

文章编号 1004-924X(2009)08-1922-06

# DC~30 GHz 并联接触式 RF MEMS 开关的设计与制造

侯智昊, 刘泽文, 李志坚

(清华大学 微电子学研究所, 北京 100084)

**摘要:**对适用于 DC~30 GHz 频率的并联接触式 RF MEMS 开关的设计与制造进行了研究。利用低应力电镀 Au 桥膜作为上电极, 实现了接触电极之间的 Au-Au 接触。使用 Borofloat™ 玻璃作为衬底, 并用隔离电阻对内置射频信号与驱动电极旁路进行隔离; 通过对上电极桥膜与 CPW 间距的优化设计, 使开关具有较低的插入损耗。所设计制造的并联接触式 RF MEMS 开关的下拉电压为 60 V, 上下电极的接触电阻为 0.1  $\Omega$ 。插入损耗为 -0.03 dB@1GHz, -0.13 dB@10 GHz 和 -0.19 dB@20GHz, 在 DC~30 GHz 的插入损耗都 < -0.5 dB; 隔离度为 -47 dB@1 GHz, -30 dB@10 GHz 和 -25 dB@20 GHz, 在 DC~30 GHz 的隔离度都 > -23 dB。测试结果表明, 所设计的并联接触式 RF MEMS 开关适用频率为 DC~30 GHz, 是一种应用频率范围较宽的 RF MEMS 开关。

**关键词:**微机电系统; RF MEMS 开关; 并联接触

**中图分类号:** TM564; TN405 **文献标识码:** A

## Design and fabrication of DC to 30 GHz DC-contact shunt RF MEMS switch

HOU Zhi-hao, LIU Ze-wen, LI Zhi-jian

(*Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

**Abstract:** The design and fabrication processes of a DC-contact shunt RF MEMS switch were studied to improve its performance. A low stress electroplated Au membrane was taken as an upper electrode to implement the Au-Au direct contact. Borofloat™ glass was used as a substrate and a inside resistance was used to isolate the crosstalk between radio-frequency signal and bias voltage. Then, the distance between Au membrane and Coplanar Waveguide(CPW) was optimized to lower the insertion losses of the switch. Experimental results show that the contact resistance is 0.1  $\Omega$  under the pull-down voltage of 60 V. The insertion losses are -0.03 dB@1GHz, -0.13 dB@10 GHz, -0.19 dB@20 GHz in the frequency ranges from DC to 30 GHz, which is less than -0.5 dB; the isolations are -47dB@1 GHz, -30 dB@10 GHz and -25 dB@20 GHz in the same frequency ranges, which is all better than -23 dB. The measurement results show that the fabricated RF MEMS switch is suitable for the applications of frequency ranges from DC to 30 GHz.

**Key words:** MEMS; RF MEMS switch; DC-contact shunt

收稿日期: 2008-09-01; 修订日期: 2008-10-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60576048); 国家 973 重点基础研究发展规划资助项目(No. 2007CB310500)

## 1 引言

接触式射频微电子机械(RF MEMS)开关是利用金属-金属的直接接触来控制信号,由于具有较宽的应用频率范围,可望在手机、相控阵雷达、卫星通讯等多种射频系统中获得应用,长期以来,一直是 MEMS 领域中重要的研究对象<sup>[1-3]</sup>。

目前,对接触式 RF MEMS 开关的研究主要集中在对串联接触式 RF MEMS 开关的研究,而对并联接触式 RF MEMS 开关的研究相对较少。作为接触式 RF MEMS 开关的一种,并联接触式 RF MEMS 开关利用并联于信号线与地线之间的开关来控制射频信号的导通与断开。当金属-金属直接接触时,射频信号从信号线导通到地,RF MEMS 开关处于隔离状态。与串联接触式 RF MEMS 开关相比,并联接触式 RF MEMS 开关通常具有更宽的应用频率范围<sup>[4-6]</sup>。文献[5]和文献[6]介绍了两种形式的并联接触式 RF MEMS 开关。文献[5]介绍的全金属的 RF MEMS 开关是利用 in-line 桥结构实现具有较低插入损耗的并联接触式 RF MEMS 开关。但是,由于隔离状态下其金属桥膜与地线之间的电感较大,使其高频下的隔离度受到限制,其工作频率为 DC~18 GHz。文献[6]中介绍的是利用  $\text{Si}_3\text{N}_4$  作为桥膜的结构层,在上面附着 Au 作为接触材料,实现 Au-Au 接触,其应用频率为 DC~100 GHz 的一种超宽应用频率范围的 RF MEMS 开关。但是,这种开关需要使用  $\text{Si}_3\text{N}_4$  和 Au 两层材料制作上电极,而且  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜中的应力很难控制,并且非常容易发生断裂<sup>[7]</sup>,因此,其工艺较为复杂并且成品率较低。

本文设计与制造了一种全金属结构的并联接触式 RF MEMS 开关,利用简单的电镀 Au 工艺在共面波导(CPW)上实现了上电极桥膜,完成了 Au-Au 接触。使用 Borofloat<sup>TM</sup> 玻璃作为衬底,并且通过对上电极桥膜与 CPW 间距的优化设计,使其具有较低的插入损耗,利用隔离电阻,对射频信号与驱动电极旁路进行隔离,获得了 DC~30 GHz 的很好的射频性能。

## 2 并联接触式 RF MEMS 开关的设计

并联接触式 RF MEMS 开关的工作原理与并联电容式 RF MEMS 开关的工作原理类似,都是通过控制信号线与地线之间的导通与断开来控制射频信号的通断。不同的是,并联电容式 RF MEMS 开关是通过增大信号线与地线之间的耦合电容来控制射频信号的,而并联接触式 RF MEMS 开关是利用信号线与地线之间的金属-金属接触来控制射频信号,其基本工作原理如图 1 所示。因此,与并联电容式 RF MEMS 开关相比,并联接触式 RF MEMS 开关具有较低的工作频率,甚至可以控制直流信号<sup>[8]</sup>。

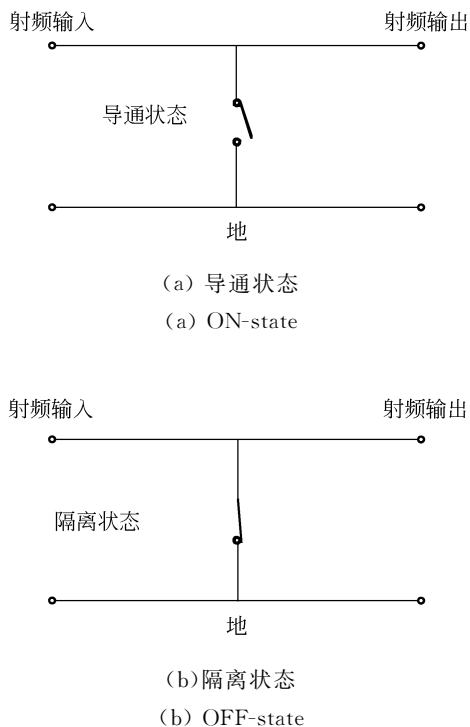


图 1 并联接触式 RF MEMS 开关的工作原理图

Fig. 1 Principle of DC-contact shunt RF MEMS switch

所设计的处于 CPW 中的并联接触式 RF MEMS 开关的顶视图和剖视图如图 2 所示,其主要由 3 部分组成:金属桥膜、下拉电极和 CPW 信号线的接触处。当下拉电极未加驱动电压时,金属桥膜与 CPW 信号线之间的耦合电容很小,射频信号可以通过 CPW 的信号线;当驱动电压施加在下拉电极与地线之间时,金属桥膜与下电极

之间产生静电力,金属桥膜在静电力的作用下发生下塌,实现金属桥膜与 CPW 信号线之间的金属-金属接触,射频信号通过金属桥膜耦合到地,从而实现射频信号的隔离;当下拉电极与地之间的驱动电压撤销时,金属桥膜由于弹性力的作用回复到初始的导通状态。

通常情况下,RF MEMS 开关的尺寸  $< 1 \text{ mm}$ ,而频率为  $30 \text{ GHz}$  的射频信号的波长为  $10 \text{ mm}$ ,RF MEMS 的尺寸小于其通常应用频率范围下(DC~ $30 \text{ GHz}$ )波长的  $1/10$ ,因此采用集总参数等效电路模型来表征 RF MEMS 开关的电学特性所引入的误差是很小的<sup>[9]</sup>。

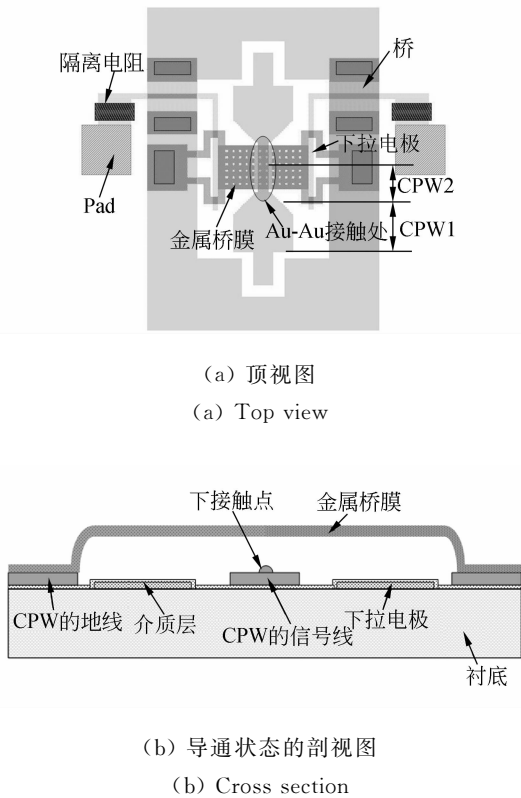


图 2 并联接触式 RF MEMS 开关的示意图  
Fig. 2 Illustration of DC-contact shunt RF MEMS switch

所设计的并联接触式 RF MEMS 开关的等效电路如图 3 所示。其中图 3(a)为导通状态下的等效电路,图 3(b)为隔离状态下的等效电路。 $Z_0$  表示 CPW<sub>1</sub> 的特征阻抗; $Z_h$  为 CPW<sub>2</sub> 的信号线与金属桥膜接触处的 CPW 的特征阻抗; $L$  为金属桥膜的电感值; $C_{up}$  为处于导通状态时,金属桥膜与 CPW 信号线的耦合电容; $R_s$  为处于隔离状态时,金属桥膜与 CPW 信号线的接触电阻。

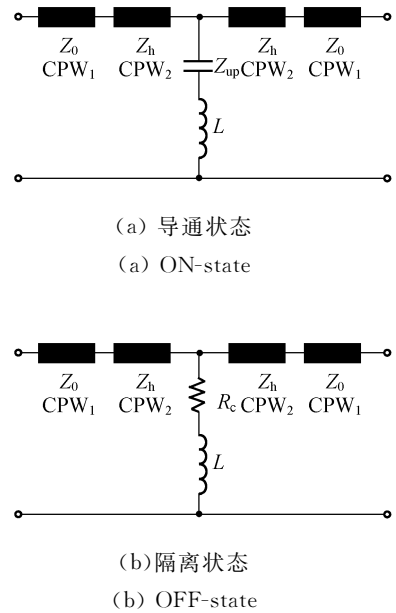


图 3 并联接触式 RF MEMS 开关的等效电路图  
Fig. 3 Equivalent circuit of DC-contact shunt RF MEMS switch

为了阻抗匹配的要求,CPW<sub>1</sub> 设计成  $50 \Omega$ ,这里采用 Agilent ADS 软件的 Linecalc 工具,采用 Borofloat™玻璃作为衬底,Au 作为 CPW 的材料,最终等效电路中 CPW<sub>1</sub> 处信号线的宽度为  $180 \mu\text{m}$ ,信号线与地线之间的间隔为  $110 \mu\text{m}$ 。

由于下拉电极的存在,必须在 CPW 的信号线和地线之间留出下拉电极的面积,如图 2(a)所示,因此,必须在 CPW<sub>2</sub> 信号线处使用较窄的信号线,其  $G/S/G = 185 \mu\text{m}/30 \mu\text{m}/185 \mu\text{m}$ ,其特征阻抗  $Z_h = 90 \Omega$ ,这样,牺牲了一些 CPW 的匹配特性,使其射频特性受到了一定的影响。为了降低由于高阻抗 CPW 的引入对 RF MEMS 开关的插入损耗的影响,本文利用图 3(a)所示的等效电路,使用 Agilent ADS 软件对插入损耗与  $C_{up}$ ,  $L$  的关系进行了模拟,模拟结果如图 4 所示。其中,  $g$  表示电容所对应的上电极与 CPW 间距。由于  $L$  对插入损耗的影响非常小,因此在图 4 中忽略了  $L$  的影响。从中可以发现,随着  $C_{up}$  的增加,插入损耗首先降低,当  $C_{up} > 80 \text{ fF}$  时,插入损耗开始反向增加;当  $C_{up} = 160 \text{ fF}$  时,插入损耗大于 CPW 的插入损耗。这是因为由于  $C_{up}$  的引入,改变了 MEMS 开关在输入输出端口的特征阻抗  $Z$ ,从而改变了与  $50 \Omega$  系统的匹配特性。随着  $C_{up}$  的增加, $Z$  随之减小,当  $C_{up} = 80 \text{ fF}$  时,在 DC~ $30$

GHz 时,  $Z=50 \Omega$ , 可获得最佳的匹配效果, 然后随着  $C_{up}$  的继续增加, 匹配特性开始变坏。这里, 为了降低 RF MEMS 开关的插入损耗, 同时保证在制作 RF MEMS 开关的过程中, 由于工艺误差引起  $g$  变化而导致  $C_{up}$  的偏差尽可能的小, 可以选择  $C_{up}=20 \text{ fF}$ , 这时  $g=1.8 \mu\text{m}$ 。

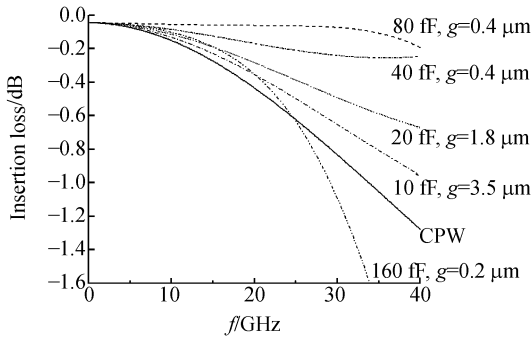


图 4 插入损耗与  $C_{up}$  的关系曲线

Fig. 4 Relationship between insertion loss and  $C_{up}$

在信号线的两侧, 使用两个下拉电极, 下拉电极通过 CPW 地线上的“桥”引出 Pad, 并且使用片上集成电阻将射频信号与驱动电极旁路隔离, 降低直流驱动信号对射频性能的影响。

### 3 工艺设计及流水结果

工艺上以 Borofloat<sup>TM</sup> 玻璃作为衬底, 这样可以减少 RF MEMS 开关导通状态下由于射频信号在衬底中引起的涡流所产生的损耗, 而且其工作温度为  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ , 并与 Al,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  等具有很好的黏附性, 可以满足工艺需求。工艺流程如下, 如图 5 所示:

(a) 首先对玻璃进行清洗, 然后在  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  的条件下 PECVD 淀积  $400 \text{ nm}$  的  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , 光刻后作为下接触点, 这样在后续工艺中, 就会在下接触电极上形成凸点, 作为接触点。

(b) 同样在  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  的工艺条件下 PECVD 淀积  $300 \text{ nm}$  的非晶硅 (a-Si), 在 PECVD 的过程中通入  $\text{B}_2\text{H}_6$  以降低 a-Si 的电阻率, 然后光刻作为隔离电阻。a-Si 作为隔离电阻的优点是工艺简单, 只需要在 PECVD 的过程中通入  $\text{B}_2\text{H}_6$  即可调节电阻, 而不需要进行离子注入, 适用于对电阻的阻值精度要求不高的场合。

(c) 溅射  $1 \mu\text{m}$  的 Al 并且光刻作为下拉电极, 同时完成下电极与隔离电阻的互联。

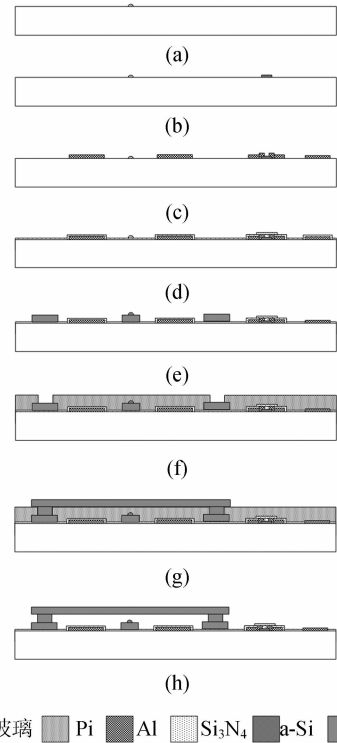
(d) 在  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  的工艺条件下 PECVD 淀积  $300 \text{ nm}$  的  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , 作为下电极与上电极的隔离层, 同时, 作为 a-Si 的钝化层。

(e) 旋涂 AZ4620 并且光刻, 电镀  $2 \mu\text{m}$  的 Au 作为 CPW, 之后光刻刻蚀 (d) 步工艺中的  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , 形成 Pad 的接触孔。

(f) 旋涂  $3.8 \mu\text{m}$  的聚酰亚胺 (PI) 作为牺牲层, 使上电极桥膜与 CPW 之间的间距为  $1.8 \mu\text{m}$ , 并且光刻出上电极与 CPW 的接触孔。

(g) 溅射  $200 \text{ nm}$  的 Au 作为种子层, 光刻 AZ4620 形成电镀模具, 利用所开发的低应力电镀工艺进行电镀, 电镀  $2 \mu\text{m}$  的 Au 作为上电极。

(h) 最后, 利用  $\text{O}_2$  plasma 干法释放 PI, 获得悬空结构, 完成工艺流程。



□玻璃 ■Pi ■Al ■Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ■a-Si ■Au

图 5 并联接触式 RF MEMS 开关的工艺流程  
Fig. 5 Fabrication processes of DC-contact shunt RF MEMS switch

完成工艺流程的并联接触式 RF MEMS 开关的扫描电镜 (SEM) 照片如图 6 所示。从 SEM 照片中可以看出, 电镀后的上电极非常平整, 具有应力小的优点。

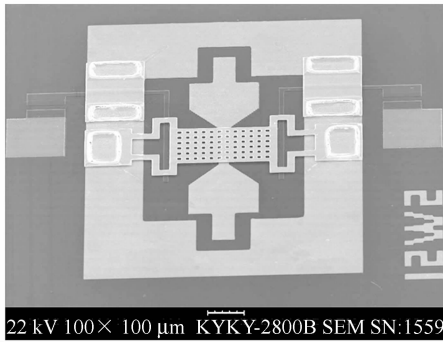


图 6 并联接触式 RF MEMS 开关的 SEM 照片

Fig. 6 SEM picture of DC-contact shunt RF MEMS switch

## 4 测试结果

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 0.05~40 GHz。所设计的并联接触式 RF MEMS 开关的下拉电压在 60 V 左右,所测得的  $S$  参数如图 7 所示,其插入损耗为  $-0.03 \text{ dB}@1 \text{ GHz}$ ,  $-0.13 \text{ dB}@10 \text{ GHz}$  和  $-0.19 \text{ dB}@20 \text{ GHz}$ ,插入损耗在 DC~30 GHz 都  $< -0.5 \text{ dB}$ 。从图 7 中的 RF MEMS 开关与 CPW 插入损耗的对比可以发现,通过对 RF MEMS 开关上电极与 CPW 间距的优化设计,使 RF MEMS 开关的插入损耗与 CPW 的插入损耗相比有较大的降低。在 30 GHz 的频率下,有 0.3 dB 的降低;在 60 V 的下拉电压驱动时,其隔离度为  $-47 \text{ dB}@1 \text{ GHz}$ ,  $-30 \text{ dB}@10 \text{ GHz}$  和  $-25 \text{ dB}@20 \text{ GHz}$ ,隔离度在 DC~30 GHz 内都  $> -23 \text{ dB}$ 。从测试结果可以看出,所设计的并联接触式 RF MEMS 开关非常适用于 DC~30 GHz 频率,是一种具有较宽应用频率范围的 RF MEMS 开关。利用图 3 所示的等效电路,使用 Agilent ADS 软件对测试结果进行拟合(如图 7 中虚线所示),得到其导通状态下金属桥膜与 CPW 信号线之间的耦合电容  $C_{cp}$  为 18 fF,与设计值的 20 fF 略有偏差;隔离状态下,金属桥

膜与 CPW 信号线之间的接触电阻  $R_s$  为  $0.1 \Omega$ ,金属桥膜的电感  $L$  为  $12.5 \text{ pH}$ 。

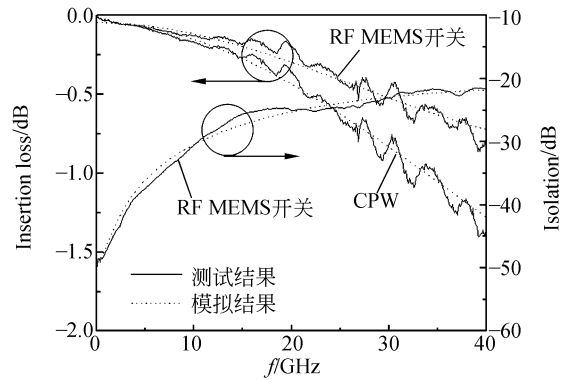


图 7 并联接触式 RF MEMS 开关的  $S$  参数测试及模拟结果

Fig. 7 Measurement and simulation of  $S$  parameter of DC-contact shunt RF MEMS switch

## 5 结论

所设计制造的并联接触式 RF MEMS 开关使用低应力电镀 Au 桥膜作为 RF MEMS 开关的上电极,实现了 Au-Au 接触,采用 Borofloat<sup>TM</sup> 玻璃作为衬底,并且通过对上电极 Au 桥膜与 CPW 间距的优化设计,使其具有较低的插入损耗。通过工艺流水后,所获得的 RF MEMS 开关的下拉电压为 60 V,其插入损耗为  $-0.03 \text{ dB}@1 \text{ GHz}$ ,  $-0.13 \text{ dB}@10 \text{ GHz}$  和  $-0.19 \text{ dB}@20 \text{ GHz}$ ,并且,其插入损耗在 DC~30 GHz 都  $< -0.5 \text{ dB}$ ;其隔离度为  $-47 \text{ dB}@1 \text{ GHz}$ ,  $-30 \text{ dB}@10 \text{ GHz}$  和  $-25 \text{ dB}@20 \text{ GHz}$ ,并且其隔离度在 DC~30 GHz 都  $> -23 \text{ dB}$ ,适用于 DC~30 GHz 频率。对所设计的并联接触式 RF MEMS 开关的等效电路与测量结果利用 Agilent ADS 软件进行拟合,获得其导通状态下金属桥膜与 CPW 信号线之间的耦合电容  $C_{cp}$  为 18 fF;隔离状态下,金属桥膜与 CPW 信号线之间的接触电阻  $R_s$  为  $0.1 \Omega$ ,金属桥膜的电感  $L$  为  $12.5 \text{ pH}$ 。

## 参考文献:

[1] HU G W, LIU Z W, HOU ZH H, et al.. A dielectric-bridge-type MEMS series contact switch for 0-10GHz applications [C]. 8th International Con-

ference on Solid-State and Integrated Circuit Technology. Shanghai, China, 2006:542-544.

[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] MACIEL J J, SLOCUM J F, SMITH J K, *et al.*. MEMS electronically steerable antennas for fire control radars [C]. *Proceedings of IEEE 2007 Radar Conference. Waltham, MA, United States, 2007*: 677-682.
- [4] HU G W, LIU Z W, LI Z J, *et al.*. Realization of a series contact MEMS switch with SiON dielectric bridge [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2008, 17(2):215-218.
- [5] TAN G L, REBEIZ G M. A dc-contact MEMS shunt switch [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2002, 12(6):212-214.
- [6] MERCIER D E, CHARVET P L, BERRUYER P, *et al.*. A dc to 100 GHz high performance ohmic shunt switch [C]. *IEEE MTT-S International Mi-*

*crowave Symposium Digest. Fort Worth, TX, United States, 2004*:1931-1934.

- [7] 胡光伟,刘泽文,侯智昊,等.用于制备高机械可靠性 RF MEMS 开关的新型工艺[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7):1213-1217.
- HU G W, LIU Z W, HOU ZH H, *et al.*. Novel process for fabrication of RF MEMS switch with high mechanical reliability [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1213-1217.
- [8] REBEIZ G M. *RF MEMS, Theory, Design and Technology* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [9] MULDAVIN J B, REBEIZ G M. High-isolation CPW MEMS shunt switches-part 1: modeling [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2000, 48(6):1045-1052.

#### 作者简介:



侯智昊(1979—),男,辽宁抚顺人,2003年于电子科技大学获得学士学位,现为清华大学微电子学研究所博士研究生,主要从事 RF MEMS 器件的设计与制造技术的研究。E-mail: houzh03@mails. tsinghua. edu. cn



刘泽文(1960—),男,安徽肥东人,1983年于中国科技大学获学士学位,1997年于法国巴黎南大学获博士学位,1997-1999年于清华大学从事博士后研究工作,现为清华大学微电子学研究所教授,主要从事 MEMS 和微电子技术研究。E-mail: liuzw@tsinghua. edu. cn



李志坚(1928—),男,浙江宁波人,中国科学院院士,1951年毕业于浙江大学物理系,1958年获苏联列宁格勒大学副博士学位,现为清华大学微电子学研究所教授,主要从事半导体物理、集成电路和硅“系统集成”芯片技术的研究。E-mail: lizhj@mail. tsinghua. edu. cn