

一种 X 波段三叉 H 型低电压 RF MEMS 开关设计

南敬昌* 高飞 李德润 翟雷应 李朝启 刘世泽
(辽宁工程技术大学电子与信息工程学院 葫芦岛 125100)

A Design of X Band Three-Support H Type Low Voltage RF MEMS Switch

NAN Jingchang*, GAO Fei, LI Derun, ZHAI Leiyang, LI Zhaoqi, LIU Shize
(Electronics and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125100, China)

Abstract In response to the application requirements of low voltage, high isolation and low insertion loss required by the RF circuit system, by exploring the influence of the positive pair area of the switch on the driving voltage, a three-support H-type RF MEMS switch applied in X-band was designed. The switch is supported by six beams to reduce the opening voltage of the switch by increasing the area of the upper plate. The RF performance and mechanical properties of the switch were simulated by HFSS and COMSOL, respectively. After the switch was finally optimized, the insertion loss was 0.26–0.57 dB, and the isolation was greater than 31.30 dB within 8–12 GHz. The optimal value is achieved at 10.1 GHz with an insertion loss of 0.40 dB and an isolation of 50.25 dB. The switching voltage is 11V, and the switching response time is 14 μ s. The switch can be combined with RF reconfigurable devices and applied to the new generation RF microwave field.

Keywords Radio-frequency micro-electro-mechanical system (RF MEMS) switch, Ansoft HFSS, COMSOL

摘要 针对射频电路系统所需要的低电压,高隔离度,低插入损耗的应用需求,通过对开关正对面积对驱动电压产生的影响进行探究,设计了一款应用于 X 波段三叉 H 型的 RF MEMS 开关。开关具有六条悬臂梁作为支撑,通过增大上极板面积来降低开关的开启电压。分别使用 HFSS 和 COMSOL 对开关的射频性能和机械性能进行仿真,开关最终优化后,在 8–12 GHz 内,插入损耗为 0.26~0.57 dB,隔离度大于 31.30 dB。在 10.1 GHz 达到最优值,插入损耗为 0.40 dB,隔离度为 50.25 dB。开关电压在 11V 时就能够实现状态转换,开关的响应时间为 14 μ s。此开关可与射频可重构器件结合,应用于新一代射频微波领域。

关键词 射频微机械开关 Ansoft HFSS COMSOL

中图分类号: TN703; TN631 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202212017

射频微机电系统(RF MEMS)是 MEMS 技术在射频领域的结合。这项技术可以使传统的射频器件和电路发生根本的变化。它的优势在微波性能、功率损耗和系统集成等方面。备受关注的是,RF MEMS 器件具有更小的尺寸。它们为集成到一块芯片或微系统上提供了可能,进而实现信息的获取、传输、处理和执行等功能,显著提高系统的性能。因此多年来,研究人员致力于 MEMS 技术^[1]。

在各式各样的 RF MEMS 器件中,RF MEMS 开关一般通过机械移动实现对信号传输的控制。RF

MEMS 开关的主要优点有:插入损耗低、隔离度好、线性化好、低功耗、微波特性好、尺寸小以及易集成^[2]。目前的射频通信系统中大量分立元件,例如电感、滤波器、移相器等等,这些元件成为限制系统尺寸进一步缩小的瓶颈。而 RF MEMS 开关给缩小系统尺寸带来了新的可能。因此 MEMS 开关具有重要的研究价值。

目前,常见的开关可以分成串联和并联两种。从开关实现开启、闭合两种状态的接触方式可以分为金属接触型和电容耦合型。2017 年,中北大学王

雄师^[3]提出了一种结型梁 RF MEMS 开关,其工作带宽为 15-60 GHz,插入损耗小于 0.15 dB,隔离度高达 52 dB,开关电压为 53 V。2018 年,印度理工大学 Dey Sukomal 等^[4]提出了一种用于移相器的开关,在 DC-35 GHz 时插入损耗<1.3 dB,隔离度>17.6 dB,开关电压高达 112 V。

针对目前 RF MEMS 开关存在的尺寸大、隔离度较低、开关电压过高等问题,本文提出了一种面向 X 波段的“三叉 H 型”并联电容式开关。

1 设计

1.1 原理

在驱动电压、弹性系数及其他条件均不发生变化的情况下,分别对如图 1 的三种悬臂梁方式进行射频仿真,两叉式每支悬臂梁宽度为 15 μm ,三叉式悬臂梁每支宽度为 10 μm ,四叉式悬臂梁每支宽度为 7.5 μm 。由图 2 结果可见,三叉式和四叉式的隔

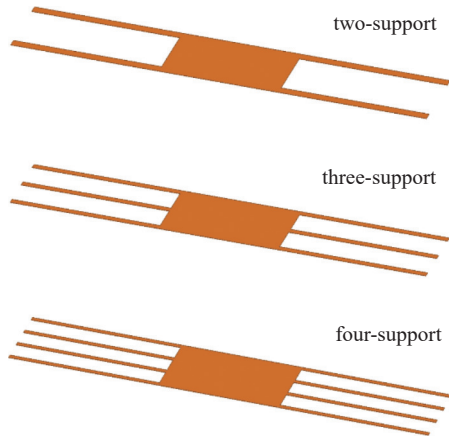


图1 两叉式、三叉式和四叉式结构

Fig. 1 Two-support, three-support and four-support structures

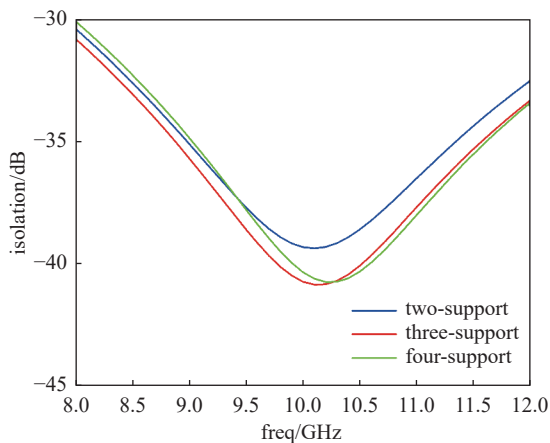


图2 三种结构的隔离度曲线

Fig. 2 The isolation curve of three structures

离度结果相差不大,考虑到工艺误差一定,在加工时尺寸越小,造成误差越大。最终综合考虑设计选择三叉式悬臂梁。

对于并联电容式开关,它的上极板与信号线交叠面积构成了平行板电容。如图 3、图 4 所示,初始状态下,梁与绝缘介质层距离为 g_0 ,即空气层厚度为 g_0 。设梁与下极板间距为 g 。且下极板(信号线)宽度为 D ,结合图 3 可知,上极板宽度为 w ,所以平行板电容器驱动面积 $A=w \times D$ 。 ϵ_0 是空气的介电常数。

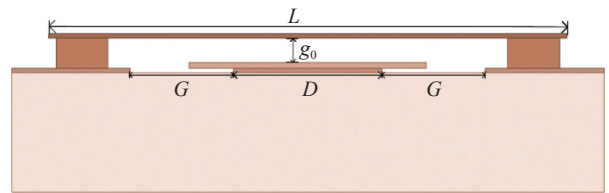


图3 并联电容式开关主视图

Fig. 3 Main view of shunt capacitive switch

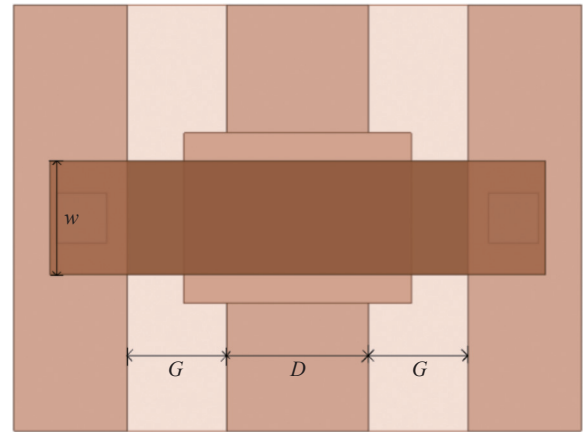


图4 并联电容式开关俯视图

Fig. 4 Top view of shunt capacitive switch

则,平行板电容为 C_p 、 F 为施加在上下极板间的电压是 V 时,梁受到的静电力:

$$C_p = \frac{\epsilon_0 A}{g} = \frac{\epsilon_0 w D}{g} \quad (1)$$

$$F = \frac{1}{2} V^2 \frac{dC(g)}{dg} = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 w D V^2}{g^2} \quad (2)$$

当开关电压慢慢加大时,静电力逐渐增加,梁桥向下弯曲,弹性回复力也逐渐增加。当两者相等时,达到临界点,此时梁桥达到平衡状态,得:

$$\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 w D V^2}{g^2} = k(g_0 - g) \quad (3)$$

解(3)式,阈值电压 V 得:

$$V = \sqrt{\frac{2k}{\epsilon_0 w D} g^2 (g_0 - g)} \quad (4)$$

$$k = \frac{32Et^3}{L^3} w + \frac{8\sigma(1-\nu)t}{L} w \quad (5)$$

k 是等效弹性系数, 式中 E 为上极板的杨氏模量, t 为上极板厚度, σ 为残余应力, ν 为泊松比。

由式(4)可知, 上极板正对面积会对开启电压产生影响。接下来对三种情况进行仿真, 第一种是增加上极板面积, 在标准面积上增加 4 个 $70 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 的矩形, 第二种是标准面积, 第三种是减小上极板面积, 在标准面积上减小 4 个 $70 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 的矩形。如图 5, 分别是增大面积、正常面积、以及减小面积的开关上极板示意图。

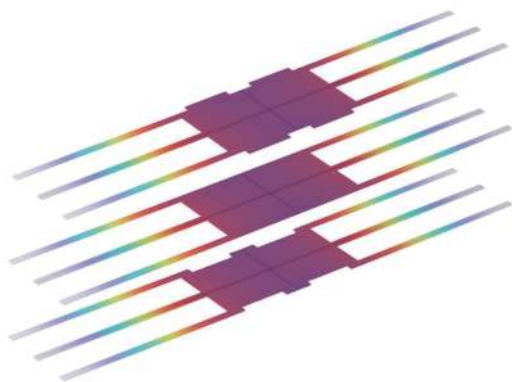


图5 3种情况下模型图

Fig. 5 Model diagram in 3 cases

经过仿真得到结果如图 6 所示。当施加电压一定时, 面积增加的模型位移变化量始终大于另外两种情况, 符合式(4)中所显示的规律。图 6(a)电压为 10 V 时, $0.68 \mu\text{m}$ 厚的悬臂梁中线随位置不同得到的 z 方向偏移量, (b) 是上极板中心点在不同电压作用下产生的 z 方向偏移量。(c) 是悬臂梁厚为 $2 \mu\text{m}$ 时的线图, 同时还进行了悬臂梁为厚 $4 \mu\text{m}$ 时的仿真, 结果均与前面所述规律一致。这给本设计提供了方向, 在确定增加面积的方案后, 在上极板上增加若干释放孔, 以便于牺牲层的释放。

1.2 设计结构

本文设计的开关结构采用 SiO_2 衬底, 其相对介电常数为 3.9, 衬底厚度为 $160.8 \mu\text{m}$ 。介质层采用氮化硅薄膜, 相对介电常数为 7。释放孔是边长为 $2.4 \mu\text{m}$ 的正方形, 间距为 $7.4 \mu\text{m}$ 。采用 CPW 形式进行微波信号的传输, 为了实现输入和输出端的特性阻抗为 50Ω , 采用 Agilent ADS 中 Linecalc 工具计算

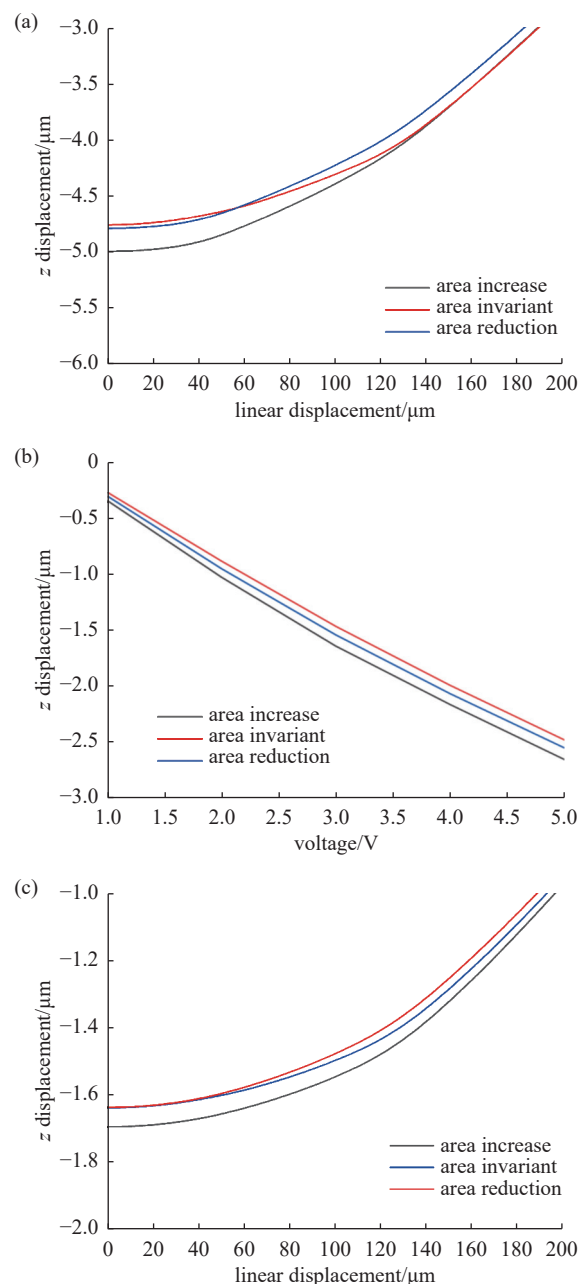


图6 不同因素对位移产生的影响。(a)电压一定 z 方向偏移量, (b)不同电压 z 方向偏移量, (c)电压一定 z 方向偏移量

Fig. 6 The influence of different factors on displacement. (a) Offset in a certain z direction of the voltage, (b) offset in a different z direction of the voltage, (c) offset in a certain z direction of the voltage

得到信号线宽度 W 为 $332 \mu\text{m}$, 信号线与地线间隔为 $115 \mu\text{m}$, 计算得到的特性阻抗为 50.06Ω 。在地线上有六个锚区, 固定上极板, 采用三叉式悬臂梁, 材料为 Au。为了尽量降低电压, 在上下左右加上相同四个矩形面积。并在上极板上设计了若干释放

孔, 释放孔能够降低上极板运动时的空气阻尼, 更能得到更小的驱动电压并且利于加工。整体结构如图 7。

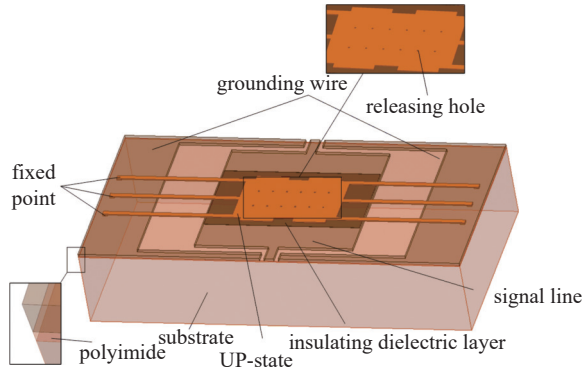


图7 MEMS 开关结构图

Fig. 7 MEMS switch structure diagram

2 射频传输特性分析

本小节使用 Ansoft HFSS 软件, 分别对开关的绝缘介质层、空气层、上极板进行了优化。

2.1 对绝缘层厚度进行优化

如图 8, 对介质层厚度 h_j 进行参数化扫描, 随着绝缘介质层厚度 h_j 的不断增大, 插入损耗变化不大, 开关“闭合”状态下的中心频率不断增大。考虑到开关设计中心频率为 10 GHz 以及 MEMS 的制作工艺, 最终选取 $0.21 \mu\text{m}$ 作为一个性能上比较好的解, 同时工艺上可以实现。

2.2 对空气层进行优化

空气层的厚度是影响开关“开启”状态时插入损耗的重要指标。空气层的厚度过大带来过高的开启电压, 确定合适的空气层厚度至关重要。这里对不同的空气层厚度 g_0 进行扫描, 结果如图 9 所示。

随着频率的增加, 空气层厚度 g_0 越大, 越容易获得更小的插入损耗。由于空气层越大, 开启电压越大, 面向 X 波段, 综合考虑空气层厚度 g_0 设计为 $2 \mu\text{m}$ 。既获得了较高的电磁性能, 也使开启电压相对较小。

2.3 对上极板厚度进行优化

上极板的厚度影响着开关的参数及开启电压。如果上极板过厚, 会导致开启电压过大, 或者难以产生可以让开关闭合的位移程度。开关上极板过薄, 不易加工, 而且可能会导致可靠性较低, 甚至出

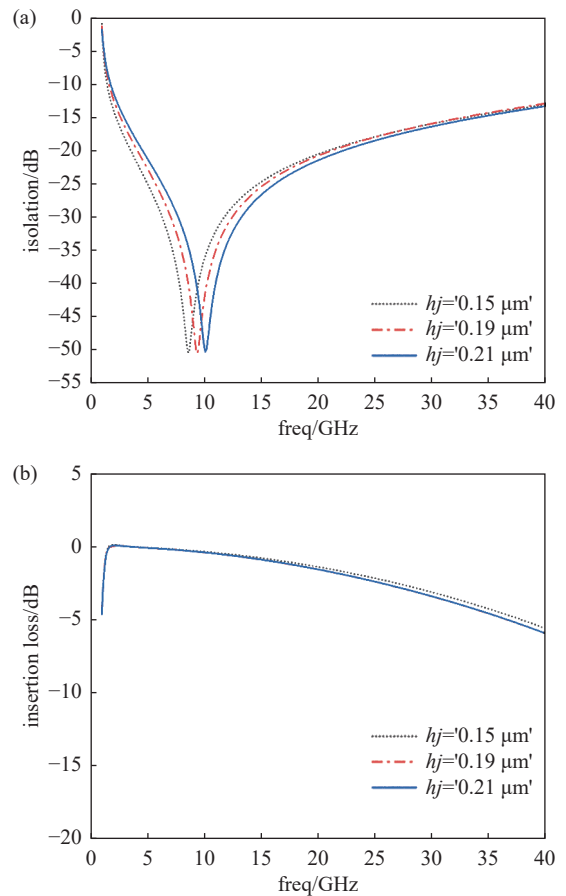


图8 不同“ h_j ”对射频性能的影响(a)不同“ h_j ”对隔离度的影响(b)不同“ h_j ”对插入损耗的影响

Fig. 8 Influence of different “ h_j ” on RF performance (a) the effect of different “ h_j ” on isolation and (b) the effect of different “ h_j ” on insertion loss

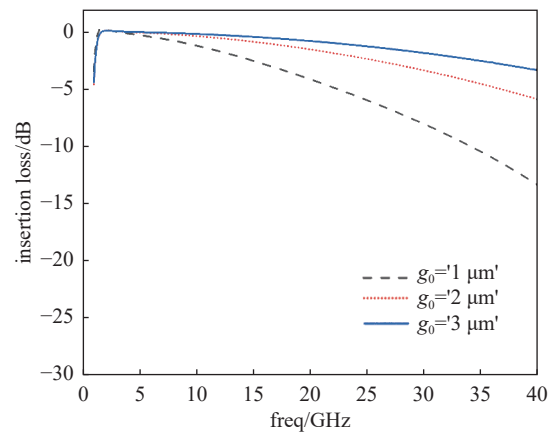


图9 不同“ g_0 ”对插入损耗的影响

Fig. 9 Influence of different “ g_0 ” on insertion loss

现加几次电压开关就会失效的情况。

如图 10 是在其他参数不变的情况下, 改变上极板厚度 h_{up} 的扫频结果。结果图显示几组代表数据。可以看出上极板厚度 h_{up} 影响着开关的隔

离度并且带来一定的频率偏移,厚度越大,隔离度越高。在中心频率为 10 GHz 的情况下,综合考虑开关开启电压能实现的位移和工艺能够实现的程度,最终确定上极板厚度 h_{up} 为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。

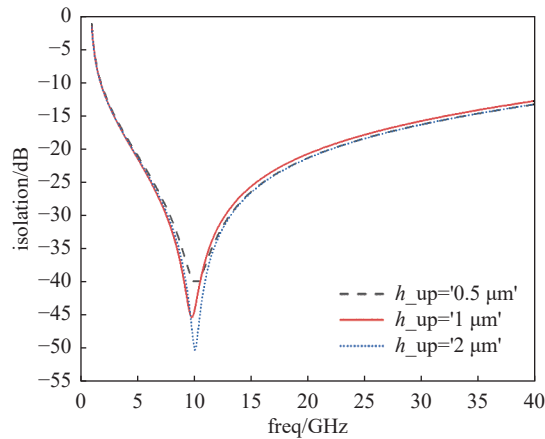


图10 “闭合”时不同“ h_{up} ”对隔离度的影响
Fig. 10 Influence of different “ h_{up} ” on isolation

2.4 射频仿真结果

优化后开关的俯视图和剖面图如图 11 和 12 所示,图中标注了尺寸变量。变量具体数值见表 1 所示。表中 h_j 为绝缘介质层厚度,在图中未进行标注。

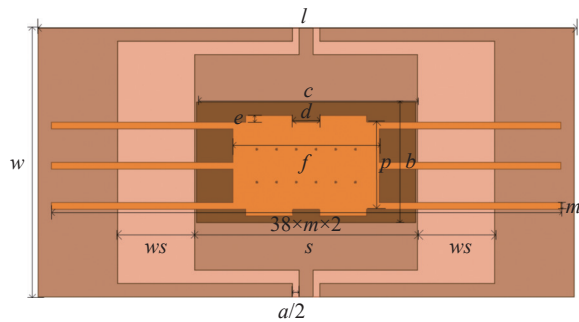


图11 开关结构俯视图
Fig. 11 Top view of switch structure

表 1 射频 MEMS 开关比较

Tab. 1 Comparison of RF MEMS switches

文献	年份	工作频段/GHz	插入损耗/dB	隔离度/dB
[5]	2015	8–12	低于 0.83	大于 18.5
[6]	2021	1–18	低于 0.41	大于 21
[7]	2022	7–16	低于 1.99	大于 18.30
本文	2022	8–12	低于 0.57	大于 31.30

如图 13 所示,开关优化后在 8~12 GHz 内,插入损耗为 0.26~0.57 dB(绝对值,下同),隔离度大于

31.30 dB。在 10.1 GHz 达到最优值,插入损耗为 0.40 dB,隔离度为 50.25 dB。如表 2 所示,与目前调研的 X 波段开关相比,开关具有隔离度高,插入损耗小,体积小等优点。

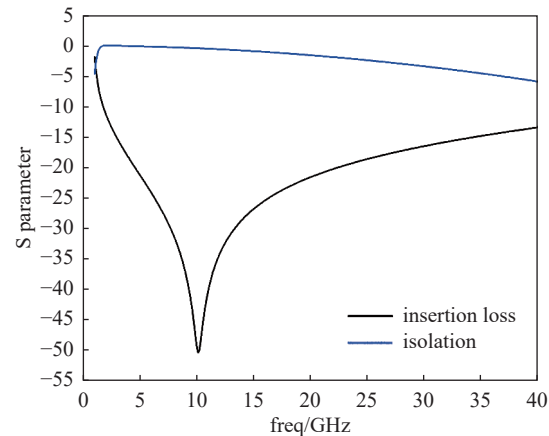


图13 优化后的射频性能
Fig. 13 Optimized RF performance

表 2 变量名称及数值

Tab. 2 The variable name and value

变量	数值/ μm	变量	数值/ μm	变量	数值/ μm
w	400	b	180	ws	115
l	800	c	327.5	hc	6
h	160.8	h_j	0.21	a	20
d	40	g_0	2	e	10
hp	2	h_{up}	2	f	218.3
s	332	m	10		

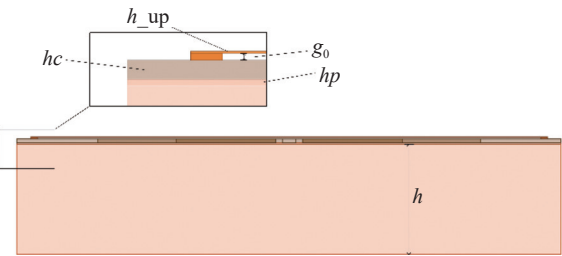


图12 切面图
Fig. 12 Section diagram

3 机械性能分析

3.1 开启电压

开关的开启电压指的是当上极板与绝缘介质层紧密接触时施加在信号线上的电压值,也叫做临界电压。这个临界电压会打破开关原有的平衡状

态。使用 COMSOL 对开关的开启电压进行了仿真, 仿真结果如图 14 所示。

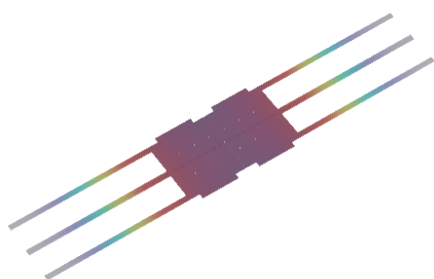


图14 COMSOL 软件仿真图

Fig. 14 COMSOL software simulation diagram

仿真空气层为 $2\text{ }\mu\text{m}$, 由图 15 可见, 开关在电压等于 10 V 时上极板中心点已经能够达到空气层所需的 $2\text{ }\mu\text{m}$ 位移量, 上极板宽度为 $218.3\text{ }\mu\text{m}$, 对称仿真时, 线图在 $110\text{ }\mu\text{m}$ 时即可实现上极板完全下拉, 没有边缘上翘的情况。即施加 11 V 电压时, 开关能够实现状态转换。在实际应用中, 可以取下拉电压的 1.4 倍为实际开启电压 15.4 V 。

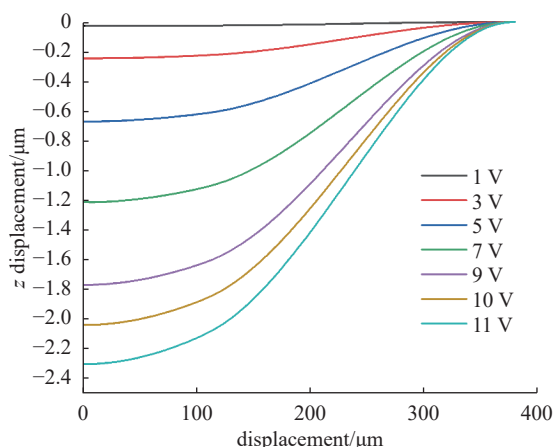


图15 不同电压下上极板产生位移

Fig. 15 Displacement of the upper plate occurs under different voltages

3.2 响应时间

对开关进行瞬态仿真, 结果如图 16, 开关的响应时间受所施加电压影响。施加 11 V 电压时, 开关响应时间为 $18\text{ }\mu\text{s}$, 施加 15.4 V 电压时, 开关的响应时间为 $15\text{ }\mu\text{s}$ 。

4 工艺流程

这里给出开关的制作流程, 具体见图 17。

(a)清洗石英基底。

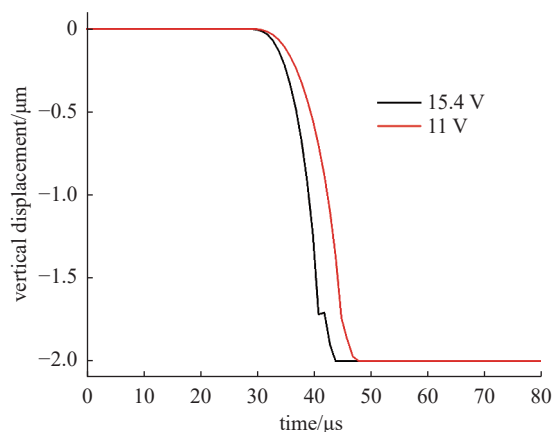


图16 响应时间曲线

Fig. 16 Response time curve

(b)采用涂胶机旋涂厚度为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的聚酰亚胺, 以降低衬底介质损耗。

(c)采用剥离工艺制作共面波导。首先光刻形成共面波导平面图形, 然后采用电子束蒸发镀膜设备沉积 Au 层, 作为种子层, 进一步采用电镀 Au 作为共面波导结构层, 厚度为 $6\text{ }\mu\text{m}$, 最后将石英晶圆置于丙酮溶液中, 完成剥离工艺, 形成 CPW 三维结构。

(d)采用 PECVD 的方法制备氮化硅薄膜电介质层, CPW 信号线与外界隔离。

(e)采用 PECVD 沉积二氧化硅绝缘层 $2\text{ }\mu\text{m}$, 光刻形成左右对称分布的 6 个锚点连接电极蚀刻窗口图形。采用 RIE 干法刻蚀, 去除锚点处的二氧化硅薄膜, 并采用探针测试确保锚点处的二氧化硅层去除干净。

(f)采用电子束蒸发 Au 种子层, 通过电镀工艺制作锚点连接层。

(g)采用 CMP 工艺研磨圆片, 在 CPW 上方形成 $2.21\text{ }\mu\text{m}$ 的牺牲层。

(h)采用电镀工艺形成 RF 开关悬臂梁结构层, 接着采用光刻形成悬臂梁结构的 Au 刻蚀掩膜图形, 悬臂梁的两端与锚点相连, 进一步与共面波导导通。采用 ICP 刻蚀形成 Au 悬臂梁结构。

(i)采用 BOE 溶液对牺牲层进行牺牲层腐蚀, 当 Au 悬臂梁下方的 SiO_2 层完全去除后, 在超临界设备中完成 Au 射频开关的最终无吸合释放。

5 结束语

本文通过理论分析结合仿真, 改变上极板的面积, 在普通开关基础上设计 H 型增大开关的上极板

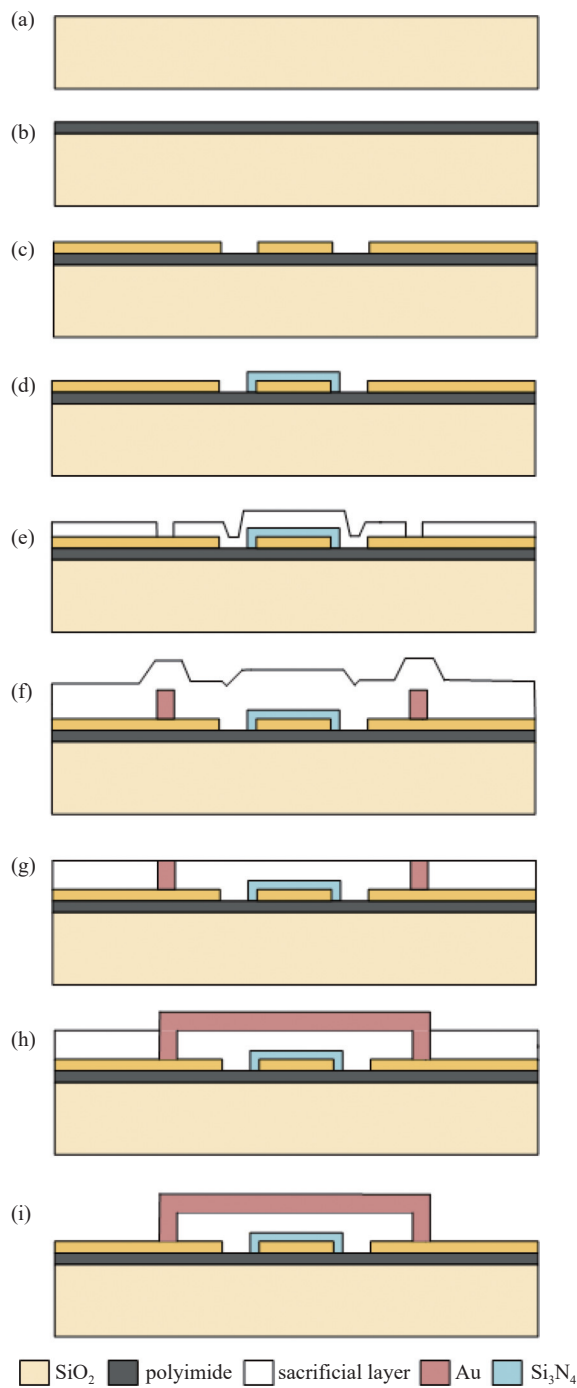


图17 工艺流程图

Fig. 17 Process flow diagram

面积,进而降低开关的开启电压,为设计 RF MEMS 开关结构,优化其性能提供了参考价值。使用 HFSS 和 COMSOL 对三叉“H”型开关的射频性能

和机械性能进行优化,在 8–12 GHz 内,插入损耗为 0.26~0.57 dB,隔离度大于 31.30 dB。在 10.1 GHz 达到最优值,插入损耗为 0.40 dB,隔离度为 50.25 dB。开关电压在 11 V 时就能够实现状态转换,开关的响应时间为 18 μ s。开关最终尺寸为 400 μ m $\times$ 800 μ m $\times$ 160.8 μ m,射频性能和机械性能均比较优异。

参 考 文 献

- [1] Mallikharjuna Rao Sathuluri G S, Lysenko I E, Tkachenko A V, et al. Design and analysis of RF MEMS switch for high-frequency applications[J]. International Journal of Engineering Trends and Technology, 2020, 68(12).
- [2] Huang Chengyuan, Zhang Binzhen, Duan Junping, et al. Research progresses and applications of RF MEMS switches[J]. Micronanoelectronic Technology, 2018, 55(09): 652–659 (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(09): 652–659(in chinese))
- [3] Wang Xiongshi, Zhang Binzhen, Duan Junping, et al. Design and numerical evaluation of novel micro bandwidth RF-MEMS parallel switch[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2017, 37(03): 341–344 (王雄师, 张斌珍, 段俊萍, 等. 一种宽频带 RF MEMS开关的设计研究[J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(03): 341–344(in chinese))
- [4] Dey S, Koul S K, Poddar A K, et al. Reliable and compact 3- and 4-bit phase shifters using MEMS SP4T and SP8T switches[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2018, 27: 113–124
- [5] Sun Rui, Liu Bin. X-band RF MEMS switch design and simulation[J]. Electronic Components and Materials, 2015, 34(11): 69–72 (苏锐, 刘斌. 一种X频段 RF MEMS开关的设计与仿真[J]. 电子元件与材料, 2015, 34(11): 69–72(in chinese))
- [6] Wang S S, Wu Q N, Gao Y S, et al. A novel multifunctional electronic calibration kit integrated by MEMS SPDT switches[J]. Chinese Physics B, 2021, 30(11): 118501
- [7] Han L L, Wang Y, Wu Q N, et al. A novel low-loss four-bit bandpass filter using RF MEMS switches[J]. Chinese Physics B, 2022, 31(1): 018506