

• 四川大学建校 130 周年特刊约稿 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202600637



本刊网刊

环行器集成技术:自偏置与无磁技术综述

张 韬¹, 江栋一¹, 陈朝晖^{2*}

(1. 中国电子科技集团公司第五十五研究所, 江苏 南京 210001; 2. 东南大学 集成电路学院, 江苏 南京 214135)

摘 要: 环行器是雷达与通信系统中实现非互易传输的核心器件, 其小型化与平面化集成是微波器件领域的重要研究方向。本文系统综述了自偏置环行器与无磁环行器两条技术路线。自偏置环行器利用六角铁氧体的高磁晶各向异性场替代外部永磁体, 通过离子取代调控磁晶各向异性场和铁磁共振频率, 使材料体系覆盖 X~W 波段应用需求, 其制备依赖于磁场取向成型与高温烧结工艺, 以实现高剩磁比和低微波损耗; 低温共烧陶瓷与半导体衬底键合技术为该器件的系统集成提供了可行路径。无磁环行器基于时空调制合成角动量偏置原理, 通过对耦合谐振器施加相位差调制打破时间反演对称性, 无需磁性材料且可采用标准的互补金属-氧化物-半导体(CMOS)工艺实现单片集成; 差分拓扑与 N 路架构的演进有效抑制了交调产物并改善了插入损耗。上述两类环行器各有适用场景, 自偏置环行器在毫米波频段和功率容量方面具有优势, 无磁环行器在工艺兼容性和片上集成度方面展现出潜力。两类环行器的发展有望为收发组件的完全平面化与系统级集成提供新的解决思路。未来, 材料与工艺协同优化、宽带高线性化电路设计及先进封装三维集成将成为环行器集成化技术的重要发展方向。

关键词: 环行器; 自偏置; 无磁环行器; 六角铁氧体; 时空调制; 集成技术

中图分类号: TN62

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2026)05-0373-12

环行器是一种三端口非互易微波器件, 其功能在于使电磁信号在端口间沿确定方向顺序传输, 反向则实现隔离。该器件在有源相控阵雷达的发射/接收组件中承担收发通道隔离的关键角色, 同时也是无线通信系统射频(RF)前端实现同频全双工的核心元件。随着相控阵雷达向高密度集成、轻量化方向发展, 以及第五代移动通信系统对射频前端小型化的迫切需求, 环行器的平面化与片上集成已成为微波器件领域的重要研究方向^[1-2]。

传统环行器的工作原理依赖于铁氧体材料的旋磁特性^[3-4]。铁氧体(包括尖晶石、石榴石和六角铁氧体共 3 类)是具有高电阻率的磁性氧化物, 在微波频段因磁导率呈现张量形式而具备非互易性^[5-6]。当铁氧体被外加磁场饱和磁化后, 其内部磁矩发生进动, 圆极化电磁波与进动磁矩的耦合具有方向依赖性, 据此可实现环行功能。然而, 传统铁氧体环行器的集成化面临多重障碍。首先, 铁氧体需由外部永磁体(通常为钕铁硼和钐钴磁体)提供偏置场以维持饱和磁化状态, 永

磁体的体积与质量在器件中占比显著, 限制了进一步小型化^[6]。其次, 永磁体的存在使环行器呈现三维拓扑结构, 难以与平面化的半导体工艺兼容。此外, 高品质铁氧体薄膜的制备通常需在高于 700~900 °C 的富氧环境中进行, 而硅、砷化镓等半导体衬底在该温度区间内难以保持稳定, 这一问题在早期 DARPA 集成计划中已被充分认识^[7]。

为突破上述瓶颈, 近年来研究者主要沿两条技术路线开展了环行器集成化研究。第 1 条路线, 以材料创新为核心, 致力于开发无需外部偏置磁场的自偏置铁氧体材料。其物理基础在于利用六角铁氧体的高磁晶各向异性场替代外加偏置场, 使材料在零场条件下仍保持足够的剩磁以维持非互易性能^[8-9]。M 型钡铁氧体($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 即 BaM)及其掺杂体系因具有约 17.5 kOe (约 $1.39 \times 10^6 \text{ A/m}$) 的各向异性场和 30~50 GHz 范围内的零场铁磁共振频率, 成为自偏置环行器的首选材料^[10-11]。通过 Sc、In 等离子体的取代可降低, 适用于 C~Ka 波段; 而 Al、Ga 取代则能提高各向异性场, 频率可扩展

收稿日期: 2026-07-13 修回日期: 2026-08-16 网络出版日期: 2026-08-20

作者简介: 张 韬(1995—), 男, 工程师。研究方向: 微波射频电路器件与集成化。E-mail: zhangtao_952024@163.com

* 通信作者: 陈朝晖, 教授, E-mail: chenchaohui@seu.edu.cn

至 W 波段及以上^[12-13]。在制备工艺方面,丝网印刷结合磁场取向烧结^[14-15]、聚合物网络辅助取向工艺^[16]、脉冲激光沉积(PLD)^[17-18]及液相外延^[19-20]等方法已被用于制备具有高结晶取向度和低微波损耗的自偏置铁氧体厚膜与块材^[21]。该路线的核心优势在于沿用了铁氧体非互易的物理机制,以材料内禀属性替代外部磁体,为环行器的平面化提供了物理基础^[22-24]。

第 2 条路线则从电路架构层面绕开对磁性材料的依赖,即无磁环行器。其物理基础是利用线性周期时变电路打破时间反演对称性。具体而言,通过对 3 个耦合谐振器施加具有 120°相位差的时变调制信号,可在电路中合成有效的角动量偏置,从而像磁偏置一样打破正反向传输模式的简并性^[25-27]。Estep 等^[28]通过耦合谐振器环路进行了实验验证,随后 Kord 等发展了基于带阻滤波器 Δ 拓扑的环行器设计,实现了优于 3 dB 的插入损耗与超过 50 dB 的隔离度^[29-30],并进一步提出并发展了差分结构与 CMOS 实现方案^[31-33]。与此同时,Reiskarimian^[34]和 Kord^[35]等基于 N 路径滤波器的交错换向原理实现了 CMOS 无磁环行器。该路线的核心优势在于其与标准 CMOS 工艺的兼容性,为实现环行器与有源电路的单片集成提供了可行路径。

上述两条技术路线代表了环行器集成化研究的两个不同方向,前者立足于磁性材料的本征物理特性与加工工艺,后者依托于时变电路的拓扑设计与半导体集成。两者在物理机制、实现方式、性能特征与集成路径上各有差异。本文旨在系统梳理近年来两条技术路线的研究进展,重点分析自偏置环行器在铁氧体制备、晶粒取向调控与微波损耗控制方面的关键技术,以及无磁环行器在角动量偏置理论、电路拓扑演进与 CMOS 集成方面的最新突破,在此基础上,比较两条路线的优势与局限,并探讨未来可能的技术融合方向。

1 环行器的基本功能与工作原理

环行器作为微波系统中实现非互易传输的核心器件,其基本功能与应用场景、非互易性的物理实现方式及性能评价指标构成了理解后续自偏置与无磁环行器技术的基础。在介绍环行器基本功能的基础上,分别阐述了基于铁氧体材料的磁偏置非互易原理、基于时空调制的角动量偏置原理,对比分析了两种实现方式。

1.1 环行器的基本功能与应用场景

环行器是一种三端口非互易微波器件。理想情况下,从端口 1 输入的信号仅传输至端口 2,从端口 2 输入的信号仅传输至端口 3,从端口 3 输入的信号仅传输至端口 1,反向路径则处于隔离状态。其散射参数矩阵 S 可表示为:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

即散射参数 $S_{21}=S_{32}=S_{13}=1$,而其余散射参数为 0。实际环行器的性能由插入损耗、隔离度、回波损耗和带宽等指标表征。

环行器的单向传输特性使其在微波系统中承担着不可替代的功能。在有源相控阵雷达的发射/接收(T/R)组件中,环行器连接高功率放大器与低噪声放大器至共用天线端口,实现发射与接收通道的隔离。发射模式下,高功率信号由端口 1 进入环行器,经端口 2 传输至天线;接收模式下,天线接收到的微弱回波信号由端口 2 进入环行器,经端口 3 传输至低噪声放大器。环行器在此同时保护了高功率放大器免受天线反射信号的损害。

图 1 为 T/R 组件中环行器应用的简化框图^[29],展示了环行器在高功率放大器与低噪声放大器之间的连接关系,及其在发射与接收模式下的信号流向。发射模式下,高功率信号经环行器导向天线;接收模式下,天线接收信号经环行器导向低噪声放大器。

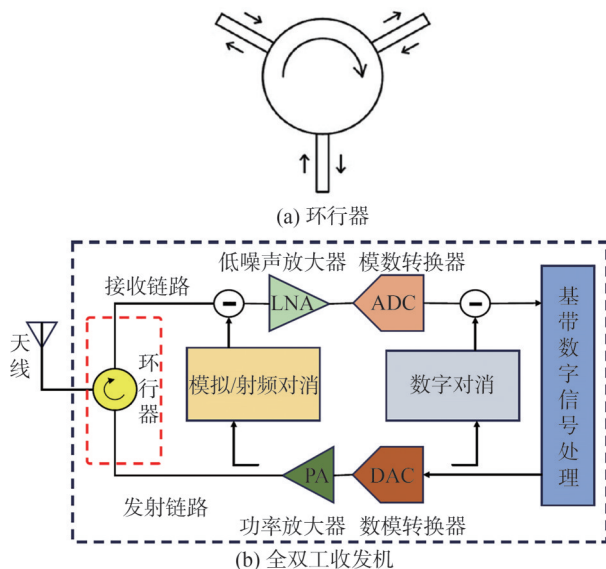


图 1 环行器及其在全双工射频收发机中的应用^[29]

Fig. 1 Circulator and its application in full-duplex RF transceiver^[29]

在全双工通信系统中,环行器使收发双工成为可能,允许发射机与接收机共用同一副天线并在相同频率上同时工作。该应用对环行器的隔离度提出了极高要求,即典型全双工系统需要超过 100 dB 的自干扰消除,其中,环行器提供前端的 20~30 dB 隔离。此外,环行器还广泛应用于微波测量系统中的定向耦合、信号源隔离、功率分配网络等场景。

1.2 非互易性的集成化实现方式

非互易性的实现需要打破时间反演对称性。根据 Onsager-Casimir 原理,线性系统的互易性要求表征系

统响应的参数在时间反演下保持对称,因此,必须引入对时间反演呈奇对称的物理量,包括磁场、电流、线动量和角动量。在环行器的集成化研究中,主要存在两种实现方式:基于六角铁氧体内禀各向异性的自偏置方案、基于时空调制合成角动量的无磁方案。

1.2.1 自偏置环行器的物理原理

传统铁氧体环行器的非互易性来源于旋磁材料在外部偏置磁场作用下的法拉第效应。当微波磁场在铁氧体中传播时,左旋和右旋圆极化波具有不同的传播常数,从而产生非互易相位差,实现环行功能。

自偏置环行器利用六角铁氧体的高磁晶各向异性场 H_a 替代外部永磁体。六角铁氧体具有六角晶系结构,其易磁化轴沿 c 轴方向,磁晶各向异性场可达 17.5 kOe (BaM 材料,约为 1.39×10^6 A/m),该数值较尖晶石铁氧体高 1~2 个数量级。在剩磁状态下,材料内部的磁化强度沿易轴方向排列,等效于存在一个内部偏置场,使材料呈现旋磁特性。

剩磁状态对有效偏置场和非互易性能具有重要影响。从退磁场理论来看,剩磁磁化强度 M_r 通过退磁场影响有效内场 H_{eff} 大小,即:

$$H_{\text{eff}} = H_a - N_d \cdot M_r \quad (2)$$

式中, N_d 为退磁因子。有效内场直接决定了铁磁共振频率,进而影响环行器的工作频段。此外,剩磁比 M_r/M_s (其中, M_s 为饱和磁化强度)反映了晶粒磁化矢量的取向一致程度。高剩磁比意味着磁矩进动相位一致性好,铁磁共振线宽窄,微波损耗低,非互易性能优异。因此,获得高剩磁比是自偏置铁氧体材料的关键指标之一。

BaM ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) 是最典型的 M 型六角铁氧体,其自然共振频率在 30~50 GHz 范围,通过离子取代可以调控磁晶各向异性场和铁磁共振频率,使材料体系覆盖 X~W 波段应用需求。

1.2.2 角动量偏置无磁环行器的物理原理

角动量偏置无磁环行器从电路架构层面绕开对磁性材料的依赖。其物理基础是利用线性周期时变电路合成有效的角动量偏置,从而在不引入真实磁场的条件下打破时间反演对称性,即可在无需磁性材料的情况下实现非互易性^[26-27]。

时空调制产生非互易性的物理机理可以用合成角动量偏置的概念来解释^[26]。对于 N 个耦合谐振器组成的环形结构,当每个谐振器的谐振角频率是周期性调制,且调制信号在空间上依次具有 $2\pi/N$ 的相位差时,系统等效于受到一个合成的角动量偏置作用,从而打破时间反演对称性,实现非互易传输。这一概念已被 Sounas 等^[26]的实验研究所证实。

具体实现方案如下:将 3 个相同的谐振器按环形

拓扑连接,并对每个谐振器的谐振角频率施加随时间变化的调制信号^[27-28]:

$$\omega_n(t) = \omega_0 + \delta\omega_m \cos(\omega_m t + \phi_n) \quad (3)$$

式中: $\omega_n(t)$ 为第 n 个谐振器瞬时角频率, $n=1,2,3$; t 为时间; ϕ_n 为第 n 个谐振器的相位, $\phi_n=0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$; ω_0 为静态谐振角频率; $\delta\omega_m$ 为调制幅度; ω_m 为调制角频率。该调制方案等效于赋予电路一个沿特定方向旋转的角动量偏置,即相位沿顺时针方向依次增加 120° ,即等效于顺时针方向的角动量注入。

在无调制状态下,3 个谐振器的顺时针与逆时针旋转模式是简并的,谐振角频率均为 $\omega_0 + \kappa\omega_0$ (其中, κ 为谐振器间耦合系数),电路呈互易响应。施加调制后,简并解除,两种旋转模式的频率发生分裂,分裂量 $\Delta\omega$ 的表达式为^[27-28]:

$$\Delta\omega = \sqrt{\omega_m^2 + \delta\omega_m^2} - \omega_m \quad (4)$$

在满足特定匹配条件时,从一个端口入射的信号将完全传输至下一端口,而第 3 个端口处于隔离状态,从而实现环行器功能。该方案的核心优势在于其无需任何磁性材料。电路完全由集总或分布参数元件构成,可采用标准 CMOS 工艺实现单片集成。然而,其工作原理伴随固有的交调产物 ($\omega_{\text{rf}} \pm \omega_m$, 其中, ω_{rf} 为射频输入的信号角频率),需要通过差分架构或滤波器加以抑制。目前,该方案主要工作在微波频段,插入损耗较传统铁氧体环行器偏高,但集成度方面的优势使其在射频前端小型化应用中具有显著潜力。

2 自偏置环行器

自偏置环行器的核心目标是消除传统铁氧体环行器对外部永磁体的依赖。第 1 节已指出,传统环行器通过外加磁场使铁氧体磁矩定向排列,从而产生非互易性。若能使铁氧体材料在无外加磁场条件下自发保持定向磁化状态,即可省去偏置磁体。该目标依赖六角铁氧体独特的磁学性质,即高的磁晶各向异性能与高的剩磁比。

2.1 自偏置的物理基础

自偏置环行器的实现依赖于六角铁氧体的两个关键磁学特性:高的磁晶各向异性场和高的剩磁比。磁晶各向异性来源于自旋-轨道耦合与晶体场的协同作用。在 M 型六角铁氧体中, Ba^{2+} 大阳离子破坏了晶体的局部对称性,产生了强的单轴各向异性,即磁化矢量沿 c 轴方向时能量最低,偏离 c 轴需克服高的能垒。室温下 BaM 的磁晶各向异性场约为 17.5 kOe (约为 1.39×10^6 A/m),较尖晶石铁氧体高出 1~2 个数量级。高的各向异性场使 BaM 的零场铁磁共振频率 30~50 GHz,为其在微

波与毫米波波段的自偏置应用提供了物理基础。

铁磁共振频率由有效内场决定。在自偏置状态下(外加偏置场为0),共振频率主要由各向异性场与材料的剩磁决定。因此,自偏置环行器的可行性取决于两个条件:一是,各向异性场需提供足够的等效偏置场,使零场共振频率覆盖目标工作频段;二是,材料需具有高的剩磁比(M_r/M_s ,即方形度),通常要求超过90%。高剩磁比意味着绝大多数晶粒的磁化矢量在零场下仍沿 c 轴排列,宏观磁化接近饱和状态。

图2为M型六角铁氧体的晶体结构示意图^[6]。

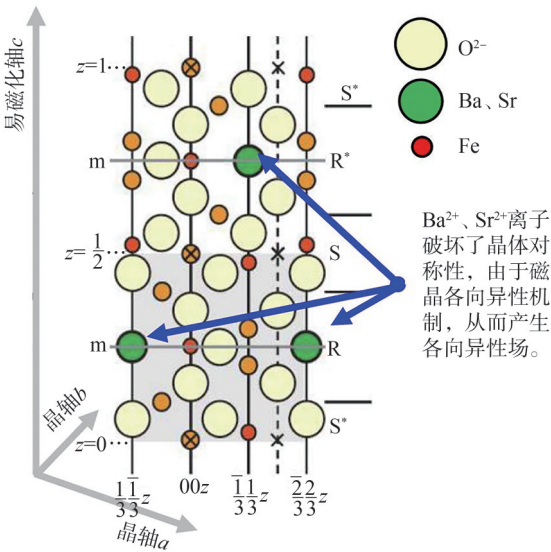


图2 M型六角铁氧体晶体结构示意图^[6]

Fig. 2 Schematic diagram of M-type hexaferrite crystal structure^[6]

图2中, z 为 c 轴方向的分数坐标, m 为镜像对称面, S 为尖晶石块, R 为六方块, $*$ 为对应块沿 c 轴旋转 180° 的镜像结构块。 S, R 块沿 c 轴交替堆叠, R 块中的 Ba^{2+} 离

子破坏了晶体对称性,是产生高各向异性的结构根源。

高的剩磁比需要通过制备具有高度 c 轴织构的材料来实现,即在磁场中取向成型使晶粒的 c 轴沿同一方向排列,磁晶各向异性将磁化矢量约束于 c 轴方向,从而在去除外场后保持高的剩磁状态。若晶粒 c 轴在空间随机分布,宏观磁化将相互抵消;若所有晶粒 c 轴沿同一方向排列,宏观剩磁接近单晶水平。因此,织构度直接决定了自偏置性能的优劣。

2.2 六角铁氧体材料体系

六角铁氧体是同时具备高各向异性场和高剩磁比潜力的材料体系。在各类六角铁氧体中,M型钡铁氧体($BaFe_{12}O_{19}$,即BaM)及其锶替代衍生物($SrFe_{12}O_{19}$,即SrM)因具有适中的饱和磁化强度、高的磁晶各向异性场和良好的化学稳定性,被公认为自偏置环行器的首选材料。M型六角铁氧体的组成灵活性为其性能调控提供了广阔空间。研究表明, Al^{3+} 或 Ga^{3+} 取代 Fe^{3+} 可以提高各向异性场,将工作频率扩展至W波段及以上; Sc^{3+} 或 In^{3+} 取代则可降低各向异性场,使材料适用于C~Ka波段^[6,12]。Co-Ti共取代可在保持 c 轴磁各向异性的同时降低各向异性场。近期,W型六角铁氧体因具有较高的各向异性场和较低的微波损耗,也被视为自偏置环行器的候选材料。

不同频率波段对材料性能的要求各异。图3为铁氧体材料工作频段分布,同时展示了不同铁氧体体系在频率谱上的覆盖范围。尖晶石和石榴石因缺乏强磁晶各向异性,主要工作在较低频段;六角铁氧体则通过离子取代可在X~W波段的宽广频率范围内灵活选择。M型六角铁氧体在这一体系中覆盖范围最广,从X波段延伸至W波段,体现了其在不同频段自偏置应用中的适应能力。

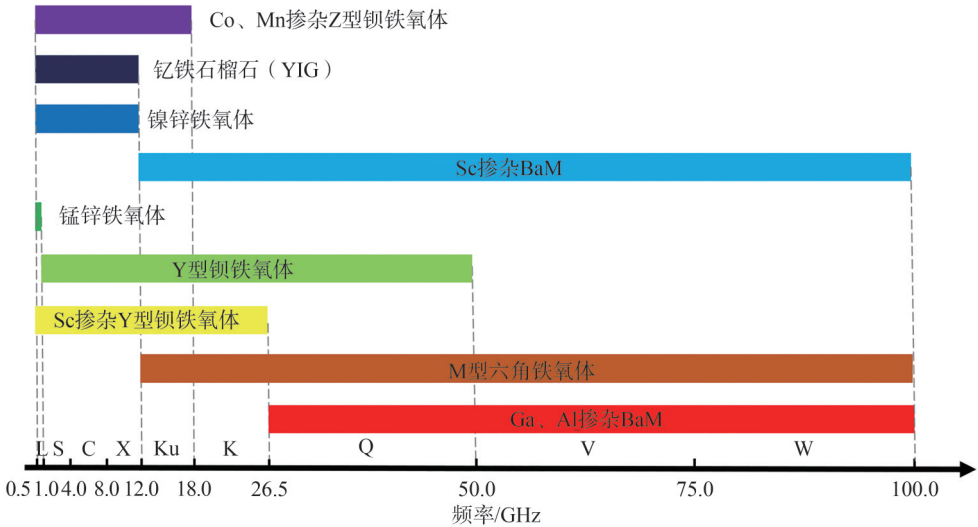


图3 铁氧体材料工作频段分布

Fig. 3 Operating frequency range of ferrite materials

2.3 自偏置铁氧体的制备工艺

自偏置铁氧体材料的制备需同时实现高的结晶取向度、高的密度和低的微波损耗,三者之间存在微妙的平衡关系。图4为自偏置铁氧体块材的制备工艺流程^[6],图4中,VSM为振动样品磁强计,FMR为铁磁共振。该流程包括原料称量与混合、预烧、粉碎与球磨、磁场取向成型、烧结等关键步骤。磁场取向成型是获得 c 轴织构的核心环节,即将粒径约为 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 的单畴颗粒与粘结剂混合后,在强磁场中压制成型,使颗粒的 c 轴沿磁场方向排列。该粒径范围处于单畴磁性颗粒尺寸范围内,使颗粒能够对取向磁场产生强响应。

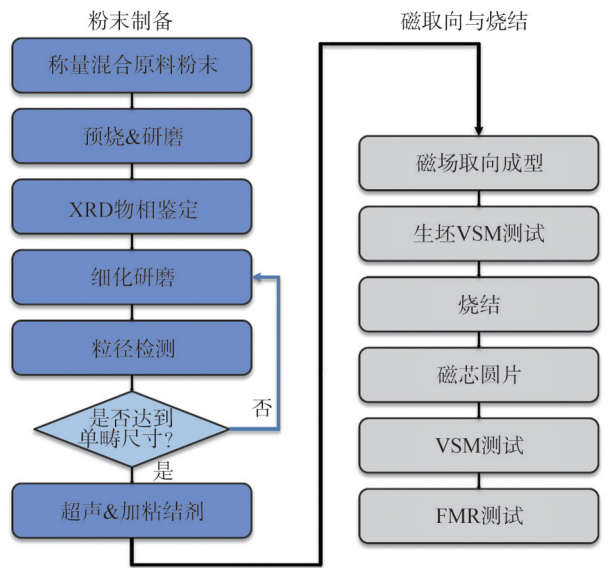


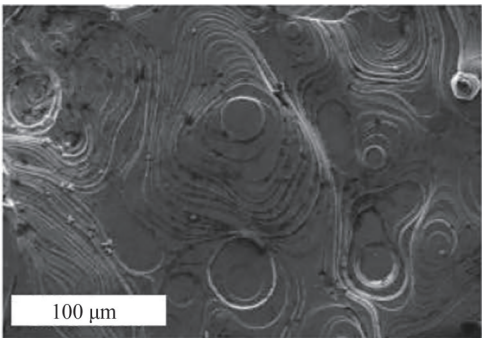
图4 自偏置铁氧体块材制备工艺流程^[6]
Fig. 4 Preparation process of self-biased ferrite bulk material^[6]

烧结过程需在 $1\ 100\sim 1\ 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的氧气气氛中进行,以获得约90%~95%的理论密度。氧气气氛有助于减少 Fe^{2+} 的浓度,从而降低材料的导电损耗。

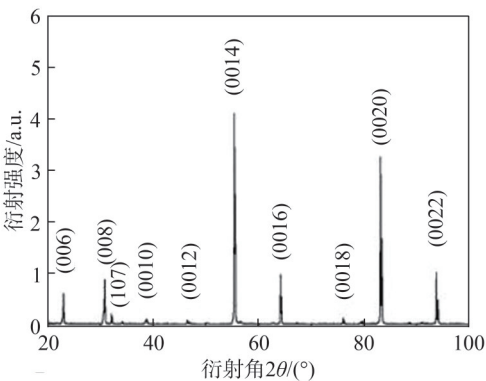
研究表明,自偏置铁氧体制备中存在一个核心矛盾:当密度接近理论值时,晶界减少导致畴壁钉扎中心减少,矫顽力急剧下降,剩磁比随之降低;而保持约90%的密度时,孔隙有效钉扎畴壁,矫顽力与剩磁比得以保持,但孔隙又会导致铁磁共振线宽展宽。高温烧结过程中,密度与磁性之间存在复杂的权衡关系。一方面,较高的密度有利于提高剩磁比和降低微波损耗;另一方面,孔隙和晶界缺陷可以作为畴壁钉扎中心,对提高矫顽力有一定作用。根据磁学中的畴壁钉扎理论,晶界、孔隙、第二相等缺陷会对畴壁运动产生钉扎作用,从而提高材料的矫顽力。钉扎场的强弱与缺陷的磁矩不连续性、缺陷尺寸和密度等因素有关。当烧结密度过高时,孔隙减少、晶粒长大,钉扎作用减弱,矫顽力可能

下降;同时,晶粒尺寸超过单畴临界尺寸后,多畴结构的形成也会导致剩磁比降低。因此,在实际制备中,需要在密度、剩磁比和矫顽力之间进行优化权衡。

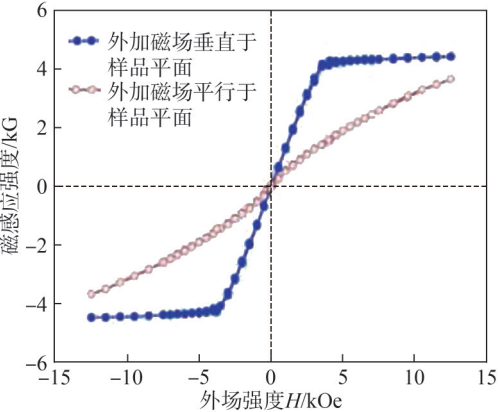
图5为一款准单晶M型六角铁氧体的微观结构与磁性能表征^[6]。图5(a)为表面SEM图像,可见晶粒呈六角片状且取向一致。图5(b)为XRD图谱,可见强的 $(00n)$ 衍射峰,表明 c 轴高度垂直于样品表面。图5(c)为磁滞回线,可见:蓝线(外加磁场垂直于样品平面)与红线(外加磁场平行于样品平面)之间存在巨大差异,反映了强的单轴各向异性;并且,蓝线的高方形度(大于90%)表明该材料具备自偏置所需的磁化状态。



(a) SEM图像



(b) XRD图谱



(c) 磁滞回线

图5 准单晶M型六角铁氧体的SEM图像、XRD图谱与磁滞回线^[6]

Fig. 5 SEM image, XRD pattern and hysteresis loop of quasi-single-crystal M-type hexaferrite^[6]

2.4 系统集成与挑战

自偏置环行器的系统集成主要沿两条路径开展：基于低温共烧陶瓷(LTCC)的多层模块集成、基于半导体衬底的混合集成。

在 LTCC 集成方面,研究者已探索了 3 种主要方案:一是,将预先烧结的六角铁氧体块材嵌入 LTCC 生带预留空腔中;二是,将铁氧体浆料丝网印刷在 LTCC 生带层上并共烧;三是,将磁场取向的铁氧体流延生带与 LTCC 生带叠压共烧。Sc 取代的 M 型六角铁氧体在约 30 GHz 处具有铁磁共振频率,可以被确认为 Ka 波段 LTCC 自偏置环行器的理想材料。在半导体集成方面,如图 6 所示,Cui 等^[36]通过将基于 FeNi 的磁性纳米线复合材料(MNC)嵌入 100 μm 厚的 SiC 衬底中,与 Qorvo 的 GaN MMIC 技术实现了单片集成;该集成微带环行器的环行中心频率为 5.7 GHz,插入损耗为 2.7 dB,隔离度为 14 dB^[36]。

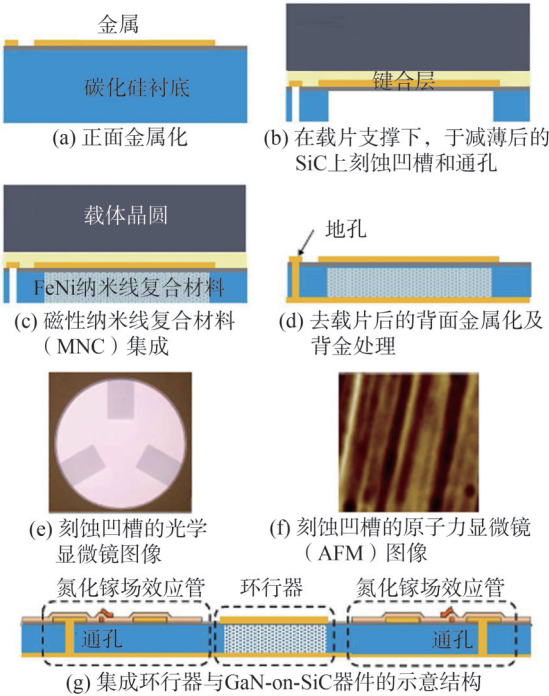


图6 环行器工艺流程示意图(未按比例绘制)^[36]
Fig. 6 Schematic diagram of circulator process flow (not to scale)^[36]

图 7 展示了微电子所研究团队利用低温热压键合技术实现取向 M 型厚铁氧体薄膜与 SiC 衬底的高质量集成。基于该技术的小型化自偏置环行器在 35 GHz 下实现了 1.2 dB 插入损耗和 2.5 GHz 带宽,器件尺寸仅 3.0 mm×2.8 mm^[37]。

图 8 为东南大学与美国东北大学团队研制的自偏置环行器产品照片(<http://www.mtmgx.com/products-overview/circulators/>)。这些产品展示自偏置环行器从实验室研究向商业化应用的转化现状。目前,自偏

置环行器已由 Metamagnetics Inc. 等公司商业化供应,其工作频率覆盖 Ku 波段以上。

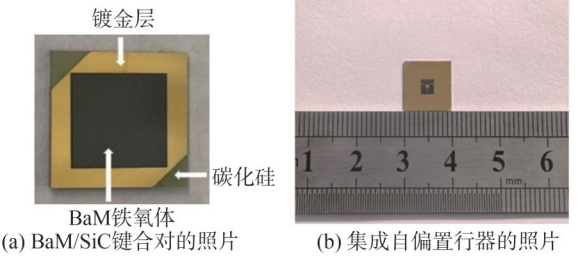


图7 自偏置环行器与SiC衬底键合集成^[37]
Fig. 7 Bonding integration of self-biased circulator with SiC substrate^[37]

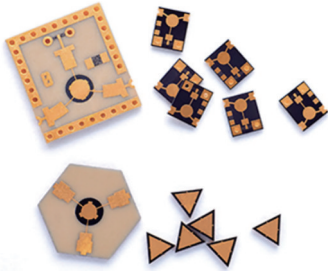


图8 研制的自偏置环行器产品
Fig. 8 Developed self-biased circulator products

当前自偏置环行器面临的核心挑战包括:铁磁共振线宽(200~500 Oe,即约 $1.59\times10^4\sim3.98\times10^4$ A/m),与单晶 YIG(小于 1 Oe,约为 79.58 A/m)相比仍偏高,限制了插入损耗的进一步降低;材料剩磁随温度变化较为显著,导致工作频率漂移;铁氧体高温制备工艺(大于 900 °C)与半导体前端工艺之间的热预算矛盾,仍是实现完全单片集成的主要障碍。尽管如此,随着低温键合技术、LTCC 工艺优化及宽禁带半导体平台上铁氧体集成技术的持续进步,自偏置环行器在下一代雷达与通信系统 T/R 组件中的应用将日益广泛。

3 无磁环行器

无磁环行器从电路架构层面避开对磁性材料的依赖,其物理基础是利用线性周期时变电路合成有效的角动量偏置。无需磁性材料是无磁环行器区别于自偏置环行器的核心特征,即既不需要铁氧体,也不需要永磁体。

3.1 无磁环行器的电路拓扑

3.1.1 耦合谐振器环路拓扑

角动量偏置概念的首次电路实现基于耦合谐振器环路拓扑。该方案将 3 个 LC 谐振器通过耦合电容连接成环形,对各谐振器的电容施加具有 120°相位差的时变调制信号来合成角动量偏置。图 9 为角动量时空调制的物理概念示意图^[27],图 9 中, S_k^{inc} 、 S_k^{ref} 分别为端口 n ($k=1,2,3$) 的入射波、反射波。针对耦合谐振器环路拓扑,实验验证了角动量偏置的可行性,其具有超过 50

dB的隔离度^[28]。然而,该方案存在若干局限:为实现低插入损耗需要调制频率远离射频频率,导致电路工作在非最优区域;同时,调制信号与射频信号的分离需要复杂的滤波网络。

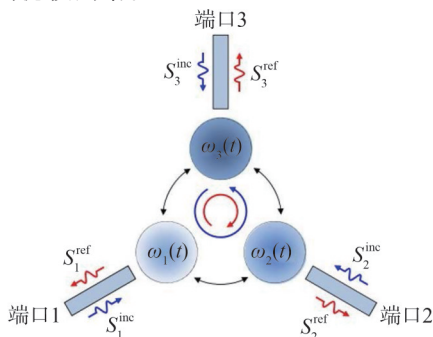


图9 角动量时空调制的物理概念示意图^[27]

Fig. 9 Schematic diagram of the physical concept for spatiotemporal modulation of angular momentum^[27]

3.1.2 带阻滤波器单端拓扑

无磁环形器最基本的实现形式为单端拓扑。将3个串联或并联LC谐振器按环路或Y型方式连接,构成对称的三端口谐振网络,并对各谐振器的瞬时振荡频率施加具有120°相位差的时空调制。该调制方案在顺时针方向合成有效的角动量偏置,即各调制信号的相位沿顺时针方向依次递增120°,从而打破旋转模式的简并性,使顺时针与逆时针模式分别振荡于不同频率。当输入信号位于这两个分裂频率的中间时,两个模式被等幅激发但相位相反,在满足特定条件下即可实现理想环行。

单端拓扑存在4种基本组合方式:带通/Y型、带阻/Y型、带阻/Δ型、带通/Δ型^[33,35],如图10所示。

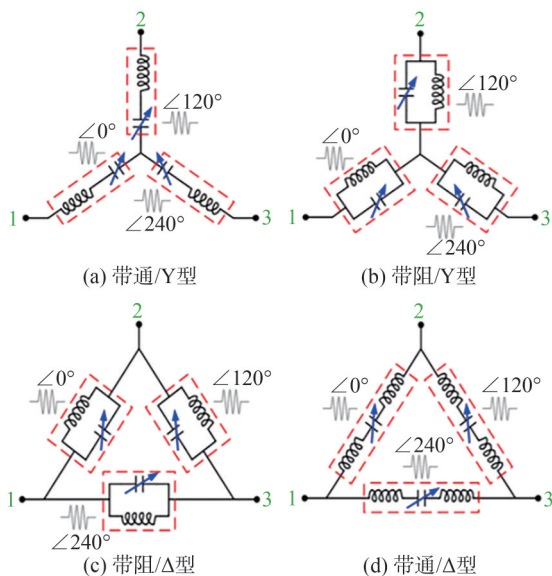


图10 单端拓扑^[35]

Fig. 10 Single-ended topology^[35]

图10中,带阻/Δ拓扑在1 GHz中心频率下实现了

插入损耗3.3 dB、隔离度55 dB、回波损耗10.8 dB的性能,瞬时带宽为2.4%(24 MHz)。通过改变变容二极管的直流偏置,该电路可在60 MHz范围内实现频率重构。实测1 dB压缩点和20 dB压缩点均为29 dBm,输入三阶截点为33.8 dBm,噪声系数为4.5 dB^[29]。单端拓扑的一个固有问题在于交调产物的干扰。这些产物源于射频信号与调制信号的混频,不仅对相邻信道造成干扰,还从射频信号中抽取功率,限制了插入损耗的进一步降低。

3.1.3 差分拓扑

为抑制交调产物,研究者提出了差分架构,该架构将两个单端环形器以180°调制相位差组合^[33]:

$$f_{n,\pm} = f_0 \pm \Delta f \cos(2\pi f_m t + 2\pi(n-1)/3) \quad (5)$$

式中, $f_{n,+}$ 和 $f_{n,-}$ 为两个组成单端电路的调制信号, Δf 为调制深度, f_m 为调制频率, n 为谐振器序号。拓扑方式分为差分拓扑模式和 N 路架构拓扑模式^[35],如图11所示。在差分拓扑电压模配置中,两个单端带阻/Δ电路组合后,经去嵌入处理之后的巴伦,实现了插入损耗0.8 dB、回波损耗23 dB、隔离度24 dB的性能,瞬时带宽2.3%(23 MHz)。差分架构在保持角动量偏置优势的同时,显著改善了插入损耗与杂散发射^[30]。

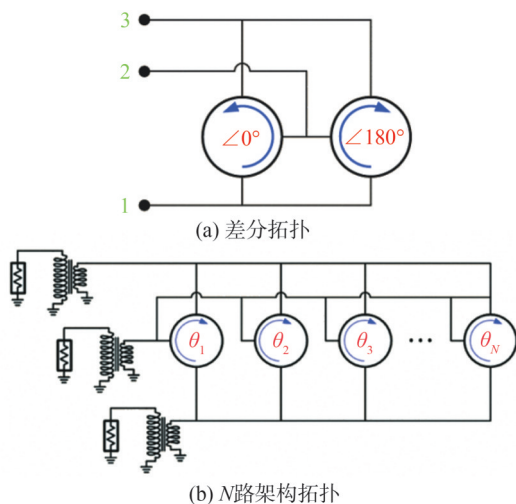


图11 不同拓扑方式^[35]

Fig. 11 Different topologies^[35]

3.1.4 N路架构拓扑

当电路中存在非线性、相位同步误差及各元件间的随机失配等非理想因素时,差分拓扑的杂散发射仍可能较强。为此,研究者将差分结构推广至 N 路架构^[35],将 N 个单元电路并联或串联连接,每个单元电路提供的相位调制为 θ_n ($n=1, 2, \dots, N$),如图11(b)所示。调制方案扩展为^[33]:

$$f_{ni} = f_0 + \Delta f \cos\left(2\pi f_m t + \frac{2\pi(n-1)}{3} + \frac{2\pi(i-1)}{N}\right) \quad (6)$$

式中, i 为单元序号。该方案可更有效地消除非整数倍的杂散分量。 N 路架构的另一个优势在于功率处理能力的提升, 即输入功率被分配至 N 个单元, 功率容量相应增大 N 倍。然而, 性能的提升是以尺寸和功耗的增加为代价^[35]。

3.2 集成实现

首款 CMOS 无磁环行器采用 180 nm 工艺, 将带通/Y 型拓扑改造为与 CMOS 兼容的电流模架构^[32]。调制电容采用开关电容替代变容二极管, 即开关电容可获得更大的调制指数, 缓解调制指数与品质因数之间的折中, 并允许使用易于片上生成的数字时钟。该芯片在 910 MHz 中心频率下实现了回波损耗 12 dB、插入损耗 4.9 dB、隔离度 60 dB 的性能, 输入三阶截点为 6 dBm (受限于静电放电 (ESD) 保护电路), 噪声系数为 5.2 dB, 其芯片及测试板照片如图 12(a)、(b) 所示, 芯片有源面积仅 0.2 mm^2 ^[32]。该 CMOS 实现虽显著减小了尺寸, 但片上电感占用较大的硅面积且品质因数较低。微机电系统 (MEMS) 谐振器具有极高的串联谐振品质因数, 可模拟串联 LC 谐振器的响应且尺寸更小。首款 MEMS 无磁环行器在 2.5 GHz 下实现了回波损耗 15 dB、插入损耗 4 dB、隔离度 30 dB 的性能^[38], 其芯片及测试板照片如图 12(c)、(d) 所示。该 MEMS 实现的显著优势在于调制频率可大幅降低, 其设计中的调制频率仅为 40 MHz (相对带宽为 1.6%), 功耗仅为 $150\text{ }\mu\text{W}$ 。但该优势以窄带为代价, 带宽仅 18 MHz (相对带宽为 0.72%)。

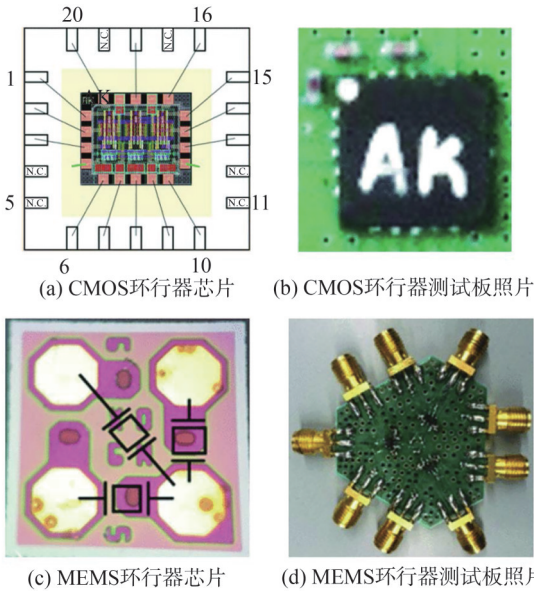


图 12 无磁环行器芯片及测试板照片^[32,38]
Fig. 12 Chip and test board photos of nonmagnetic circulators^[32,38]

3.3 无磁环行器的性能特征与技术挑战

表 1 对不同拓扑无磁环行器的性能进行了对比。表 1 中, PCB 为印制电路板。无磁环行器在插入损

耗、隔离度等关键指标上与传统铁氧体环行器相比仍有差距, 但在集成度和工艺兼容性方面具有明显优势。

表 1 不同拓扑无磁环行器性能对比
Tab. 1 Performance comparison of nonmagnetic circulators with different topologies

拓扑类型	插入损耗/dB	隔离度/dB	相对带宽/%	功率容量	工艺
耦合谐振器环路	2~3	>20	≈5	低	PCB/CMOS
带阻/ Δ 单端	3~4	>25	≈3	低	CMOS
差分拓扑	3~5	>30	≈5	中	CMOS
N 路架构	4~6	>35	≈5	中高	CMOS
CMOS 电流模	2~3	>20	≈10	中	CMOS
MEMS	1~2	>30	≈1	高	MEMS

无磁环行器在实用化过程中面临 3 项核心技术挑战: 1) 交调产物抑制, 单端拓扑中最大交调产物仅比基波低 11 dBc, 差分拓扑可抑制至 -30 dBc, N 路架构可达 -62 dBc, 但后两者均以尺寸和功耗增加为代价; 2) 瞬时带宽受限, 一阶 LC 谐振器在 10%~20% 调制频率下带宽仅 3%~4%, 端口匹配滤波方案可将带宽扩展至 14%, 但高阶滤波器引入的附加损耗会抬升插入损耗; 3) 集成工艺兼容性, CMOS 实现受限于片上电感品质因数低 ($Q\approx 10\sim 20$) 及 ESD 寄生效应, MEMS 实现虽功耗仅为 $150\text{ }\mu\text{W}$, 但带宽仅为 0.72%。上述挑战源于元件工艺水平而非原理本身极限, 随元件品质提升和拓扑优化, 无磁环行器有望逐步缩小与传统磁环行器的性能差距。

4 环行器技术对比

表 2 综合对比了传统铁氧体环行器、自偏置环行器和无磁环行器的综合性能。

表 2 3 类环行器综合性能比较
Tab. 2 Comprehensive performance comparison of three types of circulators

性能指标	传统铁氧体环行器	自偏置环行器	无磁环行器
工作频段	L~W	X~W	特高频 UHF~Ka
插入损耗/dB	0.2~0.5	0.5~1.5	2.0~5.0
隔离度/dB	>30	>25	>20
功率容量	高	中高	低~中
尺寸/体积	大	中	小
工艺兼容性	差	一般	好
集成度	低	中	高
成本	中	较高	低(批量)
适用场景	高性能系统	毫米波/小型化	CMOS 集成/消费电子

由表2可见:传统环行器因较大的体积和工艺兼容性,难以满足未来小型化和集成化的需求;环行器集成化、平面化的两条技术路线呈现了不同的场景,自偏置环行器在毫米波频段和功率容量方面具有优势,无磁环行器在工艺兼容性和片上集成度方面展现出潜力。

5 结论与展望

本文系统综述了自偏置环行器与无磁环行器两条技术路线的研究进展。自偏置环行器利用六角铁氧体的高磁晶各向异性场替代外部永磁体,通过离子取代可在微波至毫米波宽频段内调控工作频率,丝网印刷、磁场取向烧结及液相外延等制备工艺已可实现具有高剩磁比和可接受微波损耗的自偏置铁氧体材料,LTCC集成与半导体衬底键合技术则展示了其向工程应用转化的可行路径。

无磁环行器基于时空调制合成角动量偏置原理,通过对3个耦合谐振器施加 120° 相位差的调制信号打破时间反演对称性,其电路拓扑从单端、差分到 N 路架构的持续演进,逐步改善了插入损耗与杂散抑制性能,CMOS与MEMS实现则分别验证了与标准半导体工艺兼容的集成化方案。

未来环行器集成化技术的发展可能会呈现以下趋势:

1)材料与工艺协同优化。通过新材料体系的开发和制备工艺的改进,自偏置环行器的插入损耗有望进一步降低至1 dB以下,工作频率向太赫兹频段拓展。

2)无磁环行器向宽带化、高线性和低功耗方向发展。拓扑结构和电路设计的创新,有望将相对带宽提升至10%以上,同时,进一步降低功耗,满足5G/6G通信系统的需求。

3)系统集成技术不断进步。先进的封装集成技术、三维集成技术的发展,将推动环行器与其他射频前端器件的深度集成,实现更高集成度和更小体积的射频前端模块。

4)新物理机制和新材料体系的探索。拓扑绝缘体、磁电耦合材料、超表面等新兴领域的研究,有望为环行器技术带来革命性突破,推动微波器件向更高集成度、更低功耗、更优性能的方向发展。

参考文献:

- [1] Harris V G, Geiler A, Chen Yajie, et al. Recent advances in processing and applications of microwave ferrites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2009, 321(14): 2035–2047.
- [2] Adam J D, Davis L E, Dionne G F, et al. Ferrite devices and materials[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 721–737.
- [3] Polder D. VIII. On the theory of ferromagnetic resonance[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1949, 40(300): 99–115.
- [4] Kittel C. On the theory of ferromagnetic resonance absorption[J]. Physical Review, 1948, 73(2): 155–161.
- [5] Snoek J L. Magnetic and electrical properties of the binary systems $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ [J]. Physica, 1936, 3(6): 463–483.
- [6] Harris V G, Sokolov A S. The self-biased circulator: Ferrite materials design and process considerations[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2019, 32(1): 97–108.
- [7] Chen Z, Harris V G. Ferrite film growth on semiconductor substrates towards microwave and millimeter wave integrated circuits[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112(8): 081101.
- [8] Smit J, Wijn H P J. Ferrites[M]. New York: Wiley, 1959.
- [9] Went J J, Rathenau G W, Gorter E W, et al. Hexagonal iron-oxide compounds as permanent-magnet materials[J]. Physical Review, 1952, 86(3): 424–425.
- [10] Smit J, Beljers H G. Ferromagnetic resonance absorption in $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, a highly anisotropic crystal[J]. Philips Research Reports, 1955, 10: 113–130.
- [11] Perekalina T M, Cheparin V P. Ferrimagnetism of Hexagonal Ferrites[J]. Soviet Physics(Solid State), 1968, 9: 2524–2526.
- [12] Albanese G, Deriu A. Magnetic properties of Al, Ga, Sc, in substituted barium ferrites: A comparative analysis[J]. Ceramurgia International, 1979, 5(1): 3–10.
- [13] Van Uitert L G, Swanekamp F W. Permanent magnet oxides containing divalent metal ions. II [J]. Journal of Applied Physics, 1957, 28(4): 482–486.
- [14] Chen Yajie, Sakai T, Chen Taiyang, et al. Screen printed thick self-biased, low-loss, barium hexaferrite films by hot-press sintering[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(4): 043907.
- [15] Chen Yajie, Geiler A L, Sakai T, et al. Microwave and magnetic properties of self-biased barium hexaferrite screen printed thick films[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 99(8): 08M904.
- [16] Chen Yajie, Nedorosick M J, Geiler A L, et al. Perpendicularly oriented polycrystalline $\text{BaFe}_{11.1}\text{Sc}_{0.9}\text{O}_{19}$ hexaferrite with narrow FMR linewidths[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2008, 91(9): 2952–2956.
- [17] Song Y Y, Kalarickal S, Patton C E. Optimized pulsed laser deposited barium ferrite thin films with narrow ferromagnetic resonance linewidths[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94(8): 5103–5108.
- [18] Chen Z, Yang A, Yoon S D, et al. Growth of Ba-hexaferrite films on single crystal 6-H SiC[J]. Journal of Magnetism

- and Magnetic Materials,2006,301(1):166–170.
- [19] Yoon S D, Vittoria C. Microwave and magnetic properties of barium hexaferrite films having the c -axis in the film plane by liquid phase epitaxy technique[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(10):8597–8599.
- [20] Chen Z, Yang A, Mahalingam K, et al. Structure, magnetic, and microwave properties of thick Ba-hexaferrite films epitaxially grown on GaN/Al₂O₃ substrates[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(24):242502.
- [21] Glass H L. Ferrite films for microwave and millimeter-wave devices[J]. Proceedings of the IEEE, 1988, 76(2):151–158.
- [22] Oliver S A, Shi P, McGruer N E, et al. Integrated self-biased hexaferrite microstrip circulators for millimeter-wavelength applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(2):385–387.
- [23] Akaiwa Y, Okazaki T. An application of a hexagonal ferrite to a millimeter-wave Y circulator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1974, 10(2):374–378.
- [24] Weiss J A, Watson N G, Dionne G F. New uniaxial-ferrite millimeter-wave junction circulators[C]//1989 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Long Beach: IEEE, 1989:145–148.
- [25] Chen Zhan, Zhou Chunxia, Wu Wen. Magnetless microstrip circulators based on differential spatiotemporal modulation of resonators[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2022, 32(3):e23010.
- [26] Sounas D L, Caloz C, Alù A. Giant non-reciprocity at the sub-wavelength scale using angular momentum-biased metamaterials[J]. Nature Communications, 2013, 4:2407.
- [27] Estep N A, Sounas D L, Alù A. Magnetless microwave circulators based on spatiotemporally modulated rings of coupled resonators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(2):502–518.
- [28] Estep N A, Sounas D L, Soric J, et al. Magnetic-free non-reciprocity and isolation based on parametrically modulated coupled-resonator loops[J]. Nature Physics, 2014, 10(12):923–927.
- [29] Kord A, Sounas D L, Alù A. Magnet-less circulators based on spatiotemporal modulation of bandstop filters in a delta topology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(2):911–926.
- [30] Kord A, Sounas D L, Alù A. Pseudo-linear time-invariant magnetless circulators based on differential spatiotemporal modulation of resonant junctions[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(6):2731–2745.
- [31] Kord A, Sounas D L, Alù A. Achieving full-duplex communication: Magnetless parametric circulators for full-duplex communication systems[J]. IEEE Microwave Magazine, 2018, 19(1):84–90.
- [32] Kord A, Tymchenko M, Sounas D L, et al. CMOS integrated magnetless circulators based on spatiotemporal modulation angular-momentum biasing[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(7):2649–2662.
- [33] Kord A, Alù A. Magnetless circulators based on synthetic angular-momentum bias: Recent advances and applications[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2021, 63(6):51–61.
- [34] Reiskarimian N, Krishnaswamy H. Magnetic-free non-reciprocity based on staggered commutation[J]. Nature Communications, 2016, 7:11217.
- [35] Kord A, Krishnaswamy H, Alù A. Magnetless circulators with harmonic rejection based on N -way cyclic-symmetric time-varying networks[J]. Physical Review Applied, 2019, 12(2):024046.
- [36] Cui Yongjie, Zhang Yuepeng, Witkowski L, et al. Monolithic integration of self-biased C-band circulator on SiC substrate for GaN MMIC applications[J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(8):1249–1252.
- [37] Wang Haoran, Zhang Tao, Peng Chongmei, et al. An integrated miniaturized self-biased circulator based on the low-temperature D2W bonding technique[J]. IEICE Electronics Express, 2025, 22(11):20250182.
- [38] Yu Y, Michetti G, Kord A, et al. Highly-linear magnet-free microelectromechanical circulators[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2019, 28(6):933–940.

【校友简介】



陈朝晖, 国家高层次人才, 现为东南大学首席教授, 同济大学兼职教授。1996年毕业于四川大学物理系微电子专业。先后担任上海集成电路材料研究院首席专家、中国科学院微电子所研究员、美国 MetaMagnetics 公司首席技术官、美国 Intel 公司资深科学家等, 兼任美国 Qorvo 公司和美国东北大学顾问。陈朝晖教授已有 20 多年半导体先进技术研发与产业化经验, 长期从事新型材料、新型工艺、新型器件及集成技术的研发, 是微波毫米波磁性薄膜器件和集成技术的国际专家, 该领域的技术开拓者之一。现致力于该领域相关的产学研用工作, 研究兴趣包括高性能能源采集转换与储存技术、新型毫米波器件及微系统集成技术、可工程化的超材料制备与应用技术等。

Integration of Circulators: A Review of Self-biased Magnetic and Nonmagnetic Technologies

ZHANG Tao¹, JIANG Dongyi¹, CHEN Zhaohui^{2*}

(1.The 55th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation (CETC), Nanjing 210001, China;

2.School of Integrated Circuits, Southeast University, Nanjing 214135, China)

Abstract:

Significance Circulators are three-port nonreciprocal microwave devices that enable unidirectional signal transmission while providing reverse isolation. They play essential roles in active phased array radar transmit/receive (T/R) modules by providing channel isolation and in wireless communication radio frequency (RF) frontends by enabling in-band full-duplex operation. With the continued development of 5G/6G communications and the growing trend toward high-density integration, the miniaturization and planar integration of circulators become critical research directions. Traditional ferrite circulators rely on external permanent magnets to provide bias fields, resulting in substantial volume and weight, magnetic interference, and incompatibility with semiconductor fabrication processes. Two technical approaches are explored to overcome these limitations: material innovation using self-biased hexaferrites and circuit architecture innovation using nonmagnetic time-modulated approaches.

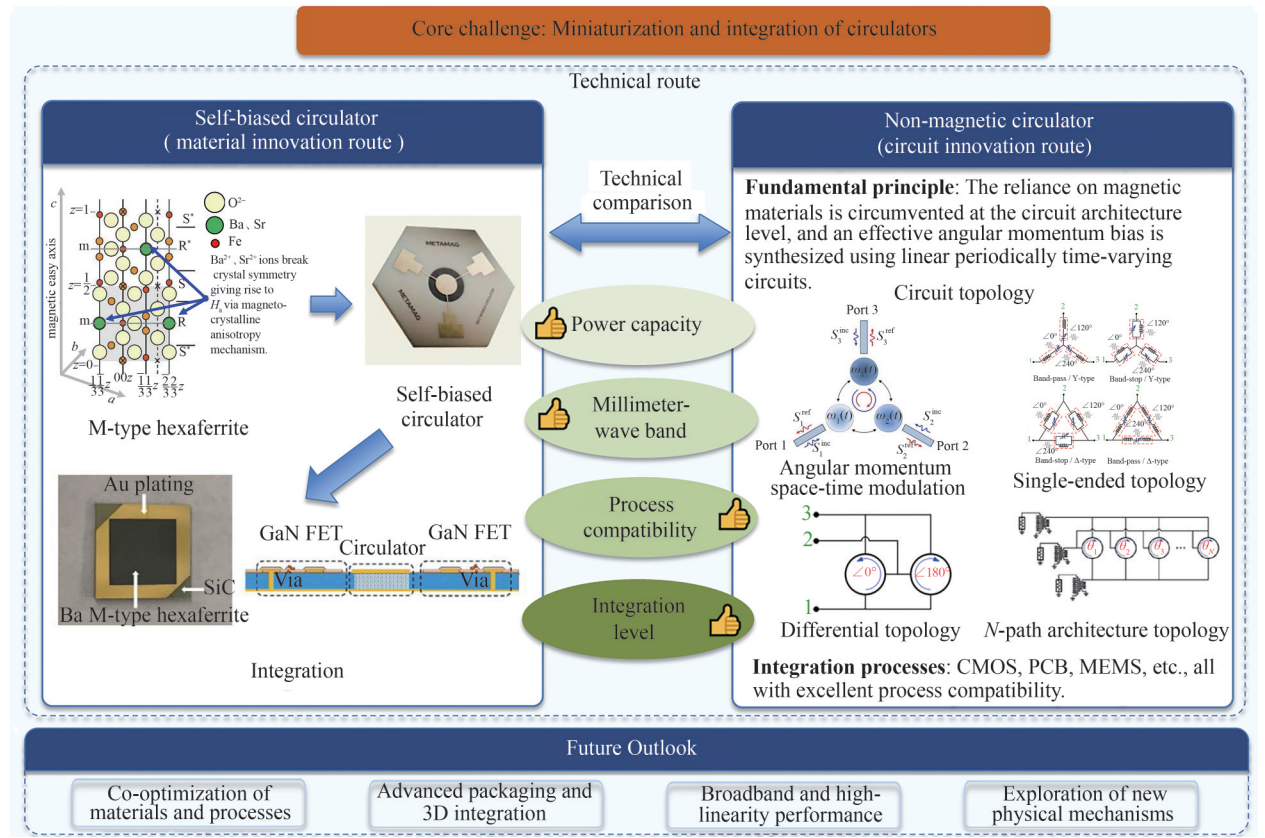
Progress Self-biased circulators utilized the high magnetocrystalline anisotropy field of hexaferrites to replace external permanent magnets and achieved nonreciprocal performance under zero applied field. M-type barium hexaferrite ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, BaM) was the preferred material, with an anisotropy field of approximately 17.5 kOe and zero-field ferromagnetic resonance frequencies of 30–50 GHz. A high remanence ratio ($M_r/M_s > 90\%$) was required to maintain sufficient magnetization in the zero-bias state, in which the effective internal field was determined by the anisotropy field and remanent magnetization through the demagnetizing factor. Ion substitution enabled frequency tuning: Al^{3+} or Ga^{3+} substitution increased the anisotropy field for W-band operation, whereas Sc^{3+} or In^{3+} substitution reduced it for C- to Ka-band applications. Co–Ti cosubstitution allowed a reduction in the anisotropy field while maintaining the *c*-axis magnetic anisotropy. W-type hexaferrites were also investigated because of their high anisotropy and low microwave losses. Material preparation required the simultaneous achievement of high *c*-axis texture, high density, and low microwave loss. Magnetic field orientation aligned the formation of single-domain particles (1–2 μm) under strong magnetic fields, whereas sintering at 1 100–1 150 °C in an oxygen atmosphere achieved 90%–95% of the theoretical density. A trade-off existed between density and magnetic performance: high density reduced domain-wall pinning and coercivity, whereas moderate density preserved coercivity through porosity; however, broadened the resonance linewidth. System integration cofired LTCC multilayer and semiconductor-substrate hybrid integration approaches. LTCC approaches included embedding presintered hexaferrite bulks in cavities, screen-printing ferrite paste onto LTCC tapes, and magnetically oriented ferrite tapes with LTCC layers. Low-temperature thermocompression bonding of oriented BaM thick films onto SiC substrates yielded miniaturized circulators with B insertion loss of 1.2 dB and a bandwidth of 2.5 at 35 GHz, with dimensions of only 3.0 × 2.8 mm. Key challenges included ferromagnetic resonance linewidths of 200–500 Oe, temperature-dependent remanence, and thermal-budget incompatibility between high-temperature ferrite processing and semiconductor frontend processes. Circulators circumvented dependence on magnetic materials by synthesizing an effective angular momentum bias through linear, periodically time-varying circuits. Periodic modulation with 120° phase differences applied to three coupled resonators broke time-reversal symmetry without actual magnetic fields and split clockwise and counterclockwise resonant modes to achieve nonreciprocal transmission. Circuit topology evolved through several generations. Coupled-resonator loop topologies initially verified the angular momentum bias concept and achieved isolation exceeding 50 dB. Single-ended topologies (bandpass/Y-type, bandstop/Y-type, bandstop/ Δ -type, and bandpass/ Δ -type) achieved an insertion loss of 3.3 dB and isolation of 55 dB at 1 GHz, with an instantaneous bandwidth of 2.4%. Differential architectures that combined two single-ended circuits with a 180° phase difference suppressed intermodulation products and achieved an insertion loss of 0.8 dB. *N*-path architectures further extended spurious suppression to –62 dBc and provided an *N*-fold improvement in power handling at the cost of increased size and power consumption. Integration was demonstrated in 180 nm CMOS using switched-capacitor modulation, which achieved an insertion loss of 4.9 dB and isolation of 60 dB at 910 MHz with an active area of 0.2 mm², and in MEMS, which achieved a power consumption of 150 μW ; however, exhibited a narrow bandwidth. Core challenges included intermodulation product suppression, limited instantaneous bandwidth, and low on-chip inductor quality factors ($Q \approx 10$ –20) in CMOS implementations.

Conclusions and Prospects Two integration routes for circulators have been systematically reviewed. Self-biased circulators based on hexaferrite with high magnetocrystalline anisotropy provide advantages in millimeter-wave frequency coverage and power-handling capacity, making them suitable for high-performance phased-array T/R modules. Nonmagnetic circulators based on spatiotemporal modulation and synthesized angular momentum bias exhibit superior process compatibility and on-chip integration density, making them promising for 5G/6G communication fron-

tends. Both routes are undergoing rapid development and provide complementary strengths for different applications. Future trends include the co-optimization of materials and processes to reduce insertion loss to below 1 dB and extend operating frequencies toward the terahertz range; the development of nonmagnetic circulators with broader bandwidth (>10%), higher linearity, and lower power consumption; the use of advanced packaging and three-dimensional integration to achieve deeper RF frontend integration; and the exploration of new physical mechanisms and materials, such as topological insulators, magnetoelectric coupling materials, and metasurfaces.

Key words: circulator; self-biased; nonmagnetic circulator; hexaferrite; spatiotemporal modulation; integrated technologies

Graphical abstract:



(编辑 赵 婧)

引用格式: Zhang Tao, Jiang Dongyi, Chen Zhaohui. Integration of circulators: A review of self-biased magnetic and non-magnetic technologies[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(5): 373–384. [张韬, 江栋一, 陈朝晖. 环形器集成技术: 自偏置与无磁技术综述[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(5): 373–384.]