

# 串联电容式 RF-MEMS 开关的研制

孙建海 崔大付

(中国科学院电子学研究所 传感技术国家重点实验室, 北京 100080)

**摘要:** 研制了一种高电容率的电容式 RF-MEMS 开关. 与普通电容式开关设计不同的是, 在 CPW 信号线上的绝缘层上表面覆盖了一层金属板, 使开关在 down-state 时, 上电极能与介质膜紧密接触, 而在 up-state 时, 金属板分别与上电极及信号线平面构成一组串联电容, 大大降低了  $C_{up}$  值, 从而提高了开关的电容率. 与相同条件制得的普通电容式开关相比, 其电容率要高出一个数量级, 达到 1000 以上. 由测试可知, 所设计的串联电容式开关其隔离度在 8 GHz 时可达 42dB, 明显优于普通电容式开关.

**关键词:** 电容式 RF-MEMS 开关; 电容率; 插入损耗; 隔离度

EEACC: 2220; 2570

中图分类号: TM564

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)12-2445-04

## 1 引言

RF-MEMS 开关是最近十年来在 MEMS 技术的基础上发展起来的一种新型射频微器件, 相对于当前的半导体开关 (GaAs FET, p-i-n diode), 具有低损耗、低功耗、高隔离度、与 Si 工艺有良好的兼容性以及良好的线性度<sup>[1-4]</sup>, 这些优点十分符合未来射频通信系统向低功耗、低损耗方向发展的要求, 因此 RF-MEMS 开关在微波控制电路中具有广阔的应用前景, 是 MEMS 领域的研究热点课题, 对微波科学技术的发展具有重要的意义.

普通 RF-MEMS 电容式开关典型结构是: 一个两端固定在 CPW 的地线上, 而中央可动的金属板, 悬浮在表面覆盖一层绝缘介质膜的 CPW 信号线上. 开关的可动金属板和信号线之间可以模拟为一个电容, 当可动金属板处于“Up-state”, 开关的电容值很小, 几乎不会影响信号线的阻抗, 当在它们之间加上直流偏压后, 可动板金属板在静电力的作用下被拉下, 开关处于“Down-state”, 其电容变得很大, 串接在信号通道和地线之间, 使高频信号耦合至地

线, 信号被截止.

开关的电容比  $C_{down}/C_{up}$  是衡量开关电学性能的一个重要参数.  $C_{up}$  越小, 射频信号通过开关时, 损耗就会越小;  $C_{down}$  越大, 高频信号越容易耦合到地线, 开关的隔离度也就越高. 理论上, 该值越大越好.

但普通电容式 RF-MEMS 开关存在一个不可忽视的问题, 即由于接触面的粗糙限制了金属板与介质膜的紧密接触, 使得开关在 down-state 时的电容值  $C_{down} = \frac{\epsilon_0 A}{2} \times \frac{1}{d_1 + \frac{d_{diel}}{r}} + \frac{\epsilon_0 A}{d_{diel}}$  随表面粗糙度

( $d_1$ ) 的增大而降低. 为了获得大的  $C_{down}$  值, 应尽可能降低接触面的粗糙度, 通常的方法是消除膜内的残余应力<sup>[4]</sup>, 防止膜变形; 另外使用薄的金属膜<sup>[5]</sup> 亦可减小其表面的粗糙度, 但这样将不可避免地增加信号线的电阻, 从而导致插入损耗的增大.

本文介绍一种新的方法来获得高电容比, 而不牺牲开关的插入损耗, 通过这种方法, 可以将开关的电容率提高一个数量级. 另外, 为了方便释放牺牲层和提高开关的反应速度, 在可动的金属板上开有小孔阵列.

孙建海 男, 1974 年出生, 博士研究生, 现在主要从事 RF-MEMS 器件的研究. Email: jhsun2008@yahoo.com.cn

崔大付 男, 1941 年出生, 研究员, 博士生导师, 现从事微传感器及微系统方面的研究.

2005-05-09 收到, 2005-08-02 定稿

## 2 开关的结构设计

这种串联电容式开关的结构设计如图 1 所示. 与普通电容式开关(如图 2 所示)的区别在于,前者在覆盖 CPW 信号线的绝缘介质层上沉积了一层金属板,该金属板与上电极及信号线构成一组串联电容,从而降低了开关在 Up-state 态时的电容值. 而且在 Down-state 时,上电极被拉下,与金属板接触,此时金属板与绝缘层之间的接触是完全吻合的,因此不会因金属板表面的粗糙而引起电容值的下降,从而使开关的电容率得到改善.

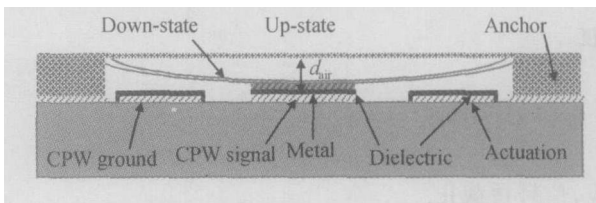


图 1 串联电容式 RF-MEMS 开关的截面图

Fig. 1 Series capacitive RF-MEMS switch

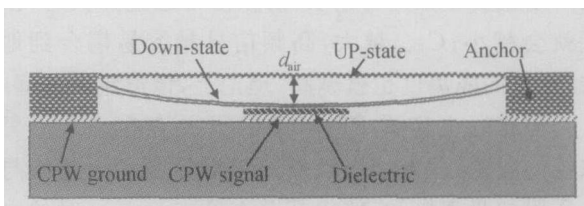


图 2 普通电容式 RF-MEMS 开关的截面图

Fig. 2 Conventional capacitive RF-MEMS switch

开关在 Up-state 态时的电容值相当于金属板与上电极及信号线构成一组串联电容,其值可表示为:

$$C_{up} = \frac{\frac{\epsilon_0 S_1}{d_{air}} \times \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S_2}{d_{diel}}}{\left( \frac{\epsilon_0 S_1}{d_{air}} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S_2}{d_{diel}} \right)} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S_1 S_2}{S_1 d_{diel} + \epsilon_r S_2 d_{air}} \quad (1)$$

$$= \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\left( \frac{d_{diel}}{S_2} + \frac{\epsilon_r d_{air}}{S_1} \right)}$$

其中  $S_1, S_2$  分别是上电极和中间金属板重叠部分的面积以及中间金属板与信号线重叠部分的面积, 相比普通电容式开关在 Up-state 态时的电容值:

$$C_{up} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S_2}{d_{air} + \frac{d_{diel}}{\epsilon_r}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\left( \frac{d_{diel}}{S_2} + \frac{\epsilon_r d_{air}}{S_2} \right)} \quad (2)$$

由于  $d_{diel} \ll d_{air}$ , 因此(1), (2)式中分子的第一项  $\frac{d_{diel}}{S_2}$  项对  $C_{up}$  值的影响很小, 约占 1% 左右, 现对比

(1) 式和(2)式, 若  $S_2$  是  $S_1$  的几倍, 则  $\frac{\epsilon_r d_{air}}{S_2}$  是  $\frac{\epsilon_r d_{air}}{S_1}$  的几分之一, 因此串联电容式开关的  $C_{up}$  值是普通电容式开关的几分之一.

此时串联电容式开关的电容率比

$$\frac{C_{down}}{C_{up}} = \frac{S_1 d_{diel} + \epsilon_r S_2 d_{air}}{\epsilon_0 \epsilon_r S_1 S_2} \times \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S_2}{d_{diel}} \quad (3)$$

$$= 1 + \frac{\epsilon_r S_2}{S_1} \times \frac{d_{air}}{d_{diel}}$$

与普通电容式的电容率  $\frac{C_{down}}{C_{up}} = \frac{\epsilon_r d_{air} + d_{diel}}{d_{diel}} = 1 + \epsilon_r \frac{d_{air}}{d_{diel}}$  相比, 若选取合适  $S_1, S_2$ , 使  $\frac{S_2}{S_1} = 5 \sim 10$ , 则电容率可以提高一个数量级, 相应的开关隔离度也会得到改善. 其次, 由于与金属板正对的可移动部分的金属板面积较小, 因此不宜让信号线做下电极, 而是设置 CPW 的地线作为电极, 具有同样的驱动效果而不产生电磁干扰.

## 3 开关的工艺制作

考虑微波信号对衬底的要求, 采用高阻硅做衬底, 整个工艺流程如图 3 所示.

(1) 在衬底硅表面热氧化一层二氧化硅, 然后再 LP-CVD 一层氮化硅, 使硅衬底获得良好的电绝缘性.

(2) 通过溅射和正胶剥离的方法形成 Cr-Au 合金的信号线和底电极.

(3) 溅射一层  $Ta_2O_5$  介质膜做绝缘层覆盖在 CPW 传输线上, 厚度为 200nm.

(4) 在 CPW 信号线的绝缘介质膜上溅射一层 Cr-Au 合金.

(5) 蒸  $3\mu\text{m}$  厚的 Al, 湿法腐蚀得到立柱.

(6) 旋转涂覆一层厚度为  $3\mu\text{m}$  的聚酰氨胺做牺牲层.

(7) 蒸发一层 Al 做上电极. 湿法腐蚀出牺牲层释放孔(小孔尺寸为  $6\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$ ).

(8) 反应离子刻蚀释放聚酰氨胺牺牲层.

## 4 实验结果和讨论

图 4 是串联式开关的 SEM 图,  $40/80/40\mu\text{m}$  的 CPW 信号传输线的特征阻抗约为 50  $\Omega$ , 金属板与信号线及上电极的正对的有效面积分别是  $80\mu\text{m} \times$

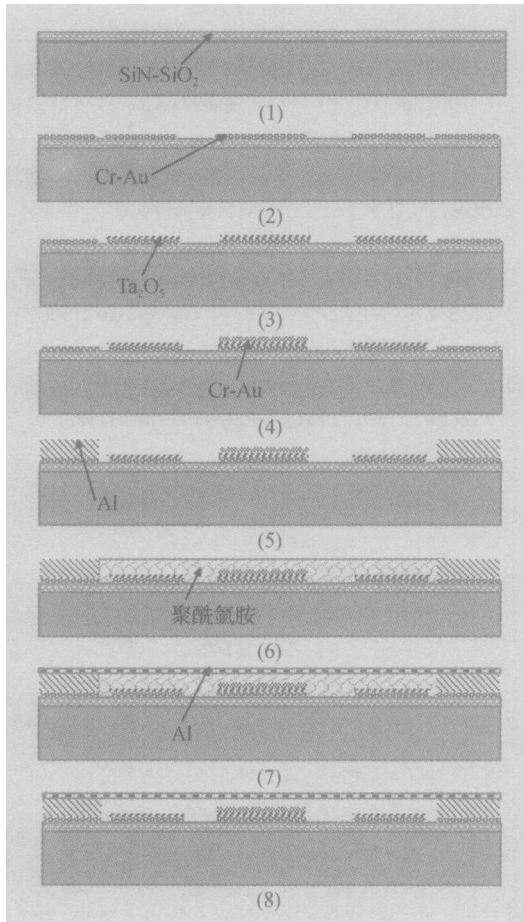


图 3 串联电容式 MEMS 开关工艺流程图

Fig. 3 Process flow of series capacitive RF-MEMS switch

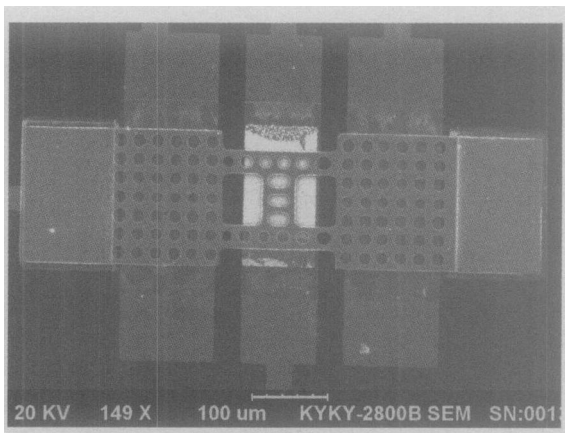


图 4 串联电容式 RF-MEMS 开关 SEM 图

Fig. 4 SEM photograph of series capacitive RF-MEMS switch

150 $\mu$ m, 80 $\mu$ m  $\times$  30 $\mu$ m, 公式 (3) 得到的理论值为 1800 倍, 比普通电容式开关的电容率为 375 倍要高出 5 倍. 由实验测试可知, 串联电容式开关在 Down-state 时的电容值为 12.4pF, 与理论计算值 13.2pF

相差不大.

经初步测试, 开关的性能 S 参数, 如图 5 所示. 从图中的 a 和 b 曲线可知, 在 DC-10GHz 的范围内, 串联电容式开关的隔离度要明显好于普通电容式开关, 在 8GHz 时可达 -42dB, 而普通电容式开关为 37dB; 从图 5 中的 c 和 d 曲线可知, 串联电容式和普通电容式开关在低频部分的插入损耗在 0.5dB 左右, 高频部分在 1.0dB 左右, 有点偏大. 对于串联电容式开关, 其可能原因是在 Up-state, 所覆盖的一层金属板是孤立导体且在 CPW 较近处, 会对 CPW 上的信号产生干扰, 从而影响插入损耗, 其具体影响将在以后文献中给出. 另外, 测试电路的接触电阻、开关信号线及金属桥的阻抗偏大也是影响插入损耗的重要因素.

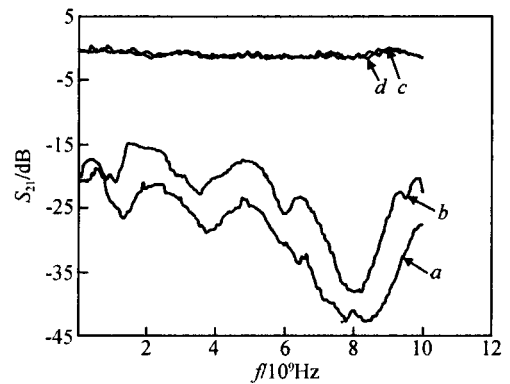


图 5 隔离度和插入损耗图 a, c 曲线分别是串联电容式开关的隔离度、插入损耗图; b, d 曲线分别是普通电容式开关的隔离度、插入损耗图.

Fig. 5 Isolation and insertion loss a, c are the isolation and insertion loss of series capacitive RF-MEMS switch respectively; b, d are the Isolation and Insertion loss of conventional RF-MEMS capacitive switch respectively.

### 5 结论

详细论述了一种新型串联电容式开关器件, 采用 MEMS 表面微加工工艺研制而成, 在构造上提出了串联电容方法来增大电容率, 理论上其值可以提高到 1000 以上, 比普通电容式开关的电容率 (100 左右) 要高出一个数量级, 从而提高了开关隔离度. 从测试性能来看, 在 DC-10GHz 的范围内, 串联电容式开关的隔离度在 8GHz 时可达 -42dB, 明显优于普通电容式开关; 插入损耗在低频部分为 0.5dB

左右,高频部分在 1.0dB 左右.

### 参考文献

- [ 1 ] Rebeiz G M, Muldavin J B. RF MEMS switches and switch circuits. *IEEE Microwave Magazine*, 2001, 2(4) :59
- [ 2 ] Muldavin J B, Rebeiz G M. High isolation CPW MEMS shunt switches-part 1: modeling. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2000, 48(6) :1045
- [ 3 ] Sun Jianhai, Cui Dafu, Wang Haining, et al. Design of DC-contact cantilever RF MEMS series switches. *Microfabrication Technology*, 2005, 1:71 (in Chinese) [ 孙建海, 崔大付, 王海
- 宁, 等. 悬臂梁接触式 RF-MEMS 开关的制作研究. *微细加工技术*, 2005, 1:71 ]
- [ 4 ] Wei Huazheng, Guo Fangmin, Lai Zongsheng, et al. Computer-aided design of RF-MEMS switch. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23(9) :947 (in Chinese) [ 魏华征, 郭方敏, 赖宗声, 等. 射频微机械开关的计算机辅助设计. *半导体学报*, 2002, 23(9) :947 ]
- [ 5 ] Tilman H A C, Ziad H, Jansen H. Wafer-level packaged RF-MEMS switches fabricated in a CMOS fab. *Proc IEDM*, Washington, DC, 2001 :921
- [ 6 ] Jamie Y Z, Chen S, Eshelman S. Micromachined low-loss microwave switches. *IEEE J MEMS*, 1999, 8(2) :129

## Designs and Analysis of Series Capacitive RF-MEMS Switches

Sun Jianhai and Cui Dafu

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract :** This paper reports a capacitive switch with a high capacitance ratio. In contrast to conventional capacitive switches, the switch designed here has a metal film covering the dielectric on the signal line to ensure intimate contact with the dielectric film in the down state. The metal film can constitute two series capacitances versus the bridge and the signal line, so the up-capacitance can be lowered significantly. This allows further optimization of the down/up capacitance, with values more than 1000 over conventional designs under the same conditions. The switch designed here shows better isolation performance than conventional capacitive switches, with an isolation of 42dB at 8GHz.

**Key words :** capacitive RF-MEMS switches; capacitance ratio; isolation; insertion loss

**EEACC :** 2570; 2220

**Article ID :** 0253-4177(2005)12-2445-04

Sun Jianhai male, was born in 1974, PhD candidate. His main research interest is in RF-MEMS devices. Email: jhsun2008@yahoo.com.cn

Cui Dafu male, was born in 1941, professor. His research interests are in micro-sensors and micro-systems.

Received 9 May 2005, revised manuscript received 2 August 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics