

A Broadband Ohmic RF MEMS Switch *

YU Yuan-wei^{1,2*}, JIA Shi-xing¹, ZHU Jian^{1,2}, CHEN Chen^{1,2}

1. Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China;
2. National Key Lab. of Monolithic Integrated Circuits and Modules, Nanjing 210016, China

Abstract : A broadband electrostatic-driven direct-contact series MEMS switch is present, composed of a coplanar waveguide (CPW) line, two folded U-shape cantilevers, two metal contact pins and one anchor. To improve the switch's reliability, the mechanical parameters are optimized for fine ohmic contact, no stiction between the beam and the actuation electrodes and low-actuation voltage. The switch, which has 3 ports, is fabricated on 400 μm thick silicon substrate by low temperature metal-dielectric surface micromachining process. And its chip size is 0.8 mm \times 0.9 mm. The measured intrinsic loss of the switch is 0.1 dB (equivalent resistance $R_s = 0.6 \Omega$) and the measured isolation is 24.8 dB (off-state capacitor $C_u = 6.4 \text{ fF}$) at 6 GHz. The switch exhibits good mechanical properties with switching time of 47 μs and wide actuation voltage of 20-60 V.

Key words : RF MEMS switch; Metal-contact; Broadband; Wide-actuation voltage
EEACC : 2575; 2180B; 1350F

宽带直接接触式 RF MEMS 开关 *

郁元卫^{1,2*}, 贾世星¹, 朱健^{1,2}, 陈辰^{1,2}

(1. 南京电子器件研究所, 南京 210016; 2. 单片集成电路与模块国家级重点实验室, 南京 210016)

摘要 : 本文提出一种静电驱动直接接触式宽带 MEMS 开关, 包含 CPW 传输线、双 U 型金属悬臂梁、触点和锚区, 兼顾了开关接触可靠、克服微结构粘连和低驱动电压三大结构可靠性设计因素。本开关为三端口开关, 使用低温表面微机械工艺, 制作在 400 μm 厚的高阻硅衬底上, 芯片尺寸 0.8 mm \times 0.9 mm。样品在片测试结果表明, 在 6 GHz 频点, 开关本征损耗 0.1 dB, 隔离度 24.8 dB, 等效开关接触电阻 0.6 Ω , 关态电容 6.4 fF, 开关时间 47 μs , 开关驱动电压为 20-60 V。

关键词 : 射频微机电开关; 直接接触式; 宽带; 宽驱动电压

中图分类号 : TN385; TN402

文献标识码 : A

文章编号 : 1004-1699(2008)04-0688-04

近几年来, MEMS 开关由于其低插损、高隔离、线性度极好和低功耗的优点, 并且由于是射频系统最基本的器件, 引起了人们广泛的兴趣^[1-2]。直接接触式 MEMS 开关导通时由接触金属把信号线的输入和输出直接连接, 工作波段从直流到微波频段, 在多模式多频段的通信系统、工业、自动测试设备中有着广泛的用途, 是国内外研究的热点。目前美国 Teravicta 公司^[3]和 RMI 公司^[4]已公开出售 MEMS 开关, 采用静电激励方式, 电路接口类似 FET(场效应管)的三端口开关。

由于 MEMS 开关直接接触而引入的静摩擦力、

微连接等附着力和驱动开关的静电力大小相当时, 会导致开关工作不稳定或过早地失效。因此开关的可靠性, 如开关接触是否稳定可靠、微结构是否粘连以及焦耳热引起的触点损害的失效机理等, 是近期 MEMS 开关实用化方向研究热点^[4-6]。虽然开关触点材料的硬度和电流承载能力会明显影响器件的可靠性, 但微结构参数和电性能优化设计是直接接触式 RF MEMS 开关可靠性设计的基础。

本文给出了一种直接接触式开关的机电结构设计, 既满足开关接触可靠和克服微结构粘连的可靠性设计要求, 同时兼顾了 MEMS 开关低驱动电压的

基金项目: 单片集成电路与模块国家级重点实验室基金资助(9140C1405020607)

收稿日期: 2007-09-30 修改日期: 2008-02-21

要求,开关结构紧凑。

1 结构与 设计

设计的 MEMS 开关结构见图 1。包含 CPW 传输线、金属悬臂梁、双 U 型梁结构和锚区。结构原理类似于美国 RMI 开关^[4],驱动电极 G 位于金属悬臂梁下方,加上电压后,悬臂梁下拉,使射频 S 极同 D 极连通。采用了驱动电极与射频通路物理隔离的三端口结构形式,电路接口类似于 FET 开关,避免驱动信号对微波信号的干扰^[7]。

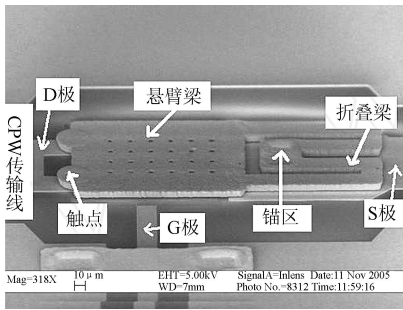


图 1 RF MEMS 开关 SEM 图

根据图 1 的开关结构示意图,在悬臂梁和驱动电极 G 之间加外加电压时,产生静电力。数值分析时把梁和下拉电极的结构简化为平行板电容模型,则开关结构受的静电力:

$$F_e = \frac{CV^2}{2g} = \frac{V^2}{2} \frac{0A}{g^2} \quad (1)$$

式中 V 是电压, g 是空气间隙, C 是上下驱动电极间的电容, A 是电极的有效面积。

MEMS 开关在下拉过程中, g 逐渐变小,静电力增大,但位移量的增大又引起开关结构弹性回复力增大,用公式表示为:

$$F_r = k_e g = k_e (g_0 - g) \quad (2)$$

式中 g₀ 为起始间隙, k_e 为梁结构的等效弹性系数,与所用的材料的杨氏模量 E、泊松比、薄膜的残余应力等参数有关。由于是厚梁设计,通过双 U 型折叠梁连接开关上极板悬臂梁,梁结构的弹性系数主要由折叠梁结构参数(梁长 l,梁宽 w,梁厚 t)决定,如不考虑残余应力因素,其弹性系数表示为^[2]:

$$k_e = Ew \left(\frac{t}{l} \right)^3 \quad (3)$$

当开关受到的静电力与弹性回复力平衡时,此时 g = 2g₀/3,过了这个位置就会迅速塌陷,此时电压为吸合电压或阈值电压:

$$V_p = \sqrt{\frac{8k_e}{27} \frac{0A}{g_0^3}} \quad (4)$$

激励电压一般取吸合电压的 1.2 ~ 1.4 倍,可以快速开启开关,开关时间表示为:

$$t_s = 3.67 \frac{V_p}{V_s} \sqrt{\frac{m}{k}} = 0.584 \frac{V_p}{V_s f_0} \quad (5)$$

上述分析的开关结构参数与开关可靠性设计考虑的参数间的对应关系列于表 1。

表 1 结构参数与静电力、回复力、吸合电压的关系

	静电力 F _e	回复力 F _r	吸合电压 V _p
弹性梁长 l	-	l ⁻³	l ^{-3/2}
弹性梁宽 w	-	w	w ^{-1/2}
弹性梁厚 t	-	t ³	t ^{3/2}
电极驱动面积 A	A	-	A ^{-1/2}
间隙 g	g ⁻²	g	g ^{3/2}

结构设计主要采用四种方法:厚梁和宽梁^[8]设计,提高结构刚度;在 D 极周围一定间隔包围着驱动电极,增加梁受力范围,增加静电力,使接触稳定;触点设计,既减小接触电阻,又使得开关接触时驱动电极上的介质层不会同上方的悬臂梁电极接触,避免金属与介质层界面上产生的附着力和排斥力,提高接触可靠性。为了获得低的驱动电压,使用了折叠梁结构,降低梁的弹性系数 k_e,降低吸合电压,但同时影响了器件的回复力 F_r,设计时需要折衷设计。

实际上由于开关结构的复杂性,一维数值分析方法只能起到简单的定性分析,本文采用 Coventorware 有限元分析软件进行机电耦合仿真。开关的吸合电压为 19.5 V,结构下拉时,最大应力 34 MPa,主要分布在 U 型折叠梁的拐角处(图 2)。

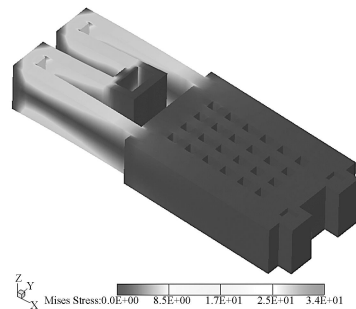


图 2 开关结构下拉应力分布图

开关驱动电压与触点接触力、结构回复力的关系仿真结果见图 3,可以看出驱动电压在 50 V 时,每个触点的接触力达到 45 μN,结构回复力为 20 μN。同时在结构仿真时发现,在开关驱动电压从 20 V 变化到 60 V,开关的触点与 D 极相连,由于开关悬臂梁结构刚性强,不发生下榻,即开关的上极板和驱动电极不会接触,因此实现了宽驱动电压的 MEMS 开关设计,或者说工艺的误差容量较大。

通过结构的模态分析,仿真得到的结构谐振频率为 8.6 KHz,质量为 0.81 ng,由此计算开关的弹性系数、回复力和开关时间见表 2。

表 2 开关结构设计结果一览表

机械谐振频率	质量	吸合电压	弹性系数	回复力	开关时间
f_0 /kHz	m /ng	V_p /V	k /N·m ⁻¹	F_r (μ N)	t_m (μ s)
8.599338	0.8118015	19.5	2.37	7	48.5

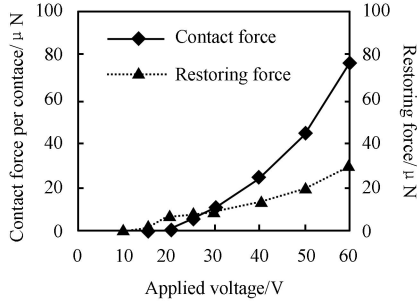


图 3 驱动电压和结构受力的关系

2 工艺制作

RF MEMS 开关采用南京电子器件研究所的低温表面牺牲层标准工艺进行了工艺流片,制作在高阻硅衬底上,使用了七块光刻版,工艺过程包括热氧化,溅射 Ti/Au、光刻、电镀形成传输线和驱动电极,在驱动电极表面 PECVD(等离子增强型化学气相淀积)一层 Si₃N₄ 介质膜,涂敷 3 μ m 厚的 PMMA 作为牺牲层,在 PMMA 上分步光刻形成触点和锚区图形,溅射触点金属并光刻、电镀形成折叠梁和开孔的悬臂梁结构层,最后用 O₂ 等离子刻蚀 PMMA 释放结构。工艺样品如图 4 所示。

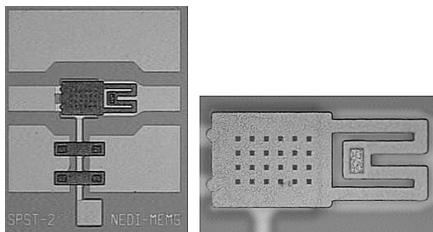


图 4 MEMS 开关样品显微照片

3 测试结果和讨论

在 Cascade 探针台上,使用 Agilent 8510C 网络分析仪,进行了 10 只 MEMS 开关样品的在片微波性能测试,测试的平均结果如图 5 所示。在 DC-20 GHz 频率范围内,开关的插入损耗小于 0.5 dB,扣除校准 CPW 线的损耗,开关的本征损耗小于 0.3 dB,同一段 700 μ m 长的传输线损耗相当。在 6 GHz 频点,开关本征损耗 0.1 dB,由此计算得到的开关接触电阻 $R_c = 0.6 \Omega$,开关隔离度 24.8 dB,由此计算得到的关态电容 $C_{off} = 6.4$ fF。拟合的电路模型^[9]仿真结果同测试结果比较如图 6 所示。

利用自制的驱动电路板和 Lecroy 数字双踪示

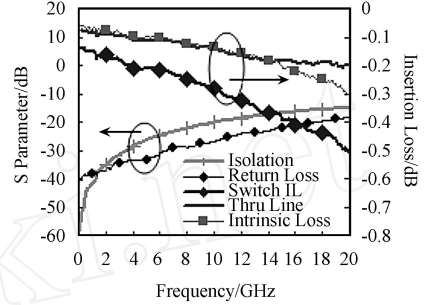


图 5 MEMS 开关 S 参数测量结果

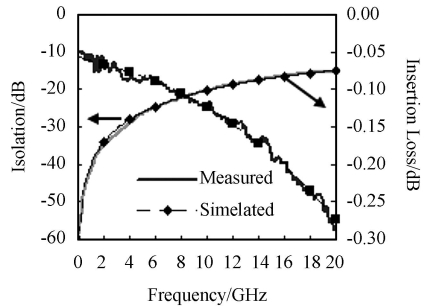


图 6 开关模型和测量的 S 参数比较

波器进行了开关动态特性测量,驱动信号脉冲频率 1 kHz,驱动电压 40 V,测量结果见图 7,表明开关时间 $t_{on} = 47 \mu$ s, $t_{off} = 5 \mu$ s,与仿真结果非常吻合。

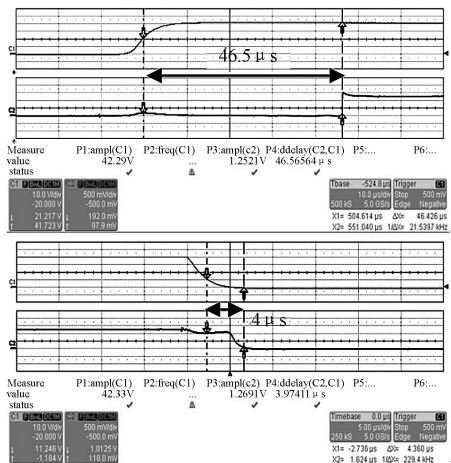


图 7 MEMS 开关 T_{on}(上)和 T_{off}(下)测量结果

4 结论

详细论述了一种宽带直接接触式 MEMS 开关的结构可靠性设计。通过 U 型折叠梁结构,开关结构紧凑,降低了驱动电压;通过厚梁和宽梁设计,增强了开关上极板的刚性;通过触点结构设计,既减小了开关接触电阻,又使得开关下拉时悬臂梁电极不接触驱动电极,避免了接触附着力,实现了宽驱动电

压的开关结构设计;在 D 极周围一定间隔包围着驱动电极,增加梁受力范围,接触稳定,提高接触可靠性。测试结果表明,在 DC-20 GHz 频带内,开关本征损耗小于 0.3 dB,隔离度大于 15 dB,开关时间 47 μ s。

参考文献:

- [1] Rebeiz G M, Muldavin J B, RF MEMS Switches and Switch Circuits[J]. IEEE Microwave Magazine, 2001, 2(4):59-71.
- [2] Rebeiz G M, RF MEMS: Theory, Design, and Technology [M]. New Jersey:John Wiley & Sons, Inc. January 2003.
- [3] www. TeraVista.com, 2007.
- [4] Majumder S, Lampen J, Morrison R and Maciel J, A Packaged, High-Lifetime Ohmic MEMS RF Switch [C]. IEEE MTT-S int. Microwave Symp., 2003, 1935-1938.
- [5] Denatale J, Mihailovich R, RF MEMS Reliability[C]. Transducers '03, 943-946 June, 2003.
- [6] Chan R, Lesnick R, Becher D and etal, Low-actuation voltage RF MEMS shunt switch with cold switching lifetime of seven billion cycles [J]. J. of Microelectromechanical Systems, 2003, 12(5):713-719.
- [7] 朱健,郁元卫,陆乐等,驱动信号与微波信号物理隔离的 RF MEMS 开关的研究[J]. 中国机械工程, 2005, 14(16):1254-1258.
- [8] Nishijima N, Hung J and Rebeiz G M, A Low-Voltage High Contact Force RF-MEMS Switch[C]. IEEE MTT-S int. Microwave Symp., 2004, 577-580.
- [9] Zhu J, Zhou B, Yu Y and et al. DC-contact RF MEMS Switches with Bias Physically Insulated from RF Signal. IEEE International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology (ICSICT), Beijing, 2004, 3:1699-1702.



郁元卫 (1970-), 男, 高级工程师, 从事 MEMS 器件与电路研究, mems@nedi.cn.



朱健 (1962-), 女, 博士, 研究员, 南京电子器件研究所微米纳米研究开发中心主任。主要从事 MEMS 及微波器件与电路研究工作, 中国微米纳米协会理事, 已发表论文 30 余篇, 已受理和已获得 9 项国家专利。



贾世星 (1975-), 男, 工程师, 从事 MEMS 工艺技术研究。



陈辰 (1976-), 男, 南京大学博士研究生, 工程师, 从事 MMIC 和 MEMS 研究。