

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108718

L~Ka 波段 MEMS 单刀七掷开关的设计与研究*

吴倩楠^{1,2,3} 范丽娜^{1,3} 李孟委^{1,3}(1. 中北大学前沿交叉科学研究院 太原 030051; 2. 中北大学理学院 太原 030051;
3. 中北大学微系统集成研究中心 太原 030051)

摘要: 针对目前 MEMS 单刀七掷开关体积大、插入损耗及隔离度较差的问题,设计了一种基于“米”字型功分器的单刀七掷 MEMS 开关,通过 HFSS 软件对射频 MEMS 开关单元和“米”字型功分器进行设计,对开关的 S 参数、驻波比进行了仿真研究,并采用 COMSOL 软件对射频 MEMS 开关单元进行机械性能分析。结果表明,在 1~40 GHz 频段内,单刀七掷 MEMS 开关各个端口的插入损耗 ≤ 0.45 dB@40 GHz,隔离度 ≥ 29.5 dB@40 GHz,驻波比 ≤ 1.45 ,且体积仅有 0.65 mm \times 0.5 mm \times 0.5 mm。此设计可与滤波器、衰减电阻、天线等集成,应用于多通道可调谐 MEMS 器件中,在卫星通信、雷达、和微波测试领域中具有一定的应用价值。

关键词: 单刀七掷开关;MEMS;米字型功分器;小体积;低插损

中图分类号: TN389 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3030

Design and research of L~Ka band MEMS SP7T switch

Wu Qiannan^{1,2,3} Fan Lina^{1,3} Li Mengwei^{1,3}(1. Academy for Advanced Interdisciplinary Research, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. School of Science, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. Center for Microsystem Intergration North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problems of large volume, poor insertion loss and isolation of MEMS SP7T switch at present, a kind of SP7T MEMS switch based on "meter" power divider is designed. RF MEMS switch unit and "meter" power divider are designed by HFSS software, and the S parameter and standing wave ratio of the switch are simulated and studied. The mechanical performance of RF MEMS switch unit is analyzed by COMSOL software. The results show that the insertion loss of each port of SP7T MEMS switch is better than 0.45 dB@40 GHz, the isolation is better than 29.5 dB@40 GHz, the standing wave ratio is less than 1.45, and the volume is only 0.65 mm \times 0.5 mm \times 0.5 mm. This design can be integrated with filters, attenuation resistors, antennas, etc. It can be used in multi-channel tunable MEMS devices, and has certain application value in satellite communication, radar and microwave test systems.

Keywords: single pole seven throw switch; MEMS; meter-shaped power divider; small size; low insertion loss

0 引言

微机电系统(micro-electro mechanical system, MEMS)是指在微米级设计和制造的系统^[1],适合于低成本的大规模生产^[2]。它可以实现机械、电子、材料、光学、生物等多个学科交叉融合,满足当代通信系统微型化、小型化、集成化的需求^[3]。MEMS 开关是 MEMS 器件中最基础的电子元器件^[4],相较于传统半导体开关, MEMS 开关具备高隔离、高线性度、低损耗、小体积等优势^[5]。基于这些优势, MEMS 开关可替代传统半导体开关成为射频微波系统中不可或缺的一环^[6]。MEMS 单刀多掷开关可与滤波器、衰减电阻、

天线等 MEMS 器件集成^[7],应用于多通道可调谐 MEMS 器件中^[8],实现 MEMS 多功能微系统的设计,可广泛应用于卫星通信、雷达、和微波测试等领域^[9]。

目前,许多单位对 MEMS 单刀多掷开关展开了研究。其中,关于宽频带、小体积、微波性能优良的 MEMS 单刀七掷开关的研究较少。2015年,美国加州大学圣地亚哥分校设计并加工了一款单刀七掷开关^[10],其工作频率为 0.1~10 GHz,插入损耗在 1.2 dB 以内,隔离度高于 19 dB,器件尺寸为 0.61 mm \times 0.61 mm,从数据来看,此开关的尺寸较小,但是损耗过大,隔离度也未有较大优势。2017年,印度

收稿日期:2021-12-29

* 基金项目:2020年装备发展部型谱项目(2006WW0011)资助

技术研究所电子应用研究中心协同美国微波公司设计并制作了高达 X 波段频率的射频微机电系统单刀多掷(SP3T~SP14T)开关^[11],其中,单刀七掷开关的工作频率为 0~12 GHz,SP7T 开关的总面积为 0.8 mm×0.8 mm,当驱动电压为 64 V 时,开关下拉,在整个工作频段内,插入损耗 < 0.8 dB,隔离度仅有 18.2 dB。2019 年,印度理工学院设计并制作了面向 5G 应用的宽带、可靠且紧凑的横向 MEMS SP4T 和 SP7T 交换网络^[12],SP7T 开关的实测平均回波损耗大于 12 dB,信号传输最差端口的平均插入损耗小于 5.9 dB,隔离性能优于 21 dB。2021 年,印度理工学院和美国微波公司设计并制作了一款 SP7T 开关^[13],该开关采用横向静电驱动设计,测试的平均回波损耗 > 11.3 dB,插入损耗 < 5.94 dB,隔离度大于 22 dB,工作频率最高可达 30 GHz,SP7T 开关的总面积为 1 mm×0.89 mm。

本文针对当代通信系统大容量、高频段、多通道、智能化、微型化、轻量化、低功耗化的发展需求,设计了一种小体积、高隔离、低插损、宽频段的 MEMS 单刀七掷开关,解决了当前 SP7T 开关频段窄、插损大、隔离低、体积大等问题,其工作频率在 L~Ka 波段,Ka 波段具有可用频段宽、吞吐量高的特点,可以提供更宽的频谱资源,实现更多的数据传输。通过优化该 SP7T 开关的射频 MEMS 开关单元及功分器结构,降低器件整体的插入损耗,提高回波损耗和隔离度。该 MEMS 单刀七掷开关为多通道选通系统的宽频带、微型化、集成化提供了一种设计思路。

1 原理分析

MEMS 单刀七掷开关的基本结构为射频 MEMS 开关,与传统的 PIN 开关相比较,射频 MEMS 开关具有损耗低、可靠性高、功耗小、尺寸小等优点^[14],可与其他网络单元或者器件构成射频 MEMS 组件,进而连接不同功能的 MEMS 组件构成多功能、微小型、低功耗的射频 MEMS 微系统^[15]。射频 MEMS 开关采用欧姆接触式 MEMS 开关,欧姆接触式 MEMS 开关闭合和断开两种状态的等效电路图如图 1 所示^[8]。其中, Z 是信号输入/输出端口的特征阻抗, C_p 是 CPW 信号输入/输出端的耦合电容, Z_s 是开关上电极的等效电阻, R_c 是在开关闭合状态下上电极和触点接触时的接触电阻, C_c 是在开关断开状态下上电极与信号线之间的耦合电容^[16]。

该 SP7T 开关的输入输出端口呈“米”字型分布均匀,通过控制不同通路上的射频 MEMS 开关单元的通断实现对应通路射频信号的输出。SP7T 开关的工作原理如图 2 所示。

2 结构设计

2.1 射频 MEMS 开关单元设计

本文设计的单刀七掷 MEMS 开关由射频 MEMS 开关以及功分器组成。通过对端口进行 50 Ω 阻抗匹配,优化上

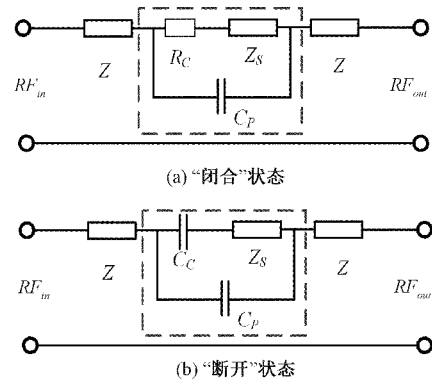


图 1 欧姆接触式 MEMS 开关等效电路图

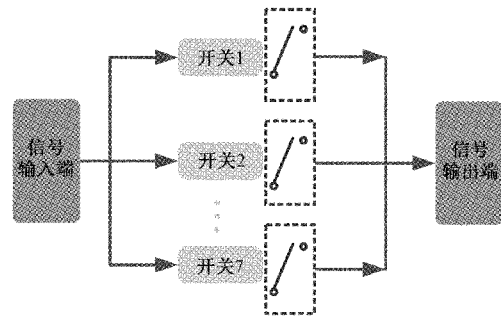
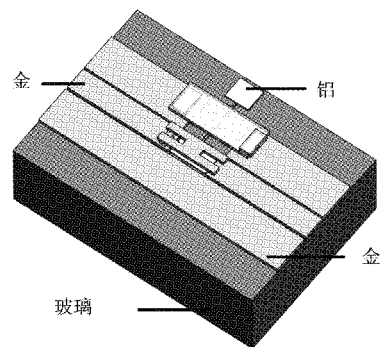
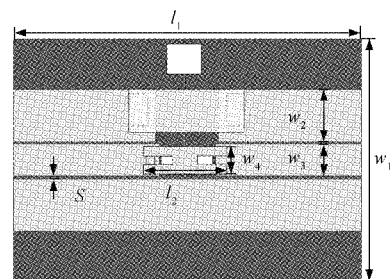


图 2 SP7T 开关工作原理

电极结构等途径完成射频 MEMS 开关的设计,构建 HFSS 模型如图 3 所示。通过对该射频 MEMS 开关的参数尺寸进行仿真优化,确定了开关结构的最优尺寸,包括衬底厚度、上电极的长度、宽度和厚度等关键参数,其结构参数如表 1 所示。



(a) 三维图



(b) 俯视图

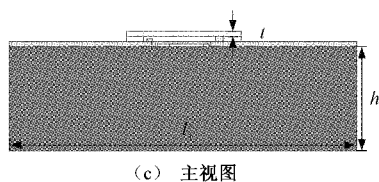


图3 射频MEMS开关的仿真模型

表1 射频MEMS开关参数尺寸

参数	数值/ μm
衬底厚度 h	500
上电极长度 l_2	80
上电极厚度 t	2
上电极宽度 w_1	50
信号线宽度 w_3	60
地宽度 w_2	100
信号线到地的间隙 S	7.5
上电极与触点之间的间隙 d	0.5
开关长度 l_1	662.5
开关宽度 w_1	460

此射频MEMS开关的S参数仿真结果如图4所示,在1~40GHz的工作频段内,开关的插入损耗 $<0.16\text{ dB}$,隔离度 $>24.5\text{ dB}$ 。本文采用COMSOL软件模拟射频MEMS开关上电极在垂直方向的位移,仿真如图5所示。可以看出,其最大位移可达 $2\mu\text{m}$ 。由射频MEMS开关的S参数及上电极位移的仿真结果看,该射频MEMS开关在Ka波段内也具备优良的射频性能和机械性能,适用于频段更宽、吞吐量更高、数据传输量更大的MEMS器件的设计。

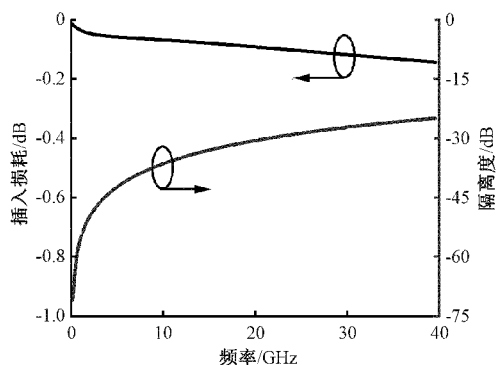


图4 仿真结果

2.2 “米”字型功分器设计

功率分配器是多端口无源微波器件,在现代通信系统中必不可少,用于微波和毫米波系统中的功率分配或功率组合,能够将输入的电磁信号按比例分成两个(或多个)信号输出^[17]。通常用于通信系统中的天线、多路复用器、滤波器和放大器等设备的功率分配,通信系统的整体性能会受到系统内功率分配器特性的显著影响^[18]。

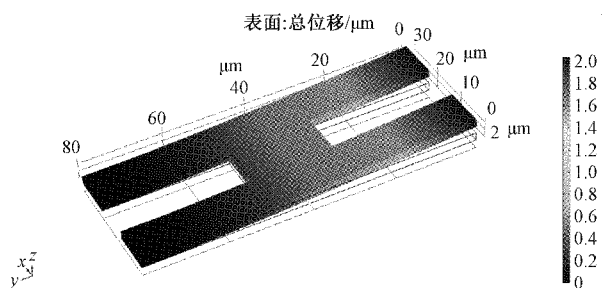


图5 上电极位移示意图

当单刀七掷MEMS开关的输出端口设计在一个方向上时,容易想到采用T型功分器的变形结构,即“爪”型结构的功分器,本文采用“爪”型结构的功分器与射频MEMS开关级联进行单刀七掷MEMS开关的设计,其结构如图6所示。由于其输出端口在同一个方向,与其他器件级联后,结构堆积在同一方位,难以实现小型化,并且相邻通道的信号较易互相干扰,致使整个器件产生大的损耗^[19]。

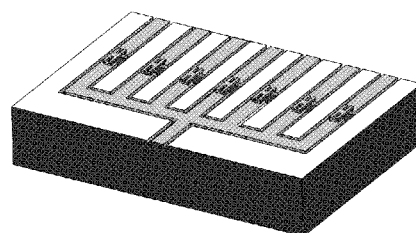


图6 单刀七掷MEMS开关仿真模型

因此,针对“爪”型功分器集成度低、体积大、损耗大等问题,本文又想到采用一种新型的“米”字型功分器进行信号分配,将“爪”型功分器和“米”字型功分器分别与H形射频MEMS开关进行级联仿真。由于第4端口的信号线与信号输入端直接相连,理论上第4端口具有各个端口中最低的插入损耗,因此,本文比较了两种单刀七掷MEMS开关第4端口的插入损耗,其比较结果如图7所示。

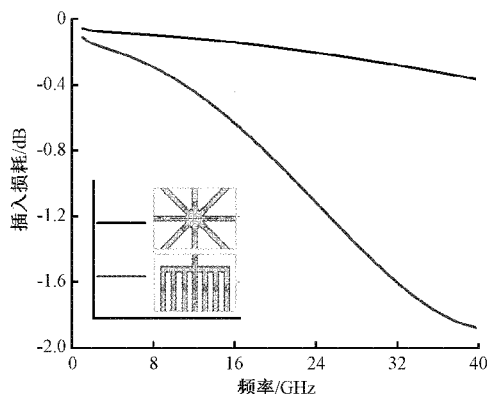


图7 两种单刀七掷MEMS开关第4端口的插入损耗

在1~10GHz的频率范围内,“爪”型功分器第4端口的插入损耗高达 1.8 dB ,”米”字型功分器第4端口的插入损耗小于 0.4 dB ,从仿真结果可以看出,“米”字型功分器第

4 端口的插入损耗远远小于“爪”型功分器第 4 端口的插入损耗,“米”字型功分器比“爪”型功分器的功分效果更好。

2.3 MEMS 单刀七掷开关设计

本文采用“米”字型功分器与 H 形射频 MEMS 开关级联进行单刀七掷 MEMS 开关的设计,“米”字型 MEMS 单刀七掷开关方案 1 的整体结构如图 8 所示,器件整体呈长方形。经仿真发现方案 1 的设计可实现高频段微波信号传输。

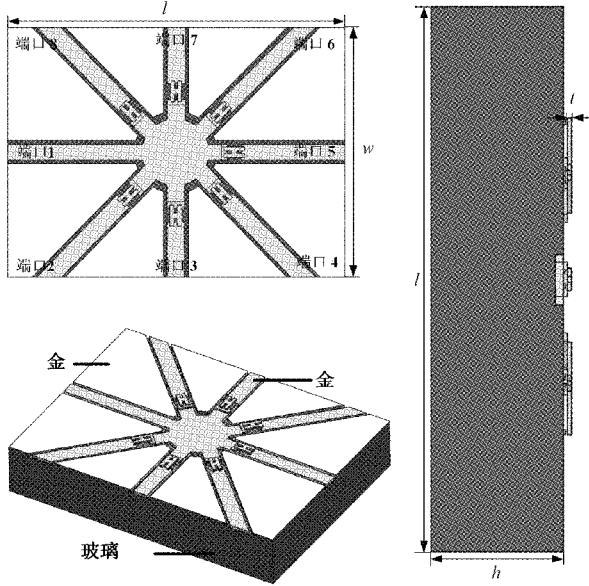


图 8 “米”字型单刀七掷 MEMS 开关方案 1 模型

由于方案 1 中第 2、4、6、8 通道的信号线位置特殊,端口处的信号线宽度比输入输出端口进行 50 Ω 阻抗匹配的导线略宽,因此,为了解决这 4 个端口信号线无法阻抗匹配的问题,本文进行了“米”字型 MEMS 单刀七掷开关方案 2 的设计,其整体结构如图 9 所示,器件整体呈八边形,各端口可完成 50 Ω 阻抗匹配。

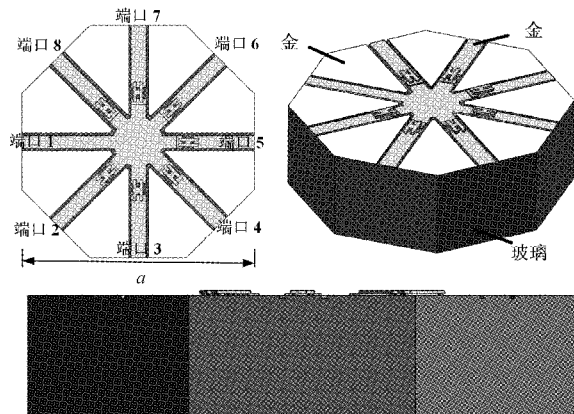
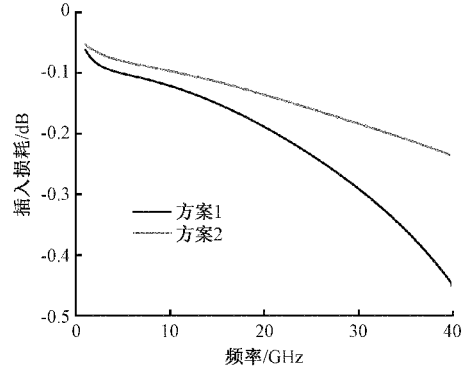


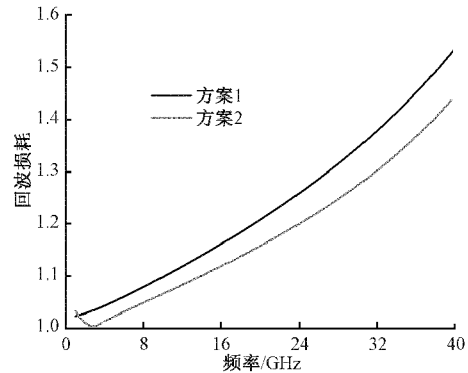
图 9 “米”字型单刀七掷 MEMS 开关方案 2 模型

本文以端口 2 导通为例来验证两种方案的优劣,端口 2 导通时的插入损耗和驻波比对比如图 10 所示。方案 1 结构的插入损耗为 0.5 @ 40 GHz,驻波比为 1.5 @ 40 GHz,

方案 2 结构的插入损耗为 0.3 @ 40 GHz,驻波比为 1.4 @ 40 GHz。可以看到,相较于方案 1,方案 2 的插入损耗改善了 0.2 @ 40 GHz,驻波比降低了 0.1 @ 40 GHz。由于方案 2 结构的所有端口进行了 50 Ω 阻抗匹配,所以信号线的损耗较小,信号传输能力更佳,因此,选取方案 2 作为“米”字型单刀七掷 MEMS 开关的设计。



(a) 插入损耗对比图

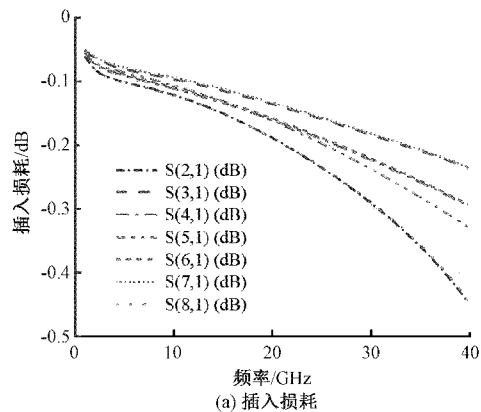


(b) 驻波比对比图

图 10 端口二导通时的 S 参数结果和驻波比对比

3 仿真分析

本文通过 HFSS 仿真软件对 MEMS 单刀七掷开关的结构进行仿真模拟,得到 MEMS 单刀七掷开关的 S 参数仿真结果,如图 11 所示。其中,图 11(a)~(b)分别表示的是单刀七掷开关的插入损耗及隔离度的 S 参数仿真结果,图 11(c)为各个端口的驻波比。表 2 为单刀七掷开关仿真结果。



(a) 插入损耗

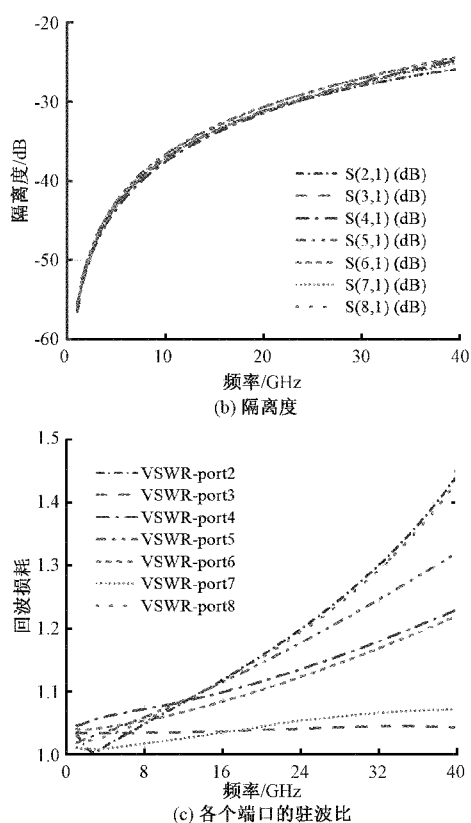


图 11 单刀七掷开关的 S 参数仿真图

从单刀七掷开关仿真结果可以看出,在 1~40 GHz 的频率范围内,在每个开关单独工作时,开关导通时插损均低于 0.45 dB@40 GHz,开关断开时隔离均高于 28 dB@40 GHz,信号传输最好的通路的插入损耗为 0.23 dB@40 GHz,隔离度最高为 30.89 dB@40 GHz,驻波比最大为 1.44,驻波比最小为 1.04。插入损耗和隔离度反映开关在闭合及断开状态下信号的衰减情况,驻波比反映 MEMS 开关闭合时信号的反射性能,驻波比越接近 1,说明被反射回来的信号越少,器件的传输能力越强,阻抗匹配的一致性越好,以上数据表明此开关在 1~40 GHz 的频率范围内具有良好的射频性能,而且具有较好的微波信号传输能力。

近几年,基于 MEMS 技术的单刀七掷开关的发展非常迅速,众多关于射频 MEMS 七掷开关的研究已经取得不错的成果,单刀七掷开关近几年的发展现状如表 3 所示。总体来说,本文设计的单刀七掷开关结构简单,插入损耗小,各支路隔离度高、驻波比一致性较好,与当前已有成果相比,本设计具有低损耗、高隔离、宽频段、小体积等优点。

4 工艺流程设计

为验证本设计方案的可行性,将对射频 MEMS 单刀七掷开关中的单掷开关结构进行预实验。选用 BF33 玻璃作为开关衬底,其厚度为 500 μm ,工艺方案采用 6 层掩膜,经 6 次光刻完成。射频 MEMS 开关具体工艺流程过程如图 12 所示。

表 2 单刀七掷开关仿真结果

工作端口	端口 S 参数(@40 GHz)/dB							驻波比
	端口 2	端口 3	端口 4	端口 5	端口 6	端口 7	端口 8	
端口 2	0.45	29.72	28.74	28.36	28.79	28.54	29.46	1.44
端口 3	30.36	0.23	30.15	29.23	28.97	28.82	29.10	1.04
端口 4	30.44	30.54	0.29	30.22	30.14	29.25	29.64	1.23
端口 5	29.39	30.40	30.09	0.33	30.56	30.51	29.69	1.32
端口 6	29.63	29.60	29.36	29.62	0.29	30.14	30.89	1.22
端口 7	29.25	29.20	29.37	29.60	30.65	0.23	30.79	1.07
端口 8	29.10	29.00	28.20	28.10	29.00	29.40	0.44	1.43

表 3 单刀七掷开关的比较

年份	工作频段/ GHz	插入损耗/ dB	隔离度/ dB	尺寸/ mm×mm
2015 ^[10]	0.1~10	≤1.2	≥19	0.61×0.61
2017 ^[11]	0~12	≤0.8	≥18.2	0.8×0.8
2019 ^[12]	0~30	≤5.9	≥21	—
2021 ^[13]	17~30	≤5.9	≥22	1×0.89
本文*	1~40	≤0.5	≥29	0.65×0.5

注: * 表示仅理论仿真。

1) 备片。将玻璃片放置在有清洗溶液的器皿中,加热至沸腾进行清洗,待溶液自然冷却至室温将晶圆取出,然后用去离子水冲洗 5~10 次,完成清洗,使得玻璃片变得洁净,清洗完成的玻璃片如图 12(a)所示。

2) 在图 12(a)所示的玻璃片上制作开关的凸点。采用 PECVD 沉积 SiN_x 薄膜,工作温度为 350 $^{\circ}\text{C}$,生长 0.4 μm 的氮化硅,如图 12(b)所示,旋涂正胶 30 s,用反应离子刻蚀机刻蚀氮化硅 2 min,再用丙酮去光刻胶,在超声机中清洗 5 min 后,完成凸点制作,如图 12(c)所示。

3) 制作驱动电极、Pad 和划片槽。通过磁控溅射来溅射一层厚度为 300 μm 的铝金属,并且通过光刻和湿法蚀

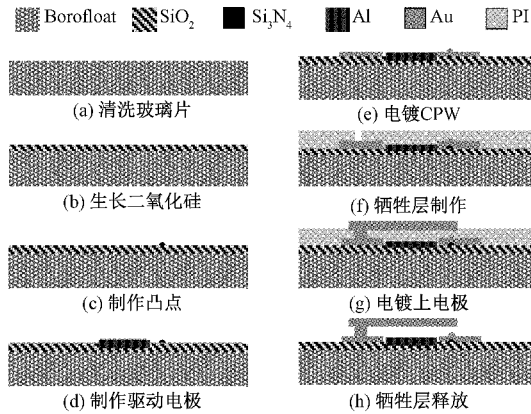


图 12 射频 MEMS 开关的工艺流程

刻来制造驱动电极,如图 12(d)所示。

4)采用 PECVD 沉积制作氮化硅介质层,沉积时间为 4 min。

5)制作 CPW。在晶片上通过电镀 $2\ \mu\text{m}$ 厚度的 Au,完成 CPW 电镀,如图 12(e)所示。

6)刻蚀氮化硅介质层显出 PAD。首先正胶光刻,然后刻蚀氮化硅,去除光刻胶,开窗露出铝 Pad。

7)制作牺牲层。本步工艺采用聚酰亚胺作为牺牲层材料。用匀胶机以低转速 30 s (500 rad/min),高转速 (3 000 rad/min) 10 s 的环境参数旋涂约为 $4\ \mu\text{m}$ 厚的聚酰亚胺牺牲层,然后曝光、显影、烘烤聚酰亚胺牺牲层,形成上电极的锚点,如图 12(f)所示。

8)制作上电极。在该牺牲层上,电镀厚度为 $2\ \mu\text{m}$ 的悬臂金层,电镀上电极,如图 12(g)所示。

9)释放牺牲层,如图 12(h)所示,通过氧等离子体蚀刻释放牺牲层,并多次释放,确保牺牲层释放干净。

10)划片,裂片。完成射频 MEMS 开关样品的制作。

上电极是 MEMS 开关的关键部件,上电极成功与否关乎射频 MEMS 单刀七掷开关性能的好坏,由于牺牲层平整度影响上电极的形状,牺牲层平整度差,上电极会严重变形,导致开关加工失败。因此,如果采用聚酰亚胺作为牺牲层材料,改善其平整度是非常有必要的。因此牺牲层工艺是 MEMS 开关的核心工艺。聚酰亚胺牺牲层的厚度由旋涂参数决定,因此不同批次的 MEMS 开关的牺牲层厚度极易出现误差,进而影响 MEMS 开关一致性。因此,为得到一致性良好的 MEMS 开关,本文进行了多次流水,探索出了最佳的上电极制作工艺参数,为单刀七掷开关后续加工提供工艺参数支持。

本文采用射频探针台、PNA-X N5242B 型网络分析仪、直流电源、波形发生器等仪器设备对所加工的 MEMS 开关结构的射频性能进行测试,其中插入损耗和隔离度的测试结果如图 13 所示。结果表明,0~20 GHz 频率范围内,全波段隔离度大于 20 dB,在 20 GHz 处隔离度可达 30 dB;全波段插入损耗小于 0.38 dB,在 10 GHz 处插入损

耗为 0.25 dB。本文设计的开关上电极结构为 H 型,相较于传统的球拍式结构来讲,具有结构简单、工艺加工难度较低、一致性及弹性性能较好等特点,使其整体指标优于现有传统水平。本次预实验的测试结果为后续单刀七掷开关的加工及测试提供了可行性依据。

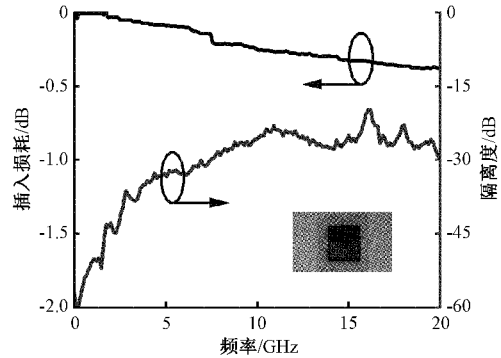


图 13 射频 MEMS 开关测试结果

5 结 论

本文通过优化单刀单掷 MEMS 开关单元、设计米字新型功分器结构等,提出了一种基于“米”字型新结构的射频 MEMS 单刀七掷开关,该开关具有工作频率宽、低插损、高隔离和小体积的优势,解决了现有的射频 MEMS 单刀七掷开关工作频率窄、损耗高、隔离度低等技术问题。在 1~40 GHz 频率范围内,7 个端口的插损均 $\leq 0.45\ \text{dB}$,7 个端口的隔离均 $\geq 29.5\ \text{dB}$,驻波比均 ≤ 1.45 ,整个器件的尺寸为 $0.65\ \text{mm} \times 0.5\ \text{mm} \times 0.5\ \text{mm}$,设计指标符合卫星通信领域的应用需求,并对其最重要的射频 MEMS 开关单元进行了预实验,经测试发现其射频性能达到了预期结果,后续将对 MEMS 单刀七掷开关开展工艺研究与验证。

参考文献

- [1] WANG S S, WU Q N, GAO Y S, et al. A novel multifunctional electronic calibration kit integrated by MEMS SPDT switches[J]. China Physics B, 2021, 30(11): 118501.
- [2] 王姗姗, 吴倩楠, 李强, 等. K 型单刀四掷射频 MEMS 开关设计[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(4): 70-73.
- [3] 范丽娜, 吴倩楠, 王姗姗, 等. 一种雪花型 MEMS 单刀五掷开关的研究与设计[J]. 微电子学, 2021, 51(4): 533-538.
- [4] LI M W, ZHANG Y F, ZHAO Y, et al. Design and fabrication of a 4-bit RF MEMS attenuator with a high attenuation accuracy[J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2020, 102(7): 1-8.
- [5] 何宇红, 马哲旺, 杨雪霞, 等. 基于微带三模谐振器的

- 超宽带带通滤波器设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(5):148-153.
- [6] 王耀利, 张凯旗, 张翀, 等. 一种低损耗射频 MEMS 器件测试夹具设计研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(9):106-110.
- [7] 黄成远, 张斌珍, 段俊萍, 等. RF MEMS 开关的研究进展及其应用[J]. 微纳电子技术, 2018, 55(9):652-659.
- [8] 韩路路, 吴倩楠, 王姗姗, 等. 基于 RF MEMS 开关的交指型可切换带通滤波器设计[J]. 微电子学, 2021, 51(1): 106-111.
- [9] 张一飞, 李孟委, 吴倩楠. 一种基于高阻硅衬底的高精度 RF MEMS 衰减器设计[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2019, 40(3):269-275.
- [10] YANG H H, YAHIAOUI A, ZAREIE H, et al. Symmetric and compact single-pole multiple-throw (SP7T, SP11T) RF MEMS switches[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2014, 24(3): 685-695.
- [11] DEY S, KOUL S K, PODDAR A K, et al. Extensive performance evaluations of RF MEMS single-pole-multi-throw(SP3T to SP14T) switches up to X-band frequency [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2017, 27(1): 1-10.
- [12] XU J, LIU F. Coaxial feeding BPF integrated SP7T switch[C]. IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Singapore, 2019: 959-961.
- [13] DEY S, KOUL S K, PODDAR A K. 17 ~ 30 GHz reliable and compact analog phase shifter using lateral micromachined SP7T switches, and DMTL arrays[J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2021, 116: 157-169.
- [14] 刘秋慧. 面向 5G 通信应用的射频 MEMS 开关设计与制造关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [15] LI M W, LIU Q H, WU Q N, et al. Broadband radio frequency MEMS series contact switch with low insertion loss[J]. Microsystem Technologies, 2019, 25: 1619-1625.
- [16] JIAO L, WU Y, LIU Y, et al. Wideband filtering power divider with embedded transversal signal-interference sections[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2017, 27(12): 1-3.
- [17] LIU Q, WANG J, ZHU L, et al. Design of a new balanced-to-balanced filtering power divider based on square patch resonator [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 27(12): 5280-5289.
- [18] YIN X, MA X, WANG X, et al. Analysis and design of Ka-band SPST PIN switch in unilateral fin-line[C]. 2015 IEEE International Conference on Communication Problem-Solving (ICCP), Guilin, China, IEEE, 2015: 175-177.
- [19] 牛同锋, 周渝淞, 屈纯. 基于 MEMS 传感器的运动加速度提取技术研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(7): 130-134.

作者简介

吴倩楠(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为射频微机电器件、电磁超材料。

E-mail: qiannanwoo@nuc.edu.cn

范丽娜, 硕士, 主要研究方向为射频 MEMS 设计及测试。

E-mail: 13838267262@163.com