

Design and Fabrication of a Capacitive Series RF MEMS Switch *

HOU Zhi-hao, LIU Ze-wen^{*}, HU Guang-wei, LIU Li-tian, LI Zhi-jian
(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The design and fabrication of a capacitive series RF MEMS switch is reported. The up-electrode warps up under the residue stress, which increases the isolation of the capacitive series RF MEMS switch. The disadvantage of capacitive series RF MEMS switch, which only has high isolation at below 1 GHz, is overcome. The fabrication process is the same with capacitive shunt switch. Comparing with capacitive shunt switch, the fabricated capacitive series RF MEMS switch has the advantage in low frequency application (< 10 GHz). The insertion loss is -0.8 dB @3 GHz and -0.5 dB above 6 GHz; the isolation is -33.5 dB @900 MHz, -24 dB @3 GHz and -20 dB @5 GHz, which is suit for the application of frequency range from 3 GHz to 5 GHz.

Key words: radio frequency; MEMS; capacitive series RF MEMS switch; capacitive series; residue stress
EEACC: 2180B; 0520D

串联电容式 RF MEMS 开关设计与制造研究 *

侯智昊, 刘泽文^{*}, 胡光伟, 刘理天, 李志坚

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘要: 介绍了一种串联电容式 RF MEMS 开关的设计与制造。所设计的串联电容式 RF MEMS 开关利用薄膜淀积中产生的内应力使 MEMS 桥膜向上发生翘曲, 从而提高所设计的开关的隔离度, 克服了串联电容式 RF MEMS 开关通常只有在 1 GHz 以下才能获得较高隔离度的缺点。其工艺与并联电容式 RF MEMS 开关完全相同, 解决了并联电容式 RF MEMS 开关不能应用于低频段 (< 10 GHz) 的问题。其插入损耗为 -0.88 dB @3 GHz, 在 6 GHz 以上, 插入损耗为 -0.5 dB; 隔离度为 -33.5 dB @900 MHz、 -24 dB @3 GHz 和 -20 dB @5 GHz, 适合于 3~5 GHz 频段的应用。

关键词: 射频; 微电子机械系统; 串联电容式 RF MEMS 开关; 串联电容式; 内应力

中图分类号: TN385; TN62; TN305.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-1699(2008)04-0660-04

由于 RF MEMS 开关具有插入损耗低、隔离度高、线性度高、功耗低和体积小等优点, 已经被认为替代传统的 P-N, FET 射频开关的首选, 在雷达、卫星通讯、个人无线通讯、测试等系统中具有很好的应用前景^[1-2]。

RF MEMS 开关按接触方式区分通常可以分为电容耦合式和电阻接触式两大类^[3]。与电阻接触式开关相比, 电容耦合式开关具有工艺简单的优点。电阻接触式开关, 为了获得较低的插入损耗 (< 1 dB) 需要较低的接触电阻 ($< 0.5 \Omega$), 这使得电阻接触式 MEMS 开关的制作工艺相当复杂, 并且, 接触

式 MEMS 开关的功率容量较低^[4]。

目前, 被广泛研究的电容耦合式 MEMS 开关是并联电容式 MEMS 开关, 它是通过控制信号线与地之间的耦合电容来控制射频信号, 如图 1(a) 所示, 这使得其工作频率通常在 20 GHz 以上, 使其在手机, WLAN 等工作频率较低的应用中受到限制; 另一种电容耦合式 MEMS 开关是串联电容式 MEMS 开关, 它是通过控制信号输入输出端的耦合电容来控制射频信号的通断, 如图 1(b) 所示^[3], 通过适当的设计, 不但可以在较高的频率获得低的插入损耗, 而且可以使其在较低的频率 ($<$

基金项目: 国家自然科学基金资助(60576048); 北京市科委项目基金资助(GYYKW05070014)

收稿日期: 2007-09-30 修改日期: 2008-02-22

5 GHz) 获得较好的插入损耗,但是,由于关断状态下的电容耦合,使其通常在低于 1 GHz 才能获得 20 dB 以上的隔离度^[5],这不但使串联电容式开关的设计较为复杂,而且也严重的限制了这种类型开关的应用。为了克服这个缺点,在本文中,利用薄膜淀积中产生的内应力使 MEMS 桥膜向上发生翘曲,从而降低了关断状态下的电容耦合,使所设计的串联电容式 MEMS 开关在 5 GHz 左右也可以获得较高的隔离度。

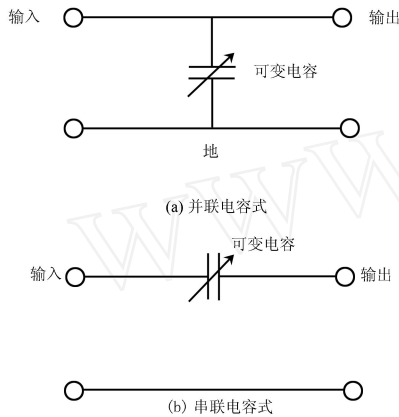


图 1 (a)并联电容式 RF MEMS 开关与(b)串联电容式 RF MEMS 开关工作原理的比较

1 工作原理及设计

串联电容式 RF MEMS 开关的顶视图及抛面图如图 2 所示。当上下电极之间未施加驱动电压时,上下电极之间的耦合电容很小,射频信号无法通

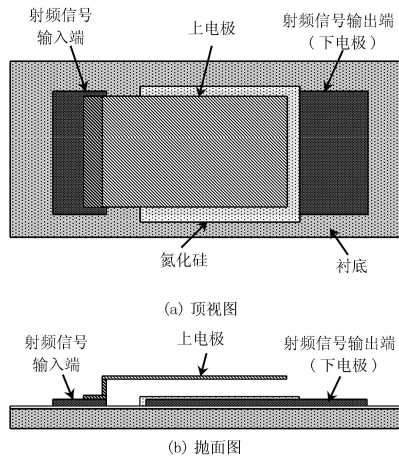


图 2 串联电容式 RF MEMS 开关的顶视图及抛面图

过耦合电容,使 RF MEMS 开关处于隔离状态;当上下电极之间施加足够高的电压时,由静电力的作用,上电极发生下塌,使上下电极的之间的耦合电容增加,射频信号可以通过这个电容耦合到输出,使 RF MEMS 开关处于导通状态;当上下电极之间的电压撤销后,上电极由弹性力的作用,恢复到初始状

态,使 RF MEMS 开关回复到隔离状态。其中氮化硅作为介质层,不但可以隔离上下电极之间的直流驱动电压,而且可以利用其较高的介质常数提高导通状态上下电极耦合电容。

图 3 为串联电容式 RF MEMS 开关的等效电路,其中 CPW1 和 CPW2 分别表示输入输出端的共

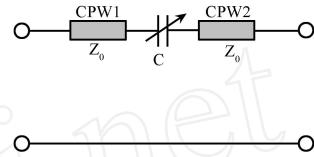


图 3 串联电容式 RF MEMS 开关的等效电路图

面波导, Z_0 为其特征阻抗,对于我们的设计,输入输出端共面波导相同,其特征阻抗也相同。则利用微波理论,可得:

$$S_{21} = \frac{2j CZ_0}{1 + 2j CZ_0} \tag{1}$$

对于隔离和导通状态, C 分别有不同的值 C_{off} 和 C_{on} , 其中:

$$C_{on} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{t_d} \tag{2}$$

$$C_{off} = \frac{\epsilon_0 A}{g} \tag{3}$$

以上两式中: ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为介质层的相对介电常数,在我们的设计中介质层为 Si_3N_4 ; A 为上下电极的正对面积; t_d 为介质层的厚度; g 为处于隔离状态时,上下电极之间的间距; ϵ_r 为由于下电极表面形貌和释放孔所引起的电容降低的修正系数,其值通常在 0.05 ~ 0.19 之间,对于不同的表面形貌和释放孔的大小,其值相差会很大^[6]。

通过式 (1), 我们可以得到,为了使串联电容式 RF MEMS 开关获得较低的插入损耗和较高的隔离度,需要提高导通状态上下电极之间的耦合电容 (C_{on}),降低隔离状态上下电极之间的耦合电容 (C_{off})。由式 (2),提高导通状态上下电极之间的耦合电容可以通过利用高介电常数的介质层和增加上下电极的正对面积 (A) 来实现,但是,利用高介电常数的介质层会使工艺变得更加复杂和降低工艺兼容性^[7],而增加上下电极的正对面积 (A) 会反过来增加隔离状态上下电极之间的耦合电容 (C_{off});降低隔离状态上下电极之间的耦合电容可以通过增加牺牲层的厚度来实现,但是,这样会使其工艺无法与并联电容式 RF MEMS 开关兼容。在这里,我们通过利用上电极薄膜的内应力来使上电极发生翘曲,实现抛面图如图 4 所示的结果,从而提高上下电极的平均距离,降低串联电容式 RF MEMS 开关

隔离状态下的耦合电容,进而提高其隔离状态下的隔离度。在我们的设计中,为了与我们的并联电容式 RF MEMS 开关工艺兼容, $t_d = 2\ 600\ \text{\AA}$, $g = 2\ \mu\text{m}$, 为了获得较低的插入损耗和较高的隔离度, $A = 340\ \mu\text{m} \times 190\ \mu\text{m}$ 。

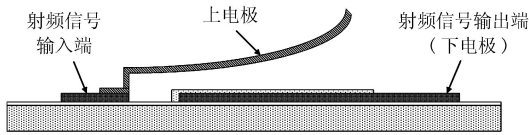


图4 上电极在内应力的作用发生翘曲的示意图

2 工艺设计及流水结果

所设计的串联电容式 RF MEMS 开关具有与传统的并联电容式 RF MEMS 开关工艺完全兼容的优点, RF MEMS 开关的主要制作步骤如图 5 所示, 为了降低 MEMS 开关的插入损耗, 采用高阻硅

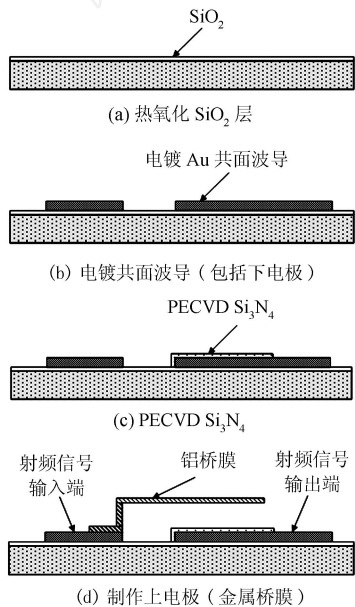


图5 RF MEMS 开关制作工艺

(900 cm) 作为衬底, 并且通过干-湿-干法氧化工艺, 在硅片表面制作 $0.8\ \mu\text{m}$ 的氧化层作为隔离层, 如图 5(a); 然后, 溅射 $50\ \text{nm}$ 的 TiW 和 $160\ \text{nm}$ 的 Au 作为电镀种子层, 利用 AZ4620 进行厚胶光刻作为电镀模具, 电镀 $2\ \mu\text{m}$ 厚的 Au 作为共面波导, 如图 5(b); 之后, 利用等离子体增强气相淀积 (PECVD) 制作 $260\ \text{nm}$ 的 Si_3N_4 作为上下电极间的介质层 (工艺条件为 $300\ \text{W}$, $300\ \text{s}$, $\text{SiH}_4/\text{NH}_3 = 40/15$), 如图 5(c) 所示; 然后, 旋涂 $4\ \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺作为牺牲层, 并图形化, 最后, 溅射 $1.2\ \mu\text{m}$ 厚的 Al 作为上电极, 刻蚀 Al, 并且利用 O_2 Plasma 进行干法释放, 如图 5(d) 所示^[8]。为了使上电极发生如图 4 所示的翘曲, 在利用 O_2 Plasma 进行干法释放

的过程中, 增加释放时间, 使上电极顶端完全释放并且在热作用下向上发生翘曲。

图 6 为所制作的串联电容式 RF MEMS 开关 SEM 照片, 可以看出, 上极板的顶端自由释放, 并且在内应力的作用下上极板向上翘曲, 提高了上下极板之间的平均距离, 降低了上下极板之间的耦合电容, 这样可以使串联电容式 RF MEMS 开关的隔离度有较大提高。通过对此次流水不同硅片上的和同一硅片上不同位置的多个 RF MEMS 开关桥膜翘曲情况的观察, RF MEMS 开关上电极桥膜翘曲的一致性较好。图 6 所示 MEMS 开关的下拉电压在 $30\ \text{V}$ 左右。

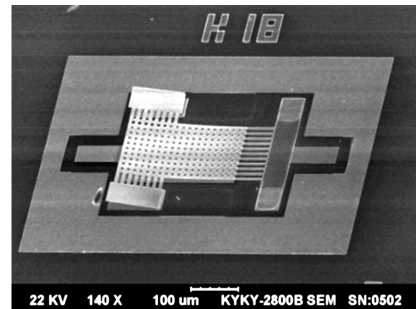


图6 串联电容式 RF MEMS 开关 SEM 照片

3 测试与结果讨论

所设计的开关样品采用 Suss PM-5 型微波探针台和 HP 8722ES 矢量网络分析仪在大气环境下进行了在片测试, 测试频段为 $0.05 \sim 10\ \text{GHz}$ 。在驱动电压为 $30\ \text{V}$ 时, 测试的插入损耗如图 7 所示, 从图中可知, 其插入损耗为 $-0.8\ \text{dB}$ @ $3\ \text{GHz}$, 在 $6\ \text{GHz}$ 以上, 插入损耗为 $-0.5\ \text{dB}$; 隔离度的测试结果如图 8 中实线所示, 虚线为未发生翘曲情况下的隔离度的模拟结果。从隔离度的测试结果可以看出, 其隔离度为: $-33.5\ \text{dB}$ @ $900\ \text{MHz}$ 、 $-24\ \text{dB}$ @ $3\ \text{GHz}$ 和 $-20\ \text{dB}$ @ $5\ \text{GHz}$ 。从插入损耗和隔离度的测试结果可以看出, 所设计的串联电容式 RF MEMS 开关适合于 $3 \sim 5\ \text{GHz}$ 频段的应用, 解决了并联电容式 RF MEMS 开关不能应用于低频段 ($< 10\ \text{GHz}$) 的问题, 并且, 其工艺与并联电容式 RF MEMS 开关的工艺完全兼容。如果需要进一步降低其工作频率, 可以通过增加上下电极正对面积使其在更低频率下获得较低的插入损耗。并且, 通过图 8 测试结果与模拟结果比较可以看出, 利用薄膜内应力使上电极向上翘曲的方法, 确实可以提高其隔离度, 克服了串联电容式 RF MEMS 开关在较高频率 ($> 1\ \text{GHz}$) 无法提供高隔离度的缺点。

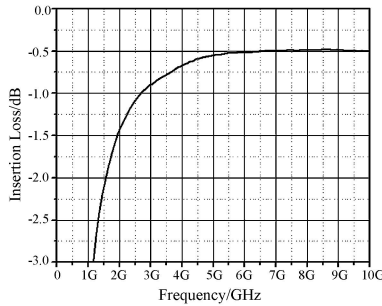


图 7 串联电容式 RF MEMS 开关的插入损耗

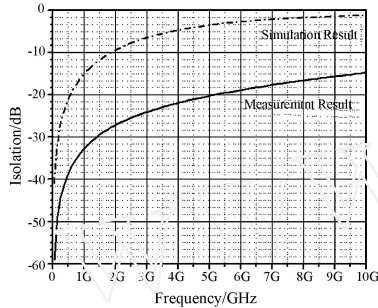


图 8 串联电容式 RF MEMS 开关的隔离度的模拟(虚线)与测试(实线)结果

4 结论

本文设计和制造了一种高性能的串联电容式 RF MEMS 开关,通过利用薄膜淀积中产生的内应力使 MEMS 桥膜向上发生翘曲,从而克服了串联电容式 RF MEMS 开关只有在 1 GHz 左右才能获得较高隔离度的缺点。所设计的串联电容式 RF MEMS 开关具有与传统的并联电容式 RF MEMS 开关工艺完全兼容的优点,解决了并联电容式 RF MEMS 开关不能应用于低频段 (< 10 GHz) 的问题。

所研制的开关的性能为:开启电压 30 V;插入损耗为 - 0.8 dB @3 GHz,在 6 GHz 以上,插入损耗为 - 0.5 dB; 隔离度为 - 33.5 dB @900 MHz、- 24 dB @3 GHz 和 - 20 dB @5 GHz,适合于 3~5 GHz 频段的应用,非常适合手机,WLAN 等工作频率较低的应用。

参考文献:

- [1] Rijks T G S M, van Beek J T M, Steeneken P G, et al. MEMS Tunable Capacitors and Switches for RF Applications [C]// Proceedings of the International Conference on Microelectronics. Nis, Serbia, 2004 :49-56.
- [2] Brown E R RF-MEMS Switches for Reconfigurable Integrated circuits[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1998, 46(11) :1968-1880.
- [3] G. M. Rebeiz. RF MEMS, Theory, Design and Technology [M]. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [4] Jensen B D, Chow L L-W, Kuangwei Huang, et al. Effect of Nanoscale Heating on Electrical Transport in RF MEMS Switch Contacts [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2005, 14(5) :934-946.
- [5] Rottenberg X, Nauwelaers B, De Raedt W, et al. Compact and High-Accuracy RF MEMS Capacitive Series Devices [C]// Progress in Biomedical Optics and Imaging. San Jose, CA, United States, 2005 :55-65.
- [6] 雷啸锋,刘泽文,宣云,等. 介质表面形貌对射频微机械开关隔离度的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(1) : 122-125.
- [7] 雷啸锋,刘泽文,宣云,等. 高介电常数介质 RF MEMS 开关的制作研究[J]. 测控技术, 2004, 23(3) :7-9.
- [8] 宣云,刘泽文,雷啸锋,等. 斜拉梁结构的 RF-MEMS 开关制作研究[J]. 微细加工技术, 2005, (03) :48-52.



侯智昊(1979-),男,博士研究生,主要从事 RF MEMS 开关研究,houzh03 @ mails. tsinghua. edu. cn.



刘泽文(1960-),男,教授,主要从事 MEMS 和微电子技术研究,liuzw @ tsinghua. edu. cn.