- [53] ANG C, BHALLA A S, GUO R Y, et al. Effect of dc Bias on Dielectric Properties of  $Cd_2Nb_2O_7$  Ceramics [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 90(5): 2465-2468.
- [54] VENDIK O G, TER-MARTIROSYAN L T, ZUBKO S P. Microwave Losses in Incipient Ferroelectrics as Functions of the Temperature and the Biasing Field [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 84(2): 993-998.
- [55] 陈宏伟. *铁电薄膜材料及在介电移相器中的应用研究* [D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- CHEN H W. *Ferroelectric Thin Films Materials and Application for Dielectric Phase Shifters* [D]. Chengdu: University of Electric Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)
- [56] SENGUPTA L C, NGO E, STOWELL S, et al. Investigation of the Electronic Properties of Doped  $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$  Phase Shifting Materials [J]. *Ferroelectrics*, 1994, 153(1): 359-364.
- [57] WANG G A, POLLEY T, HUNT A, et al. A High Performance Tunable RF MEMS Switch Using Barium Strontium Titanate (BST) Dielectrics for Reconfigurable Antennas and Phased Arrays [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2005, 4: 217-220.
- [58] 余慧春, 徐爱兰, 惠春. BST 薄膜铁电移相器研究进展 [J]. *电子元件与材料*, 2005, 24(3): 59-62.
- YU H C, XU A L XI C, et al. Research Progress on Ferroelectric Phase Shifters Using BST Thin Films [J]. *Electronic Components and Materials*, 2005, 24(3): 59-62. (in Chinese)
- [59] 金宇龙, 周洪庆, 吴洪忠, 等. 钛酸锶钡 (BST) 铁电移相器材料的研究现状 [J]. *电子元件与材料*, 2003, 22(2): 38-40.
- JIN Y L ZHOU H Q, WU H Z, et al. Status of Study on BST-Based Phase Shifter Materials [J]. *Electronic Components and Materials*, 2003, 22(2): 38-40. (in Chinese)
- [60] JOSHI P C, RAMANTHAN S, DESU S B, et al. Characterization of  $Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$  Thin Films with Mg Additive Fabricated by Metalorganic Decomposition Technique [J]. *Integrated Ferroelectrics*, 1998, 19(1/2/3/4): 141-148.
- [61] LIM M H, KIM H S, KIM N Y, et al. Frequency and Voltage Dependent Dielectric Properties of Ni-Doped  $Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$  Thin Films [J]. *Journal of Electroceramics*, 2004, 13(1/2/3): 239-243.

- [62] 张五星,薛丽红,邹雪城,等.流延法制备钛酸锶钡厚膜[J].压电与声光,2006,28(3):314-316.  
ZHANG W X,XUE L H,ZHOU X C,et al. Fabrication of BST Thick Film by Tape Casting Method[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics,2006,28(3):314-316. (in Chinese)
- [63] SENGUPTA L, SENGUPTA S. Novel Ferroelectric Materials for Phased Array Antennas [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1997, 44(4): 792-797.
- [64] MOON S E, KIM E K, KWAK M H, et al. Orientation Dependent Microwave Dielectric Properties of Ferroelectric  $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$  Thin Films[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(11): 2166-2168.
- [65] HORWITZ J S, CHANG W, KIM W, et al. The Effect of Stress on the Microwave Dielectric Properties of  $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$  Thin Films[J]. Journal of Electroceramics, 2000, 4(2/3): 357-363.
- [66] FANG T H, CHANG W J, LIN C M, et al. Effect of Annealing on The Structural and Mechanical Properties of  $Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO_3$  Thin Films[J]. Materials Science and Engineering,2006, 426(1/2): 157-161.
- [67] KIM I D, TULLER H L, KIM H S, et al. High Tunability( $Ba,Sr$ ) $TiO_3$  Thin Films Grown on Atomic Layer Deposited  $TiO_2$  and  $Ta_2O_5$  Buffer Layers[J]. Applied Physics Letters,2004, 85(20): 4705-4707.
- [68] YAMADA T, MURALT P, SHERMAN V O, et al. Epitaxial Growth of  $Ba_{0.3}Sr_{0.7}TiO_3$  Thin Films on  $Al_2O_3(0001)$  Using Ultrathin  $TiN$  Layer as a Sacrificial template[J]. Applied Physics Letters,2007, 90(14): 1429111-3.
- [69] ZHU W C, CHENG J R, YU S W, et al. Enhanced Tunable Properties of  $Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$  Thin Films Grown on Pt Ti  $SiO_2$  Si Substrates Using MgO Buffer Layers[J]. Applied Physics Letters,2007, 90(3): 0329071-3.
- [70] KIM K T, KIM C I. Structure and Dielectric Properties of Bi-Doped  $Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$  Thin Films Fabricated by Sol-Gel Method[J]. Microelectronic Engineering, 2003, 66(1/2/3/4): 835-841.
- [71] 何岗,李肖萌.组分梯度铁电薄膜的研究进展[J].功能材料,2012,20(43):2742-2750.  
HE G, LI X M. Review of the Researches of Compositionally Graded Ferroelectric Thin Films[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(20): 2742-2746,2750. (in Chinese)
- [72] ZHONG S, ALPAY S P, COLE M W, et al. Highly Tunable and Temperature Insensitive Multilayer Barium Strontium Titanate Films [J]. Applied Physics Letters,2007, 90(9): 0929011-3.
- [73] RAO J B L, PATEL D P, KRICHEVSKY V. Voltage-Controlled Ferroelectric Lens Phased Arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(3):458-468.
- [74] ZIMMERMANN F, VOIGTS M, WEIL C, et al. Investigation of Barium Strontium Titanate Thick Films for Tunable Phase Shifters[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2001, 21(10/11): 2019-2023.
- [75] YOON H, VINOY K J, ABRAHAM J K, et al. CPW Phase Shifter Using Strontium Titanate Thin Film on Silicon Substrate[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Digest, Held in Conjunction with: USNC/CNC/URSI North American Radio Sci Meeting (Cat no.03CH37450). Columbus, OH, USA:[s. n.], 2003: 970-972.
- [76] SUHERMANN P H, JACKSON T J, KOUTSONAS Y, et al. On-Wafer Microwave Characterization of Ferroelectric Thin Film Phase Shifters[C]//2004 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (IEEE Cat No. 04CH37535). Fort Worth, TX, USA:[s. n.], 2004: 265-268.
- [77] KIM W, ISKANDER M F, TANAKA C. High-Performance Low-Cost Phase-Shifter Design Based on Ferroelectric Materials Technology [J]. Electronics Letters,2004, 40(21): 1345-1347.
- [78] KIM K B, YUN T S, KIM H S, et al. Coplanar Ferroelectric Phase Shifter on Silicon Substrate with  $TiO_2$  Buffer Layer[C] //2005 European Microwave Conference. Paris, France:[s. n.], 2005,1:134-137.
- [79] EVANS R J, FARRELL P, FELIC G, et al. Consumer Rader: Opportunities And Challenges [C]//2014 11th European Radar Conference. Rome, Italy [s. n.], 2014: 5-8.
- [80] ACIKEL B, TAYLOR T R, HANSEN P J, et al. A New High Performance Phase Shifter using  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  Thin Films[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2002, 12(7):237-239.
- [81] MENG Q D, ZHANG X Q, LI F, et al. An Impedance Matched Phase Shifter Using  $BaSrTiO_3$  Thin Film[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2006, 16(6): 345-347.
- [82] VELU G, BLARY K, BURGNIES L, et al. A  $360^\circ$  BST Phase Shifter with Moderate Bias Voltage at 30 GHz[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2007, 55(2): 438-444.
- [83] SHENG S, WANG P, CHEN X, et al. Two Parallel  $Ba_{0.25}Sr_{0.75}TiO_3$  Ferroelectric Varactors Series Connected Coplanar Waveguide Microwave Phase Shifter[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 10(11): 1145091-3.
- [84] SHENG S, ONG C K. Distributed Transmission Line Phase Shifter Using Parallel-Plate Ferroelectric Thin Film Varactors [J]. Microelectronic Engineer-

- ing,2010,87: 1932-1934.
- [85] HE W, YANG C, CHEN H, et al. Effects of Fringing Capacitor on Ferroelectric Phase Shifter[J]. Electronics Letters,2010, 46(6) : 426.
- [86] DE PAOLIS R, COCETTI F, PAYAN S, et al. Characterization of Ferroelectric BST MIM Capacitors up to 65 GHz for a Compact Phase Shifter at 60 GHz [C]//2014 44th European Microwave Conference, 2014. Rome, Italy:[s. n.], 2014: 492-495.
- [87] KOHLER C, NIKFALAZAR M, FRIEDERICH A, et al. Fully Screen-Printed Tunable Microwave Components Based on Optimized Barium Strontium Titanate Thick Films[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology,2015, 12: E96-E105.
- [88] RYU H C, MOON S E, LEE S J. Loaded-Line Ferroelectric Phase Shifter Based on Mn-doped(Ba, Sr) TiO<sub>3</sub> Thin Films for Ka-band Systems[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2015, 66 ( 7 ): 1097-1100.
- [89] NIKFALAZAR M, MEHMOOD A, SOHRABI M, et al. Low Bias Voltage Tunable Phase Shifter Based on Inkjet-Printed BST MIM Varactors for C/X-Band Phased Arrays[C]//2015 10th European Microwave Integrated Circuits Conference ( EuMIC ). Paris, France:[s. n. ], 2015: 413-416.
- [90] NIKFALAZAR M, SAZEGAR M, MEHMOOD A, et al. Two-Dimensional Beam Steering Phased Array Antenna with Compact Tunable Phase Shifter Based on BST Thick-Films[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2017, 16: 585-588.
- [91] ANTONIADES M A, ELEFThERIADES G V. Compact Linear Lead/Lag Metamaterial Phase Shifters for Broadband Applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2003, 2: 103-106.
- [92] KIM H, KOZYREV A B, KARBASSI A, et al. Linear Tunable Phase Shifter Using Left-Handed Transmission Line[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2005,15(5) : 366-368.
- [93] VOROBIEV A, RUNDQVIST P, KHAMCHANE K, et al. Silicon Substrate Integrated High Q-Factor Parallel-Plate Ferroelectric Varactors for Microwave/Millimeterwave Applications[J]. Applied Physics Letters,2003, 83(15): 3144-3146.
- [94] 蔚亮. 基于混合左右手传输线及铁电材料的可调移相器研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.  
WEI L. Research of Tunable Phase Shifter Based on Composite Right/Left-Handed Transmission Line and Ferroelectric Materials[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2011. (in Chinese)
- [95] KUYLENSTIERNA D, ASH E, VOROBIEV A, et al. X-Band Left Handed Shifter Using Thin Film Ba<sub>0.25</sub> Sr<sub>0.75</sub> TiO<sub>3</sub> Ferroelectric Varactors [C]//2006 European Microwave Conference. Manchester, UK; [s. n. ], 2006: 847-850.
- [96] GIÈRE A, DAMM C, SCHEELE P, et al. LH Phase Shifter Using Ferroelectric Varactors [C]//2006 IEEE Radio and Wireless Symposium. San Diego, CA, USA; IEEE, 2006: 403-406.
- [97] SAZEGAR M, ZHENG Y L, MAUNE H, et al. Compact Artificial Line Phase Shifter on Ferroelectric Thick-Film Ceramics[C]//2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Anaheim, CA, USA;IEEE, 2010: 860-863.
- [98] SAZEGAR M, ZHENG Y L, MAUNE H, et al. Compact Tunable Phase Shifters on Screen-Printed BST for Balanced Phased Arrays[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2011,59 (12): 3331-3337.
- [99] KIM D, CHOI Y, ALLEN M G, et al. A Wide-Band Reflection-Type Phase Shifter at S-Band Using BST Coated Substrate[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50 ( 12 ): 2903-2909.
- [100] KIM D, CHOI Y, ALLEN M G, et al. A Wide Bandwidth Monolithic BST Reflection-Type Phase Shifter Using A Coplanar Waveguide Lange Coupler [C]//2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat No. 02CH37278). Seattle, WA, USA; IEEE, 2002: 1471-1474.
- [101] 汤文轩,张浩驰,崔铁军,等. 人工表面等离激元及其在微波频段的应用[J]. 电子与信息学报,2017, 39 (1): 231-239.  
TANG W X, ZHANG H C, CUI T J, et al. Spoof Surface Plasmon Polariton and Its Applications to Microwave Frequencies[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39 (1): 231-239. (in Chinese)
- [102] CUI T J. Microwave Metamaterials: From Passive to Digital and Programmable Controls of Electromagnetic Waves[J]. Journal of Optics,2017, 19(8): 084004.
- [103] 何庆强,何海丹,张云,等. 测控通信系统中的天线新技术[J]. 微波学报,2010,26(5):87-92.  
HE Q Q, HE H D, ZHANG Y, et al. New Antenna Technology in TT and Communication System[J]. Journal of Microwaves,2010,26(5):87-92. (in Chinese)
- [104] 何庆强,姚明,任志刚,等. 结构功能一体化相控阵天线高密度集成设计方法[J]. 电子元件与材料,2015, 34(5): 61-65.  
HE Q Q, YAO M, REN Z G, et al. High Density Integrated Design of the Incorporate Phased Array Antenna Combining with Structure And Function[J]. Electronic Components and Materials, 2015, 34 ( 5 ): 61-65. (in Chinese)