

单刀双掷 RF MEMS 开关的研究与设计

黄继伟[†] 王志功

(东南大学射频与光电集成电路研究所, 南京 210096)

摘要: 介绍了一种基于横向金属接触的 DC-5GHz 单刀双掷 RF MEMS 开关的研究与设计. 横向金属接触开关包括了一套有限的共面波导(FGCPW)传输线和左右摆动的悬臂梁. 为了降低开启电压, 设计了一种曲折型的折叠梁结构, 通过理论分析与仿真实验验证了该结构的可行性, 并利用 MetalMUMPs 工艺加以实现. 测试结果显示, 该开关在 5GHz 处的插入损耗为 0.8dB, 回波损耗大于 20dB, 隔离度为 40dB. 测得最低开启电压为 33V.

关键词: 单刀双掷; RF MEMS; 折叠梁; 横向接触

PACC: 0710C

中图分类号: TN304

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)04-0604-06

1 引言

低的插入损耗、良好的线性度和极低的功耗, 使得 MEMS(微机电系统)开关在天线和滤波器的转换应用中大大优于传统的半导体开关. 这样优越的性能来源于它们的机械结构, 其不仅具有类似宏观机械开关的机械工作原理, 而且可以利用电阻率比半导体低得多的金属材料. 因此, 自 1991 年 Larson 等人^[1]制作了 RF 频段上具有较好性能的旋转传输线式开关以来, 人们已经研制出了各种不同形式的 RF MEMS 开关, 但是关于单刀双掷开关的报道却不很多. 最初 MEMS 单刀双掷开关电路是由两个距 T 型节中心 1/4 波长的电容式并联开关组成的, 其中一个开关受激励时, 其近似的高频接地对 T 型节中心来说近似开路, 使信号几乎完全从另一个端口输出^[2,3]. 接着, Sievenpiper 等人^[4]提出了在两个输出端口各放一个 MEMS 串联式欧姆开关的单刀双掷开关, 实现对信号通路的选择. 而 Schauwecher 等人^[5]设计的开关电路是基于双钮开关的. 双钮开关相互垂直, 并各自通过一个具有弹性的金属棒连接到两个输出端. 其中一个开关闭合时, 开关与输入端相连接, 使信号传送至输出端. Park 等人^[6]提出的 35~60GHz 单刀双掷开关是一个十字形结构. 两个输出端、50Ω 短截线和输入端分别连接到十字节, 两个直接接触的串联开关放在输出端口. 一个开关受激励时, 断态的开关形成的开路线与短截端线组合形成了双谐振对, 它对十字节近似为开路, 信号便从另一个闭合的开关无损耗地输出. Farinelli 等人^[7]设计的 SPDT 开关具有对称的结构, 在由 CPW

组成的 T 型节的两臂各由两个单刀单掷开关组成, 其中一个是串联欧姆接触式开关, 另一个是并联电容式开关. 触发端口 1 的欧姆开关与端口 2 的电容开关, 信号就能以很小的损耗从端口 1 输出. Cho 等人^[8]又提出了一种新型的推拉式 SPDT 开关, 开关结合了电磁力和静电力用来激励具有扭转条的简单结构, 利用大的电磁力来改变开关的状态, 而小功耗的静电力维持这样的状态. 最近, Tang 等人^[9]又设计了一种横向金属接触的 SPDT 开关, 与垂直开关相比, 横向开关有同时加工的特点, 激励器、接触点、导体和支持结构能够用单一的版图步骤来实现.

本文利用 MEMSCAP 公司的 MetalMUMPs 电镀镍工艺, 设计了一个工作频段从 DC 到 5GHz 的单刀双掷横向金属接触的开关电路. 提出了一种新型的横向金属接触开关结构, 在可实现的工艺范围内, 能有效地降低激励电压. 开关的激励器、接触点、传输路径和支撑结构都只用了一个版图步骤通过微电镀的方式制成.

2 SPDT 开关电路的设计与建模

2.1 RF 电路设计

图 1 示出了单刀双掷开关示意图, 它由处于中间位置的开关和三段传输线组成. 准 FGCPW 传输线作为信号线, 由三段平行的波导组成, 每一段波导由 20μm 厚的电镀镍制成. 开关的悬臂梁位于开关的中间, 末端固定于锚上. 图 2(a)是开关悬臂梁结构的顶视图, 图 2(b)是该结构的剖面图. 它由前端的接触部分、连接部分、悬臂梁部分、两块固定电极

[†] 通信作者. Email: seuhjw@seu.edu.cn

2006-09-22 收到, 2006-12-11 定稿

部分以及末端的固定锚部分组成. 在开关前端的接触部分由氮化硅作为连接部分, 分别支撑并连接前后两块相隔离的金属. 由于氮化硅的绝缘特性, 所以这个开关做到了信号传输与电压驱动之间的隔离. 在开关接触部分, 由于侧壁覆盖了金, 使得接触电阻更小, 可以进一步降低开关的插入损耗.

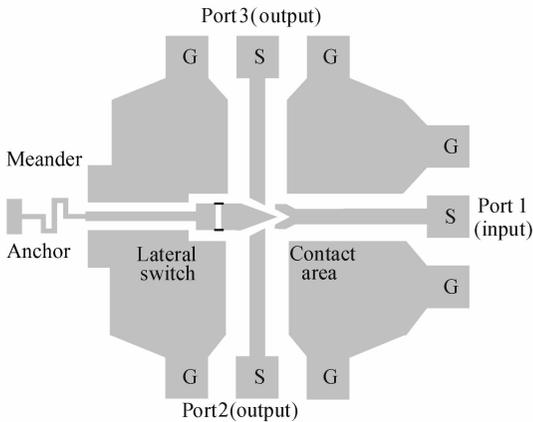


图1 单刀双掷开关电路示意图

Fig.1 Schematic view of the SPDT switch

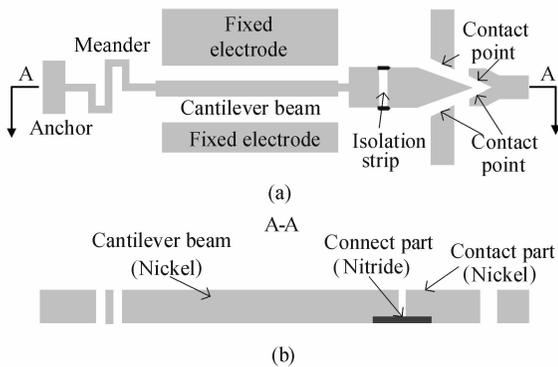


图2 静电激励器示意图 (a)顶视图;(b)剖面图

Fig.2 Schematic of the static electro actuator (a) Top view;(b)Cross section

开关工作时, 在其中一块固定电极和悬臂梁上施加直流电压, 由于静电力的作用, 梁受到向固定电极方向的作用力, 产生摆动, 并进一步带动前端接触部分摆动. 当接触点与 Port 1, Port 2 相接触时, 就使两条传输线相互连接, 形成开关闭合状态. 而在 Port 1 和 Port 3 之间仅存在一个很小的电容, 实现了两信号通路的隔离. 当在另一个电极上施加电压时, 梁发生相反方向的运动, Port 1 与 Port 3 连接, Port 1 与 Port 2 断开, 由此形成了单刀双掷的开关功能. 50Ω 传输线可以通过调整信号线的宽度 S , 地线与信号线之间的距离 W 来获得. 在本电路中, 为了与 GSG 测试探针相匹配, S 和 W 分别取为 $20\mu\text{m}$

和 $40\mu\text{m}$.

图3为单刀双掷开关的等效电路模型, 其中各元件分别为: (1) FGCPW 传输线输入输出特征阻抗 Z_0 ; (2) 接触部分所包含的寄生参数电阻 R_c 和电感 L_c ; (3) 接触部分与悬臂梁部分的耦合电容 C_g ; (4) 接触部分与输入、输出传输线闭合时的接触电阻 R_1 和 R_2 ; (5) 接触部分与输入、输出传输线在隔离时的耦合电容 C_1, C_2 .

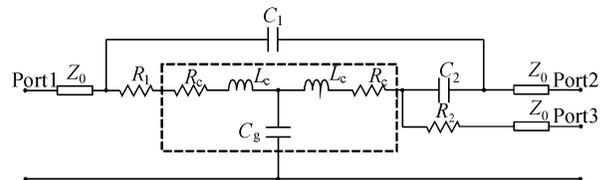


图3 单刀双掷开关等效电路模型

Fig.3 Equivalent circuit of the SPDT switch

C_g 是接触部分与悬臂梁部分之间的耦合电容, 也就是接触部分与地之间的电容. 经过仿真分析, 当开关断开时, C_g 的变化对电路影响很小; 而当开关闭合时, 随着 C_g 从 10fF 增加到 100fF , 电路的插入损耗和回波损耗得到改善, 但是当 C_g 增加到 150fF 时, 电路性能开始变差. 当 C_g 取为 106fF 时, 电路的插入损耗和回波损耗达到最小. 因此, 合理设计 C_g 可以改善电路性能, 本文取前端接触部分的宽度 $60\mu\text{m}$, 金属与金属间的距离 $8\mu\text{m}$.

2.2 机械设计

设计微机械开关电路, 将激励电压降低到合理的范围内是机械设计考虑的重要方面. 由于工艺规则的限制, 实际设计不可能做到所有尺寸都是最优的, 只能以规定的工艺尺寸来进行优化设计, 根据规则, 金属最小宽度为 $8\mu\text{m}$, 金属间的最小间距亦为 $8\mu\text{m}$, 金属厚 $20\mu\text{m}$.

开关是由静电力驱动的, 开启电压 V_p 可由下式给出:

$$V_p = \sqrt{\frac{8K_{\text{eff}}g_0^3}{27\epsilon_0 A}} \quad (1)$$

其中 K_{eff} 为梁的等效弹性系数; A 为静电力作用面积; g_0 为梁与极板的间距; ϵ_0 为空气介电常数. 由 (1) 式可知, 有三种方法可以降低开启电压: 首先, 减小极板与梁之间的间距; 其次, 降低弹性系数; 第三, 增大极板与梁之间的作用面积. 本文从这三个方面对梁结构进行了优化设计: (1) 利用在梁和极板侧壁上镀金的办法, 减小梁和极板的间距; (2) 适当增加梁的长度, 增大极板与梁之间的作用面积; (3) 采用折叠梁结构降低梁的弹性系数.

2.2.1 极板与驱动电极的间距对电压的影响

从理论分析可知, 减小极板与梁的间距, 可以显

著地降低开启电压,它与电压之间的关系为 $V \propto g^{3/2}$. 本文所利用的工艺设计规则要求金属间的最小间距为 $8\mu\text{m}$, 试图进一步减小金属间距的方法是无法实现的. 但在工艺中, 允许在金属侧壁镀一层 $2\mu\text{m}$ 厚的金, 所以在两侧金属的侧壁各镀一层 $2\mu\text{m}$ 的金, 使金属间距减小一半, 相应地电压可降低 65%.

2.2.2 悬臂梁长度对开启电压的影响

增加极板与梁之间的作用面积, 可以通过增加悬臂梁的长度来实现. 随着梁长度的增加, 梁本身的自重也相应增大, 同时悬臂过长, 由于残余应力的影响也会造成梁的变形和弯曲, 因此梁不可能随意的增大. 在设计中, 对作用面积的位置和大小作了相应的优化.

2.2.3 弹性系数对开启电压的影响

降低悬臂梁的弹性系数可以降低激励电压, 通过优化结构特征, 选择不同的材料都可以降低梁的弹性系数. 弹性系数的选择设计是开关设计中最灵活的也是广泛应用的设计方法. 悬臂梁结构的弹性系数通常可由施加在梁上的力与梁的变形量确定.

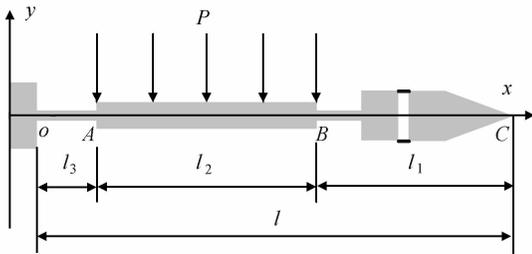


图 4 悬臂梁结构示意图

Fig.4 Schematic of cantilever structure

图 4 所示的开关悬臂梁结构为直梁结构. 设静电力 P 均匀地分布在梁上, 由材料力学可求得该梁的弹性系数为:

$$k_0 = -\frac{P}{y} = \frac{12E_1 I_1 E_2 I_2}{(2l_1 l_2^3 + \frac{3}{2} l_2^3) E_2 I_2 + (4l_1^3 + 6l_1 l_2^2 + 6l_2^2 l_3 + 9l_2 l_3^2 + 6l_1 l_2 l_3) E_1 I_1}$$

$$(2) \quad \text{式中 } E_i \text{ 为悬臂梁等效杨氏模量; } I_i \text{ 为悬臂梁等效惯性矩. 其中悬臂梁的 } AB \text{ 段是由两种金属组成的三层结构, 所以等效杨氏模量和等效惯性矩应按三层金属来计算, 分别为:}$$

$$E_1 = \frac{E_{Ni} w_1 + 2E_{Gold} w_{Gold}}{w_1 + 2w_{Gold}} \quad (3)$$

$$I_1 = \frac{1}{12} (w_1 + 2w_{Gold})^3 t \quad (4)$$

把 $E_{Gold} = 5.7 \times 10^4 \text{ MPa}$, $E_{Ni} = 1.8 \times 10^5 \text{ MPa}$, $l_1 = 280\mu\text{m}$, $l_2 = 606\mu\text{m}$, $l_3 = 108\mu\text{m}$, $w_1 = 8\mu\text{m}$, $w_{Gold} =$

$2\mu\text{m}$ 代入(2)式, 求得开关的弹性系数为 4.6116N/m , 理论激励电压为 48.6929V . 这样高的激励电压不利于实际应用, 为了降低悬臂梁的弹性系数, 本文提出了折叠梁设计, 如图 5 所示. 梁的各段结构不同, 应分段分析, 如图 5(b)~(h)所示.

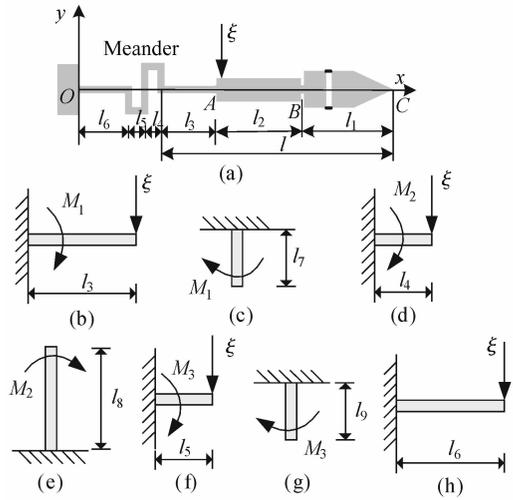


图 5 弯曲结构开关分段分析

Fig.5 Section analysis of meander structure

对于 AC 段有:

$$y_c = -\frac{\xi}{6E_1 I_1} \int_0^{l_2} (3lx^2 + x^3) dx = -\frac{\xi l_2}{6E_1 I_1} \left(l_1 l_2^2 + \frac{3}{4} l_2^3 \right) \quad (5)$$

如图 5(b) 所示, 对于弯曲部分的横向梁, 它的变形量可写为:

$$y_b = -\frac{\xi}{6E_2 I_2} \left[\int_{l_3}^{l_2+l_3} (2l^3 - 3l^2(l-x) + (l-x)^3) dx - \int_0^{l_2} (2(l_1+l_2)^3 - 3(l_1+l_2)^2(l_1+l_2-x) + (l_1+l_2-x)^3) dx \right]$$

$$= -\frac{\xi l_2}{12E_2 I_2} (4l_3^3 + 6l_1 l_3^2 + 6l_2^2 l_3 + 9l_2 l_3^2 + 6l_1 l_2 l_3) \quad (6)$$

如图 5(c) 所示, 对于弯曲部分的纵向梁, 它的变形量折合到 y 轴方向 y_c 为:

$$y_c = -\frac{1}{2} \xi (l_2^2 + 2l_2 l_3) l_7^2 \quad (7)$$

依此类推可分别计算 y_d, y_e, y_f, y_g, y_h . 所以,

$$y_A = y_b + y_c + y_d + y_e + y_f + y_g + y_h \quad (8)$$

利用叠加原理, 把弯曲部分的变形量加上 AC 段的变形量, 可以得到总的变形量为:

$$y_{\text{总}} = y_A + y_c \quad (9)$$

于是求得具有单一弯曲结构的悬臂梁弹性系数 k_1 . 增加折叠梁的弯曲数就可以增大变形量, 进一

步降低梁的弹性系数. 表 1 总结了根据理论分析计算的各种不同结构开关的弹性系数与激励电压以及利用 CoventorWare 软件仿真的激励电压. 由表 1 可知, 随着悬臂梁弯曲数的增加, 弹性系数不断降低, 相应的激励电压随之减小, 说明这种设计方法是有效的.

表 1 不同结构开关的弹性系数与激励电压

Table 1 Spring constants and actuate voltages of switches with different structure

| 开关 | 弹性系数 / (N/m) | 激励电压 / V | 仿真激励电压 / V | 备注 |
|-----|--------------|----------|------------|-------|
| SW0 | 4.6116 | 48.6929 | 54.6875 | k_0 |
| SW1 | 3.4143 | 44.4668 | 45.3125 | k_1 |
| SW2 | 1.9363 | 34.8005 | 32.1875 | k_2 |
| SW3 | 1.2781 | 29.4867 | 31.875 | k_3 |
| SW4 | 0.9273 | 26.2905 | 28.75 | k_4 |

前文所推导的理论分析以及仿真模拟都是基于理想情况. 但是, 随着弯曲数目的增加, 结构趋于复杂, 梁自身的质量也相应增加, 由于重力和残余应力的影响, 悬臂梁会弯曲变形, 共面性变差, 所需的静电力会相应地增加, 开启电压反而增大. 综合分析取具有三个弯曲结构的折叠梁性能最优, 具体参数如表 2 所示.

表 2 开关 SW3 的设计参数 μm

Table 2 Design parameters of switch SW3 μm

| l_1 | l_2 | l_3 | l_4 | l_5 | l_6 | l_7 | l_8 | l_9 | l_{10} | l_{11} | l_{12} | l_{13} | l_{14} | l_{15} | l_{16} |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 275 | 458 | 27 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 114 | 46 | 92 | 92 | 92 | 92 | 46 |

3 加工流程

开关是基于 MEMSCAP 公司提供的 Metal MUMPs 工艺实现的, 衬底材料为高电阻率 ($\rho > 4000\Omega \cdot \text{cm}$), $\langle 100 \rangle$ 晶向的 n 型单晶硅. 图 6 示出了开关制作的各个步骤:

(1) 在衬底上生长 $2\mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 作为电气绝缘层; (2) 淀积 $0.5\mu\text{m}$ 厚的 PSG 并刻蚀出所需的图案, 该层不仅作为随后工艺步骤的牺牲层, 同时也定义了硅衬底上将要刻蚀出的沟道范围大小, 如图 6(a) 所示; (3) 接着淀积两层分别厚 $0.35\mu\text{m}$ 的氮化硅并进行刻蚀, 如图 6(b) 和 (c) 所示; (4) 淀积第二层 $1.1\mu\text{m}$ 的 PSG 并刻蚀, 它既能使金属层能够锚定在氮化硅层上, 又作为牺牲层使结构得以释放, 如图 6(d) 所示; (5) 最后一层是金属层, 由 $20\mu\text{m}$ 的 Ni 与 $2\mu\text{m}$ 的 Au 构成. 利用电镀工艺形成厚的金属层, 在所需要的区域, 同样利用电镀工艺在 Ni 的侧壁镀一层厚 $2\mu\text{m}$ 的 Au, 如图 6(e) 所示; (6) 湿法刻蚀使开关结构得以释放, 在由第 2 步所定义的沟道范围内刻蚀 Si 衬底形成深 $25\mu\text{m}$ 的沟道, 如图 6(f)

所示.

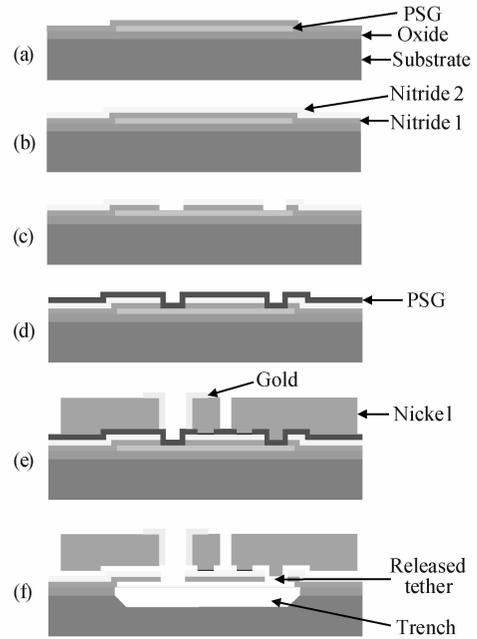


图 6 SPDT 开关的工艺流程图

Fig.6 Fabrication process steps of the proposed SP-DT switch

4 结果与讨论

芯片显微照片如图 7 所示. 芯片面积为 $1650\mu\text{m} \times 2500\mu\text{m}$. 使用微波网络分析仪 PNA8363B 和 Cascade 射频探针台对开关的射频性能

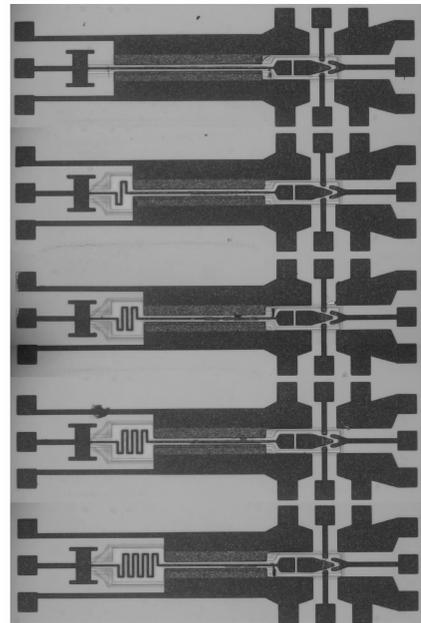


图 7 SPDT 开关的芯片显微照片

Fig.7 Microphotograph of the fabricated SPDT switches

能进行测试,通过间距为 $150\mu\text{m}$ 的 GSG 微波共面探针实现了在片测试.在测试前对系统进行了标准的 SOLT 在片校正.测试得到的开关射频特性如图 8 所示.开关在断开状态,隔离度大于 40dB ;当开关为闭合状态时,测得的插入损耗小于 0.8dB ,回波损耗大于 20dB .

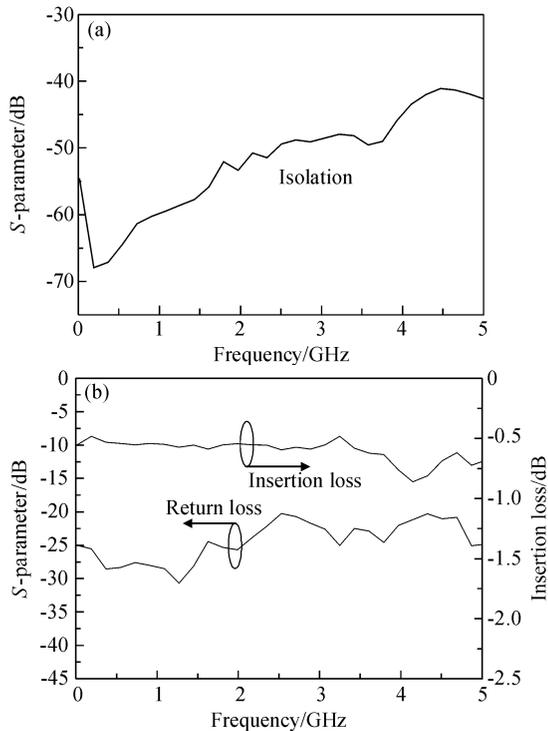


图 8 单刀双掷 RF 开关的射频特性 (a) 开关断开; (b) 开关闭合

Fig.8 RF performance of SPDT switch (a) Off-state; (b) On-state

为了测试各种不同结构开关的激励电压,分别施加直流电压于各个开关.测得包含三个弯曲结构的开关 SW3 的最低激励电压为 33V ,其他各个开关的激励电压则在 50V 以上,而且开关左右摆动所需的激励电压有些差异.这是由于制得的开关,因重力以及残余应力的影响,发生了变形,共面性变差,结构不对称.图 9 示出了开关 SW3 的动态响应直流测试结果.从图中可以看出,在 35V 控制电压的激励下,开关的闭合与断开时间分别为 0.5 和 0.7ms .

5 结论

本文设计、分析并制作了一种 $0\sim 5\text{GHz}$ 的单刀双掷开关电路.通过理论分析、仿真实验和测试结果论证了一种新颖的折叠梁式开关结构.在工艺允许的范围,它能有效地降低激励电压.利用 MEM-

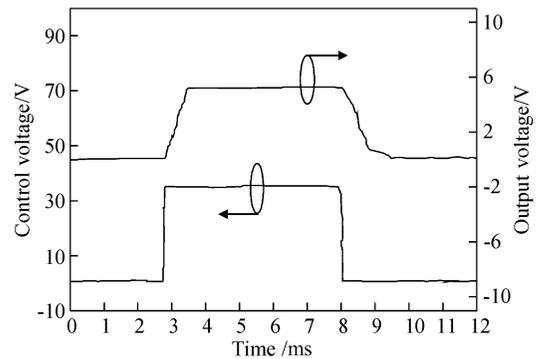


图 9 开关 SW3 的动态响应

Fig.9 Dynamic response of the switch SW3

SCAP 公司的 MetalMUMPs 标准工艺成功流片.测试表明,开关在 5GHz 的插入损耗低于 0.8dB ,隔离度高于 40dB ,测得最小的激励电压为 33V .通过提高工艺水平,将能使激励电压进一步降低到实用标准.利用横向金属接触结构,使开关制作简单,有利于提高成品率.

参考文献

- [1] Larson L E, Hackett R H, Melendes M A, et al. Micromachined microwave actuator (MIMAC) technology: a new tuning approach for microwave integrated circuits. IEEE Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium, Boston, 1991: 27
- [2] Pacheco S P, Peroullis D, Katehi L P B. MEMS single-pole double throw (SPDT) X and K-band switching circuits. Proceedings of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2001: 321
- [3] Scardelletti M C, Ponchak G E, Varaljay N C. MEMS, Ka-band single-pole double-throw (SPDT) switch for switched line phase shifters. Proceedings of the IEEE Antennas & Propagation Social International Symposium, 2002: 2
- [4] Sievenpiper D, Song H J, Hsu H P, et al. MEMS-based switched diversity antenna at 2.3GHz for automotive applications. Proceedings of the Fifth International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, 2002: 762
- [5] Schauwecher B, Strohm K M, Mack T, et al. Single-pole-double-throw switch based on toggle switch. Electron Lett, 2003, 39(8): 668
- [6] Park J H, Lee S, Kim J M. A $35\sim 60\text{GHz}$ single-pole double-throw (SPDT) switching circuit using direct contact MEMS switches and double resonance technique. Proceedings of the 12th International Conference on Transducers, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2003: 1796
- [7] Farinelli P, Giacomozzi F, Mannocchi G, et al. RF-MEMS SPDT switch on silicon substrate for space. 2004 Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, 2004: 151
- [8] Cho I J, Song T, Baek S H, et al. A low-voltage push-pull SPDT RF MEMS switch operated by combination of electromagnetic actuation and electrostatic hold. 18th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2005: 32

- [9] Tang M, Liu A Q, Agarwal A, et al. A single-pole double-throw (SPDT) circuit using lateral metal-contact micromachined switches. *Sensors and Actuators A*, 2005, 121: 187
- [10] Wang Ye, Liu Zhihong, McCormick D T, et al. Low-voltage lateral-contact microrelays for RF applications. *The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 2002, 645
- [11] Agrawal V. A latching MEMS relay for DC and RF applications. *Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, 2004, 222
- [12] Cowen A, Mahadevan R, Johnson S, et al. *Metal MUMPs's design handbook*. Revision 2. 0, Memscap
- [13] Young W C, Budynas R G. *Roark's formulas for stress and strain*. Beijing: Tsinghua University Press, 2003
- [14] Gree J M, Timoshenko S P. *Mechanics of Material*. 4th ed. Boston: PWS Publishing Company, 1997

Research and Design of SPDT RF MEMS Switch

Huang Jiwei[†] and Wang Zhigong

(*Institute of RF- & OE-ICs, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

Abstract: A 0~5GHz single-pole double-throw (SPDT) switching circuit using lateral metal-contacting MEMS switches is demonstrated. The MEMS switch consists of a set of quasi-finite ground coplanar waveguide (FGCPW) transmission lines and a right and left swing cantilever beam. A folded cantilever beam is proposed to reduce the driving voltage, and the structure is proven by theoretical analysis and simulation. The switches were successfully fabricated using the MetalMUMP process. At 5GHz, the measured insertion loss of the SPDT switching circuit is below 0.8dB, the return loss is higher than 20dB, and the isolation is as high as 40dB. The smallest pull-in voltage of the switches is 33V.

Key words: single-pole double-throw; RF MEMS; folded cantilever beam; lateral contact

PACC: 0710C

Article ID: 0253-4177(2007)04-0604-06

[†] Corresponding author. Email: seuhjw@seu.edu.cn

Received 22 September 2006, revised manuscript received 11 December 2006