

· 收/发技术 ·

中图分类号: TN9703; TN305

文献标志码: A

文章编号: 1004-7859(2012)12-0068-06

RF MEMS 技术对小型化雷达的作用

魏 恭¹, 邓 成², 鲍景富², 黄 伟³

(1. 空军驻绵阳地区军代室, 四川 绵阳 621000; 2. 电子科技大学 电子工程学院, 成都 611731)

(3. 国营第七八三厂第四研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要:该文采用至上而下的方式,介绍了应用 RF MEMS 技术的雷达系统,将雷达子系统与 RF MEMS 技术联系起来,具体分析应用于雷达的 RF MEMS 开关、移相器、滤波器和谐振器。同时,文中以开关和移相器为例,讨论了如何提高 RF MEMS 雷达的性能:修改空气桥形状可以提高 RF MEMS 收发(T/R)组件的功率处理能力,从而减少雷达相控阵的 T/R 组件数量;缩短转换时间的 RF MEMS 移相器能够应用于高速电扫描阵列;蜿蜒型 5 位分布式 MEMS 传输线移相器面积仅为 5.36 mm×4.72 mm,相比传统移相器长度降低 70%,易于实现雷达阵列的小型化。

关键词:射频微机电系统;雷达;相控阵;收发组件;开关

RF MEMS Technology to Miniaturization Radar Role

WEI Gong¹, DENG Cheng², BAO Jing-fu², HUANG Wei³

(1. The Representative Agency of Airforce at Mianyang, Mianyang 621000, China)

(2. School of Electronic Engineering,

University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

(3. The 783 State Operated Factory, Mianyang 621000, China)

Abstract: Using a bottom-up approach, radar systems which benefit from RF MEMS technology is introduced. Radar subsystems are related to RF MEMS technology by analysis of RF MEMS switch, phase shifter, filter and resonator. The paper also discusses how to improve radar performance by designing the switch and phase shifter as examples. The T/R module composed of the RF MEMS switch without self-actuation can handle much higher RF power and reduces the number of transmitter and receiver (T/R) modules in electronically scanned array (SEA) radar. A RF MEMS phase shifter with short release time is suitable for high speed SEA. A novel 5-bit distributed MEMS phase shifter using meander structure has an area of 5.36 mm×4.72 mm which is suitable for small radar. Compared to conventional 5-bit distributed phase shifter, the length of advanced phase shifter is decreased by 70%.

Key words: radio-frequency micro-electro mechanical system; radar; phased array; T/R module; switch

0 引言

相比传统电子技术,射频微电子机械系统(Radio-Frequency Micro-Electro-Mechanical System, RF MEMS)具有插入损耗低、线性度高、批量生产成本低、易于集成等特点^[1]。密歇根大学的 Koen Van Caekenbergh 是最早提出 RF MEMS 雷达概念的学者^[2-3]。早在 2006 年, Koen Van Caekenbergh 就采用 RF MEMS 技术在 15.24 cm 熔融石英晶片上制作出应用于远距汽车雷达的电扫描阵列(ESA),并提出了高脉冲重复频率(HPRF)单脉冲多普勒雷达前端的概念^[4]。为了降低雷达前端相位控制阵列的复杂性和造价,人们

提出了开关波束成形网络的概念,它可以减少并行射频和基带信号路径数量,而 RF MEMS 子系统由于性能和造价上的优势很适合应用于开关波束成形网络^[5]。Joerg Schoebel 等人已经应用 RF MEMS 移相器和基于 RF MEMS 单刀四掷开关的罗特曼(Rotman)透镜分别实现了应用于车载雷达前端的 2 种开关波束成形网络^[5]。近期, Sundeep Lal 等人用类似的方法,将基于 RF MEMS 技术的开关、移相器和可重构微带天线与其他微电子组件结合,制成了 3 模车载 MEMS 雷达^[6]。相比车载雷达,应用于航空和航天平台的雷达更需要低成本、轻质量和低功耗的阵列技术,于是 RF MEMS 技术受到关注^[7]。John Maciel 等人用平行面波导和 25 000 个欧姆接触式 RF MEMS 开关制成孔径面积为 0.4 m² 的 2 维 X 波段砖砌式(brick-assembled)移相透镜电扫描阵列,并与 AN/APG-67 火控雷达系统集成,成功检测到空中和地面移动目标^[7]。

应用于雷达系统的 RF MEMS 器件有衰减器、限

基金项目:国家部委基金(9140A23060409DZ02),中国工程物理研究院科学技术发展基金(2008A0403016)和国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(11176006)资助项目

通信作者:魏恭 Email: seweigong@163.com

收稿日期:2012-07-08 **修订日期:**2012-09-10

幅器、谐振器、可调滤波器、(实时延)移相器、收发(T/R)开关、可调匹配网络和可重构天线^[2]。受益于 RF MEMS 技术的雷达子系统包括有源电扫描阵列(T/R 组件)、无源电扫描阵列(透镜、反射阵列、子阵列和开关波束形成网络)和雷达罩^[3]。

1 RF MEMS 雷达

1.1 应用 RF MEMS 技术的雷达系统

由图 1 所示单基地(monostatic)调频连续波雷达的局部原理框图可知,天线连接着限幅器、对射频信号功率放大的功率放大器、对回波信号放大的低噪声放大器、用于变频的振荡器和用于切换的开关。限幅器可以利用 RF MEMS 开关的自激励现象实现,与放大器级联的窄带滤波器可以用相互耦合的 MEMS 谐振器并联实现,振荡器和开关中也分别包含 MEMS 谐振器和开关。高 Q 值(>10 000) RF MEMS 谐振器的使用能够增强系统抗冲击性能、减轻雷达重量,使其易于实现小型化。同时,RF MEMS 开关的使用能够有效降低雷达的直流功耗。

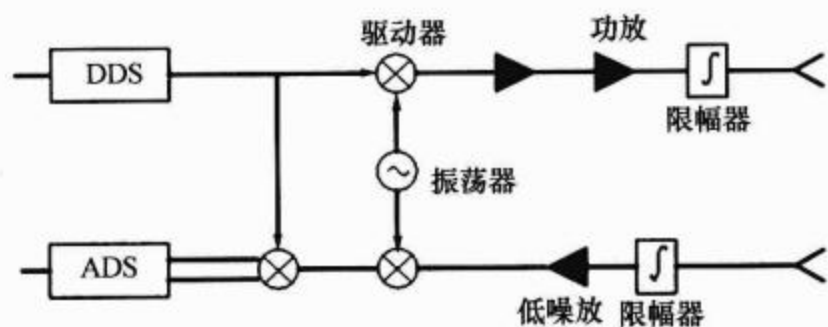


图 1 单基地(monostatic)调频连续波雷达

图 2 所示为单基地单脉冲多普勒射频波束形成有源相控阵雷达框图。有源相控阵是指与天线阵中每个天线单元连接的不再是一个移相器,而是 T/R 组件(图 2a))。T/R 组件中不仅有移相器,而且还包含功率放大器、低噪声放大器、可变衰减器、控制开关等(图 2b))。有源相控阵雷达射频功率效率高、功能多、探测和跟踪能力强、可靠性高、隐身性能好、可形成不同形状波束以及能检测地面慢速目标(GMTI)^[8]。

然而,数量巨大的 T/R 组件对插损、功耗和成本都提出了很高的要求。而 RF MEMS 技术正好可以满足这些需求,尤其是成本可以降低近 10 倍^[9]。图 2b)中的 T/R 开关、限幅器、实时延(TTD)衰减器和移相器均可用表面微加工工艺制作在同一片硅片上。

近十年来,GaAs 单片微波集成电路(MMIC) T/R 组件已经广泛应用于有源电扫描阵列(AESA)中,而宽带 GaN 和 SiC 芯片还能提高 1~2 个数量级的 T/R 组件功率^[9]。未来用 GaN 和 SiC T/R 组件替换 GaAs T/R 组件后,现有 AESA 的功率将有望提升 10 倍,这意味着搜索量提高 10 倍或跟踪范围增大 78%。

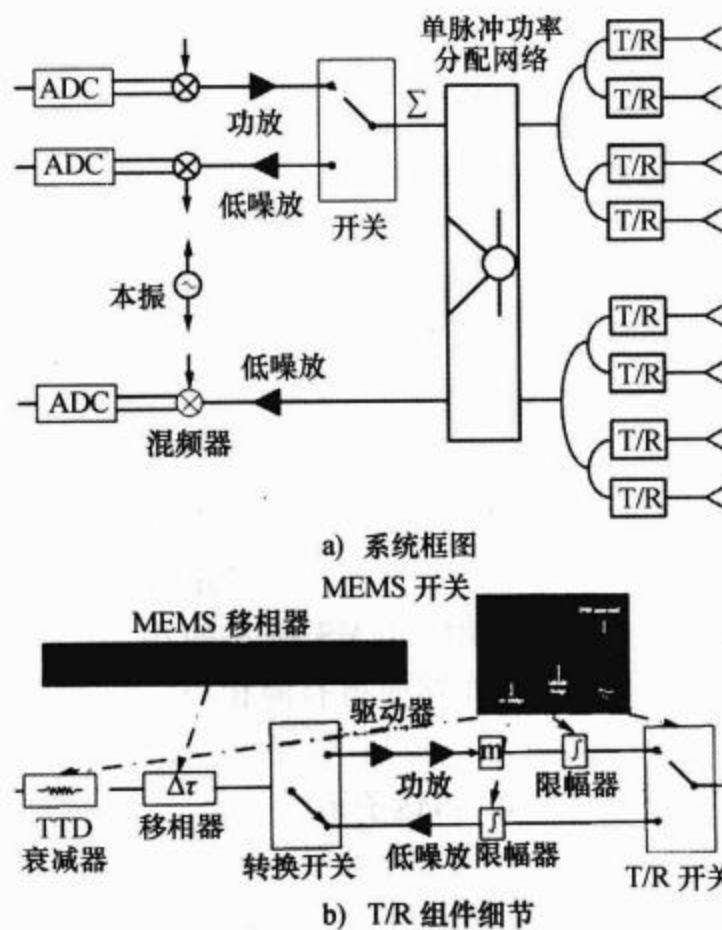


图 2 单基地单脉冲多普勒射频波束形成有源相控阵雷达

RF MEMS 技术的引入有助于在 MMIC 上实现衰减器、驱动器、收发转换开关、低噪声放大器和移相器的集成,进而实现小体积、低功耗 X 波段和 Ka 波段射频波束形成有源相控阵雷达^[2]。图 3 中圆圈包围的部分为 MMIC T/R 组件的收发转换开关。因为收发共用一条路径,这种开关必须具有足够高的隔离度,以避免有害的片上反馈引起信号失真。RF MEMS 收发转换开关具有无源性、互易性,低插损,高线性度和高功率处理能力,单个 RF MEMS 收发转换开关就能在同一条 T/R 路径上实现 RF 信号的接收与发送,同时避免片上反馈问题。

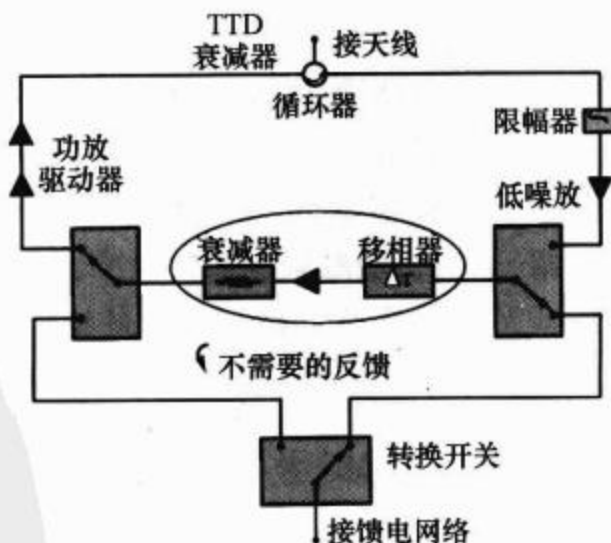


图 3 基于 MMIC 的 T/R 组件 (黑色为有源部分,灰色为无源部分)

1.2 超宽带 T/R 组件

RF MEMS 收发转换开关和具有实时延的衰减器、移相器都具有宽带性能,它们与宽禁带半导体 GaN HEMT 放大器的集成,很容易实现超宽带 T/R 组件

(图2b))。同时,由于 RF MEMS 器件具有低的插入损耗和高的功率处理能力,可以有效地减少脉冲多普勒雷达相控阵的 T/R 组件数量。

在 T/R 组件中,由于采用的机械式开关,使得无论在带宽、功耗、插入损耗方面都比原来的电子开关具有极大的优势,这就为单个的 T/R 组件在体积缩减、功率加大方面提供了条件。

而在 T/R 组件中,宽带高精度的移相器为体积小、小型化提供了可能,同时基于 MEMS 的宽带高精度的移相器具备插入损耗低、线性度高、宽带特性高的特点,这正是适应现代航电一体化、孔径综合化的发展趋势。

通过综合利用 RF MEMS 技术的小型化 MEMS MMIC 的 T/R 组件,能够使得有源相控阵雷达系统体积更小、散热更少、频段更高、带宽更宽。

1.3 其他 RF MEMS 雷达子系统

其他 RF MEMS 雷达子系统包括:RF MEMS 透镜阵列、RF MEMS 可调阻抗面、RF MEMS 可调反射阵列、RF MEMS 开关波束成形网络和 RF MEMS 雷达罩^[2]。RF MEMS 透镜阵列具有体积小、质量轻的优点。RF MEMS 可调阻抗面由 RF MEMS 开关实现单元表面阻抗(电抗)的变化,进而实现电磁波的线性反射相移,实现无界电磁波反射方向的控制。它具有高的宽边 EIRP \times Gr/T、轻的质量和小的体积,但外加电流不能完全通过 RF MEMS 器件,从而导致相移不完全。RF MEMS 可调反射阵列由天线、RF MEMS(实时延)移相器组成,它捕捉无界电磁波,对其进行移相、反射和再辐射。它的优势在于可以在超过 35 GHz 的阻抗带宽上调整波束方向,多位数字移相器具有小的波束指向误差,反射阵列由单面薄片块状物堆砌而成,易于实现天线和移相器在低损熔融石英、硼硅酸玻璃或 LCP 晶圆上的集成,T/R 组件数量少,EIRP \times Gr/T 高。RF MEMS 开关波束成形网络由阵列天线和 RF MEMS 移相器或基于 RF MEMS 单刀多掷开关的罗特曼透镜组成,易于集成,潜在成本低。RF MEMS 技术能够用来制作雷达罩,通过自激励限制输入功率,重构极化器的极化方向或关闭天线罩。现已制成低插损 Ka 波段开关型 RF MEMS 雷达罩^[2]。

2 雷达中的 RF MEMS 技术

2.1 开关

RF MEMS 开关结构是除谐振器以外所有 RF MEMS 器件的基本结构。一种 RF MEMS 电容式开关如图 4 所示^[10]。该结构中最重要的是可动梁(MEMS bridge),它可以在直流驱动电压作用下发生下拉或弹起动作,这对应并联开关的关闭或打开。

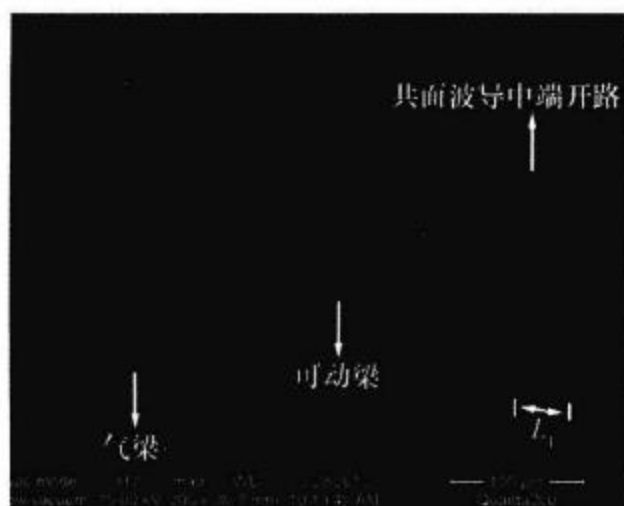


图4 RF MEMS 电容式开关

RF MEMS 开关的在插入损耗、隔离度、线性度、集成性等方面均优于基于半导体结的 PIN 二极管或 FET 场效应管开关^[1]。若用 RF MEMS 开关或 RF MEMS 开关结构制作的开关电容、变容器代替现有射频波束形成无源相控阵雷达中的 PIN 二极管,就能生产出具有更高 EIRP \times Gr/T、更低功耗的轻质无源相控阵雷达,满足机载和星载平台的要求^[2]。

雷达的 T/R 开关需要具有较高的功率处理能力,这也给 RF MEMS 开关的研究提出了新的课题。RF 功率产生的热效应和力效应限制了 RF MEMS 开关功率处理能力。近年来,一些抑制热效应的新设计已经得到验证,如 Mahameed R 等人的热扣梁^[11]和 Reines I 等人的圆梁^[12]。相比而言,抑制力效应引起的开关自激励现象还将长期成为科研人员努力的方向。

通过改变空气桥的形状可以抑制开关的自激励^[13]。空气桥的结构如图 4、图 5 所示,图 5a) 中的空气桥即图 4 中的空气桥。通过仿真可知,图 5a)~5c) 空气桥对应的开关所能承受的最大功率分别为 31 W、31 W 和 52 W(不考虑热效应),均高于无空气桥开关的 13 W。它们的隔离度均低于空气桥开关(-9.38 dB),分别为 -0.03 dB、-5.84 dB 和 -3.15 dB。因此,图 5a) 和 5b) 中新结构可以在隔离度降低不多的情况下提高开关的功率处理能力。

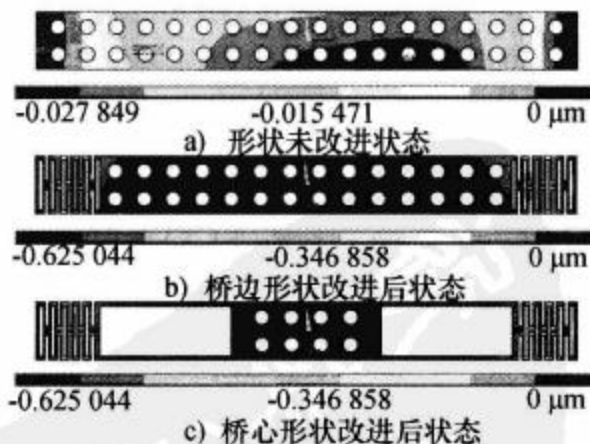


图5 在 25.5 V 驱动电压作用下 3 种结构空气桥的静态形变

当然,也可以通过改变空气桥形状的方法来设计 RF MEMS 限幅器,只是最大功率需要精确到某一数值。

2.2 移相器

当前,微波移相器已经在相控阵雷达中得到广泛应用。相比于其他技术,RF MEMS 电调移相器具有更理想的性能,包括极低的损耗、极高的线性度、易于集成等。MEMS 开关线性网络在 40 GHz 的 Ka 波段表现出优异的射频性能,但随着频率的升高,损耗急剧增大。分布式 MEMS 传输线(简称 DMTL)移相器在毫米波波段表现出优于前者的性能。一种 DMTL 移相器的局部如图 6 所示,其 S 参数和相移分别如图 7、图 8 所示^[10]。

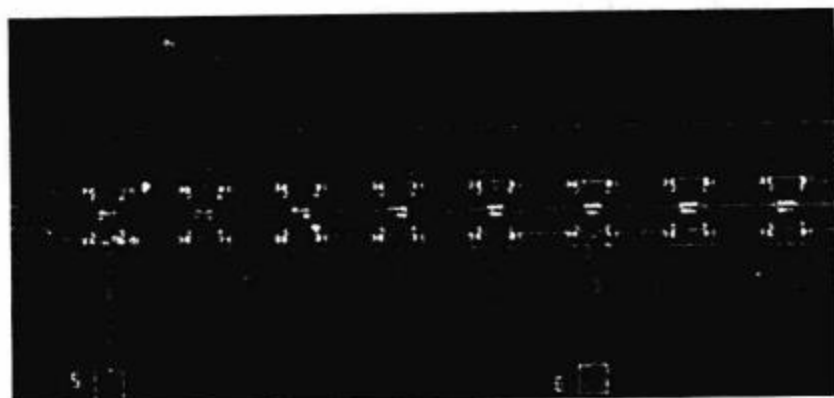


图 6 DMTL 移相器局部照片

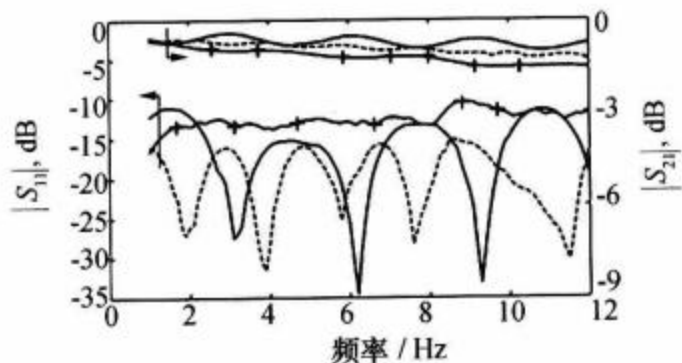


图 7 DMTL 移相器的 S 参数

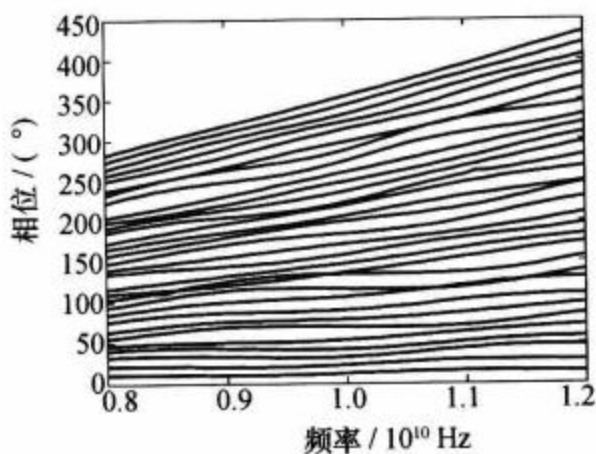


图 8 DMTL 移相器的相移

虽然 RF MEMS 移相器具有很好的射频性能,但是由于它的可调特性来源于机械运动,转换时间相比传统电子器件较长(几十~几百 μs),无法满足高速电扫描相控阵的要求。通过理论分析和仿真验证^[14-15],通过流体力学、结构学、电学和电磁学方法,可以将 DMTL 移相器 91.89 μs 的转换时间分别降低到 31.35 μs 、29.12 μs 、33.69 μs 和 42.17 μs 。

如图 4 所示,多位 DMTL 移相器的长条形结构不利于它的片上集成,这也不满足机载和星载平台的要

求。图 9 所示的蜿蜒结构 DMTL 移相器通过在转角处加载细悬空梁实现了与径直结构相当的射频性能^[16]。该移相器面积仅为 5.36 mm \times 4.72 mm,相比图 4 所示径直移相器长度降低 70%。

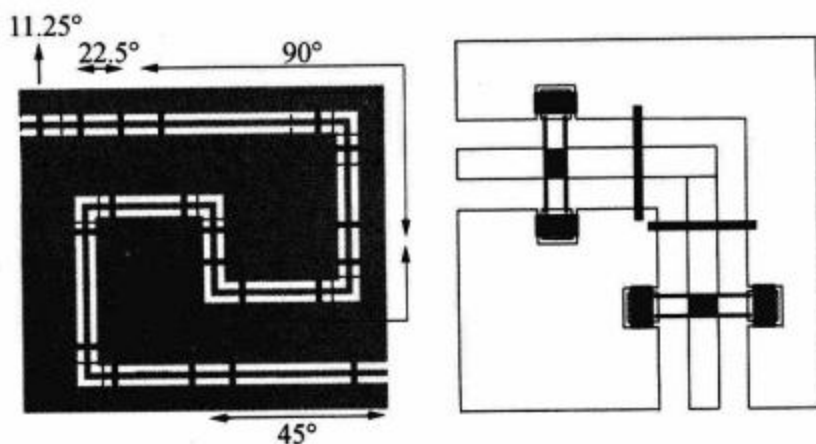


图 9 蜿蜒型 5 位 DMTL 移相器(左图标出了各段信号线的相移,右图为左图虚线框的放大图)

2.3 滤波器

RF MEMS 可动梁还可以用于制造可调滤波器。一种是用 RF MEMS 电容网络制作的中心频率可调(分别为 8 GHz、8.5 GHz、9.2 GHz 和 10 GHz)的低损耗滤波器如图 10 所示^[17]。

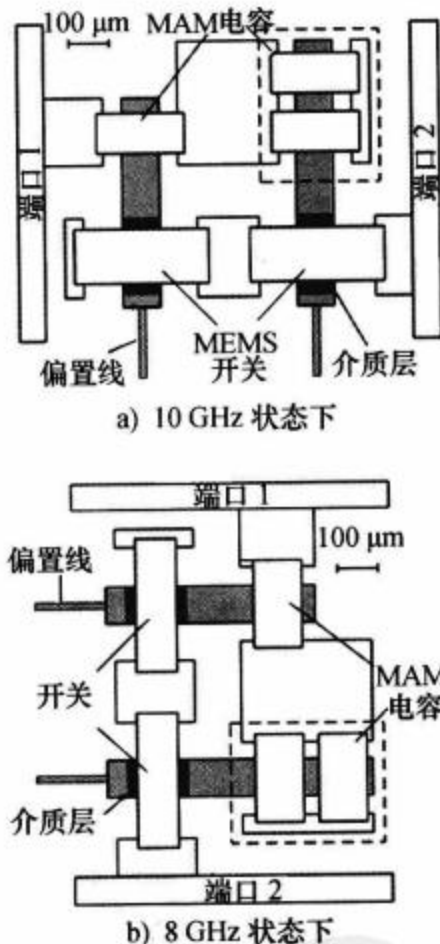


图 10 低损耗 8 GHz ~ 10 GHz RF MEMS 可调滤波器

MEMS 表面微加工工艺还能用作制造 RF MEMS 波导滤波器,利用深反应离子刻蚀(DRIE)工艺在硅片上制造的 D 波段电感膜片耦合三腔波导滤波器如图 11 所示^[18]。该样品的中心频率为 140 GHz ~ 142 GHz,插入损耗为 2.8 dB ~ 3.2 dB,带外抑制为 9 dB ~ 12 dB。

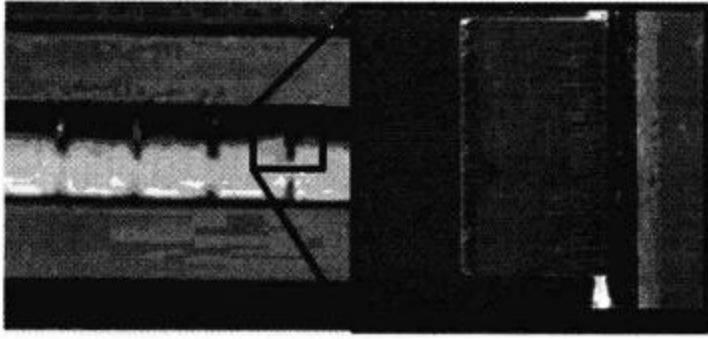


图 11 RF MEMS 波导滤波器

RF MEMS 技术的高速发展满足了这种需求。

参考文献

- [1] Patel C D, Rebeiz G M. RF MEMS Metal-contact switches with mN-contact and restoring forces and low process sensitivity [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(5): 1230-1237.
- [2] Van Caekenberghe K. RF MEMS on the radar [J]. IEEE Microwave Magazine, 2009, 10(6): 99-116.
- [3] Van Caekenberghe K. RF MEMS technology for radar sensors [C]// 2009 Radar Conference-Surveillance for a Safer World. Bordeaux: IEEE Press, 2009: 1-6.
- [4] Van Caekenberghe K, Sarabandi K. Monopulse-Doppler radar front-end concept for automotive applications based on RF MEMS technology [C]// 2006 IEEE International Conference on Electro/information Technology. East Lansing, MI: IEEE Press, 2006: 1-5.
- [5] Schoebel J, Buck T, Reimann M, et al. Design considerations and technology assessment of phased-array antenna systems with RF MEMS for automotive radar applications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(6): 1968-1975.
- [6] Lal S, Muscedere R, Chowdhury S. An FPGA-based signal processing system for a 77 GHz MEMS trimode automotive radar [C]// 2011 22nd IEEE International Symposium on Rapid System Prototyping (RSP). [S. l.]: IEEE Press, 2011: 2-8.
- [7] Maciel J J, Slocum J F, Smith J K, et al. MEMS electronically steerable antennas for fire control radars [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2007, 22(11): 17-20.
- [8] 贲德. 机载有源相控阵火控雷达的新进展及发展趋势 [J]. 现代雷达, 2008, 30(1): 1-4.
Ben De. Latest status & development trends of airborne AESA fire-control radar [J]. Modern Radar, 2008, 30(1): 1-41.
- [9] Brookner E. Phased-array and radar breakthroughs [C]// 2007 IEEE Radar Conference. [S. l.]: IEEE Press, 2007: 37-42.
- [10] Du Y, Bao J, Zhao X. 5-bit MEMS distributed phase shifter [C]// 2007 IEEE Radar Conference. [S. l.]: IEEE Press, 2007: 37-42.
- [11] Mahameed R, Rebeiz G M. A high-power temperature-stable electrostatic RF MEMS capacitive switch based on a thermal buckle-beam design [J]. Journal of Microelectromechanical System, 2010, 19(4): 816 - 826.
- [12] Reines I, Pillans B, Rebeiz G M. Performance of temperature-stable RF MEMS switched capacitors under high RF power conditions [C]// 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Anaheim, CA: IEEE Press, 2010:

2.4 谐振器

RF MEMS 谐振器是近几年才发展起来的 RF MEMS 器件,也是当前最有可能取代石英谐振器的技术,其体积仅为传统石英谐振器尺寸的十分之一,厚度仅为 $270\ \mu\text{m}$,具有 $5 \times 10^5\ \text{m/s}^2$ 抗震和 $700\ \text{m/s}^2$ 防振特性,耐用性超过石英 10 倍。RF MEMS 圆盘谐振器(图 12a))的谐振频率已经达到特高频中段($>1\ \text{GHz}$),Q 值也已经超过了 10 000。

阻碍 RF MEMS 谐振器技术发展的最大瓶颈是过大的串联动态电阻($5\ \text{k}\Omega \sim 50\ \text{k}\Omega$)难与现有电子设备匹配。降低串联动态电阻有效的方法是通过机械移动缩短缝隙宽度($1\ \mu\text{m}$ 缩短到 $10\ \text{nm}$)^[19],也可以通过修改结构和电路增大换能面积(图 12b))^[20]。

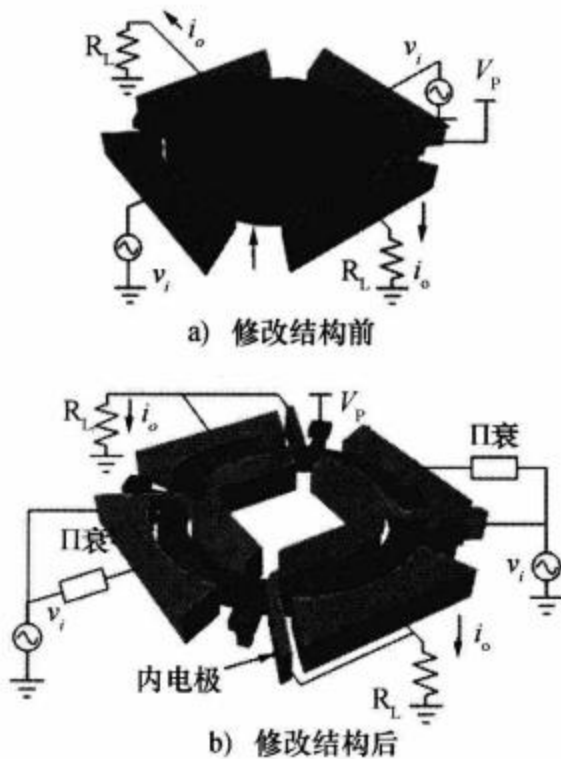


图 12 内外电极分离的圆环谐振器示意图

(t 表示圆盘厚度、 d_0 表示缝隙宽度、 v_i 、 i_o 和 R_L 分别表示输入电压、输出电流和负载电阻)

3 结束语

本文通过分析应用于雷达系统的 RF MEMS 技术,说明了引入 RF MEMS 技术有助于雷达实现小型化和集成化。多种 RF MEMS 器件,如开关、移相器、滤波器和谐振器,都能应用于现有雷达系统。为了提升 RF MEMS 雷达的性能,需要提升 RF MEMS 器件的性能,包括功率处理能力、速度、体积、插损等。而当前

292 - 295.

[13] Deng Cheng, Bao Jingfu, Du Yijia, et al. A novel DMTL capacitive switch with electrostatic actuation MAM capacitors[J]. *Microsystem Technologies*, 2012, 18(5): 537-541.

[14] 邓 成, 鲍景富, 凌 源, 等. 提高 RF MEMS 开关速度的电压控制方法[J]. *微纳电子技术*, 2012, 49(1): 39-44,55.
Deng Cheng, Bao Jingfu, Ling Yuan, et al. Voltage control approach to improve the speed of RF MEMS switches [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2012, 49(1): 39-44,55.

[15] 邓 成, 鲍景富, 凌 源, 等. 缩短 RF MEMS 开关释放时间的上悬梁方法[J]. *微纳电子技术*, 2011, 48(11): 714-719,732.
Deng Cheng, Bao Jingfu, Ling Yuan, et al. Top-beam approach to reduce the release time of RF MEMS switches [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2011, 48(11): 714-719,732.

[16] Du Yijia, Bao Jingfu, Wu Wenchang, et al. Design of a novel 5-bit distributed MEMS phase shifter[C]// *International Conference on Communications, Circuits and Systems*. Chengdu: IEEE Press, 2010: 706-709.

[17] Tu Cheng, Bao Jingfu, Du Yijia, et al. An improved design method for asymmetric RF MEMS tunable filter utilizing admittance matrix[C]// *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*. Chengdu: IEEE Press, 2010: 1766-1769.

[18] 赵兴海, 杜亦佳, 郑英彬, 等. D 波段 MEMS 波导滤波器研究[C] // 2011 年全国微波毫米波会议. 青岛: 中国电子学会微波分会, 2011: 1493-1495.
Zhao Xinghai, Du Yijia, Zheng Yingbin, et al. Research

on D band MEMS waveguide filter [C]// 2011 National Microwave and Millimetre Wave Conference. Qingdao: Microwave Society, Chinese Institute of Electronics, 2011: 1493-1495.

[19] 邓 成, 鲍景富, 杜亦佳, 等. 缩短微机械圆盘谐振器缝隙的电极移动法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(2): 493-498.
Deng Cheng, Bao Jingfu, Du Yijia, et al. A novel moving-electrode approach to reduce the electrode-disk-gap of MEMS disk resonator[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 493-498.

[20] 邓 成, 鲍景富, 杜亦佳, 等. 内外电极分离的延伸酒杯模态微机械圆环谐振器[C]//2011 年全国微波毫米波会议(论文集). 青岛: 中国电子学会微波分会, 2011: 267-270.
Deng Cheng, Bao Jingfu, Du Yijia, et al. Micromechanical extensional wine-glass mode ring resonators with unconnected inner and outer electrodes[C]// 2011 National Microwave and Millimetre Wave Conference. Qingdao: Microwave Society, Chinese Institute of Electronics, 2011: 267-270.

魏 恭 男,1975 年生,工程师。研究方向为空管二次雷达与新体制雷达系统。

鲍景富 男,1964 年生,教授,博士生导师。研究方向为射频微机电系统、频率合成信号源和低相位噪声技术等。

邓 成 男,1985 年生,硕士生。研究方向为 RF MEMS 移相器、开关、谐振器等。

黄 伟 男,1983 年生,主任。研究方向为新体制雷达系统的开发。

(上接第 67 页)

[10] 肖龙帅, 黄 华, 夏建刚, 等. 基于近邻粒子群优化的阵列天线方向图综合[J]. *通信技术*, 2009, 42(9): 52-53,71.
Xiao Longshuai, Huang Hua, Xia Jiangang, et al. Array antennas beam pattern synthesis based on neighborhood particle swarm optimization[J]. *Communicaiton Technology*, 2009,42(9): 52-53, 71.

[11] 袁智皓, 耿军平, 金荣洪, 等. 基于改进的粒子群算法的二维阵列天线方向图综合技术[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(5):1236-1239.
Yuan Zhihao, Geng Junping, Jin Ronghong, et al. Pattern synthesis of 2-D antennas based on a modified PSO algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007,29(5): 1236-1239.

[12] 金荣洪, 袁智皓, 耿军平, 等. 基于改进粒子群算法的天线方向图综合技术[J]. *电波科学学报*, 2006, 21

(6): 873-878.

Jin Ronghong, Yuan Zhihao, Geng Junping, et al. The pattern synthesis of antennas based on a modified PSO algorithm[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2006, 21(6): 873-878.

[13] 刘先省, 张连堂, 吴嗣亮, 等. 基于有向阵元的圆形阵列方向图综合[J]. *电子学报*, 2004, 32(4): 701-704.
Liu Xianxing, Zhang Liantang, Wu Siliang, et al. Pattern synthesis of circular arrays based on directional elements [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004,32(4): 701-704.

杨永建 男,1988 年生,硕士研究生。研究方向为雷达信号与信息处理。

王晟达 男,1962 年生,教授。研究方向为雷达信号与信息处理研究。