

文章编号 1004-924X(2008)07-1213-05

用于制备高机械可靠性 RF MEMS 开关的新型工艺

胡光伟, 刘泽文, 侯智昊, 李志坚

(清华大学 微电子学研究所, 北京 100084)

摘要:对介质桥串联接触式 RF MEMS 开关的制备工艺进行了研究。介绍了开关的结构,说明了采用常规制备工艺容易在桥膜上形成应力集中,严重影响开关的机械可靠性。通过改进工艺,提出了一种侧向钻蚀刻蚀介质桥膜下金属的方法,获得了平坦的介质桥膜。最后,给出了完整的开关制备流程。与常规工艺相比,新工艺避免了应力集中问题,提高了开关的机械可靠性,成品率从 10% 提高到了 95%,工作寿命从 1 000 次提高到了 2.5×10^7 次。此外,在 23.3 V 的驱动电压下,开关插入损耗 $< 0.55 \text{ dB@DC-10 GHz}$,隔离度 $> 53.2 \text{ dB@DC-10 GHz}$ 。结果表明该工艺可满足无线通讯对 MEMS 开关成品率、寿命和微波性能的要求。

关键词: MEMS 开关; 接触式开关; 机械可靠性; 侧向钻蚀; 寿命

中图分类号: TN385; TN62; TN305.8 **文献标识码:** A

Novel process for fabrication of RF MEMS switch with high mechanical reliability

HU Guang-wei, LIU Ze-wen, HOU Zhi-hao, LI Zhi-jian

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

Abstract: In order to improve the mechanical reliability and lifetime of a series contact Radio Frequency Microelectro-mechanical System (RF MEMS) switch with dielectric bridge, the fabrication process was studied. The switch structure was analyzed, the results illustrated that the mechanical reliability of the switch was debased with regular process because of the stress concentration of the bridge film. After that, an isotropic undercutting process for forming the upper control electrodes and contact bar under the bridge was proposed to obtain plane bridge film. Finally, the whole process of the switch was presented. Compared with the regular process, the proposed method can avoid the problem of stress concentration, and can improve the mechanical reliability of the switch. As a result, the yield rate of the switch increases from 10% up to 95%, the lifetime is improved from 1 000 cycles up to 2.5×10^7 cycles. In addition, under the actuation voltage of 23.3 V, the insertion loss is less than $0.55 \text{ dB@DC-10 GHz}$, and the isolation is more than $53.2 \text{ dB@DC-10 GHz}$. These results show that proposed process can satisfy the modern wireless communication system requirements of yield rate, lifetime and microwave performance.

Key words: MEMS switch; contact switch; mechanical reliability; isotropic undercutting; lifetime

收稿日期: 2007-09-12; 修订日期: 2008-01-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60576048); 北京市科委基金资助项目 (No. GYYKW05070014)

1 引言

近十几年来,射频(Radio Frequency, RF)微机电(Micro-electro-mechanical System, MEMS)串联接触式开关以其优异的电学性能^[1-2],及适合于无线通讯领域,尤其是民用无线通讯应用的低频段的特性,正日益成为研究的热点^[3-4]。介质桥接触式开关是其中重要的一类,它既具有受应力影响较小的稳定结构,又能实现控制信号和通路信号的自然隔离。

较低的使用寿命,是当前 MEMS 开关实用化的技术瓶颈之一^[5]。影响使用寿命的因素主要有表面粘附^[6]、接触失效^[7]、封装环境^[8]等。而机械可靠性,是影响介质桥开关寿命的关键因素。在外力作用下,在弹性体形状或截面尺寸发生突变的局部区域,应力会急剧增大,这种现象称为应力集中。桥膜通常制备在一定的结构图形之上,由于平面工艺的特点,桥膜将在局部形成起伏并引起应力集中,使桥膜在应力集中处断裂而发生失效。因此提高桥膜的机械可靠性,是提高介质桥开关寿命的首要问题。

本文提出一种新型的介质桥接触式 MEMS 开关的制备工艺,其关键是采用侧向钻蚀法刻蚀介质桥下面的金属层形成上控制电极和接触金属,以提高桥膜的平整度,避免应力集中问题。结果表明,改进工艺制备得到的开关获得了良好的机械可靠性,成品率由改进前的 10% 提高到了 95%,寿命从 1 000 次提高到了 2.5×10^7 次。

2 开关工艺设计

介质桥接触式 RF MEMS 开关,主要由共面波导(Coplanar Waveguide, CPW)、两对侧拉控制电极、两端支撑的介质桥以及接触金属组成,如图 1 所示。它通过在两对侧拉控制电极施加静电力,来驱动开关进行动作。CPW 信号线在桥下方断开,在开关吸合状态下,接触金属和信号线形成欧姆接触,实现微波信号的连接。上电极和接触金属断开,以实现控制信号和微波信号的自然隔离。下电极上方制备介质层,防止上下电极间的短路。

在开关制备过程中,桥膜制作是最关键

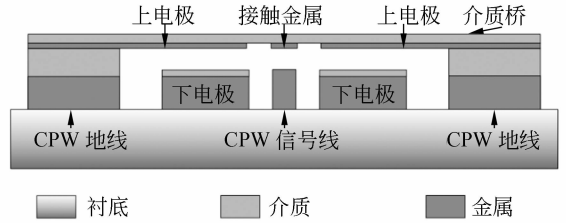


图 1 开关侧向示意图

Fig. 1 Side scheme of switch

的工艺。一般的制备工艺是在旋涂完牺牲层后,先溅射一层金属,见图 2(a);然后图形化该金属层形成接触金属和上电极,见图 2(b);接着淀积介质层,并刻蚀形成带系列小孔的桥膜形状,见图 2(c);最后释放牺牲层,见图 2(d)。但是,采用这种工艺,介质桥将随金属层起伏,在金属结构边缘上方形成应力集中,如图 2(d)所示。应力集中区的形成,使介质桥容易在该处断裂,严重影响桥膜的机械可靠性,如图 3 所示。

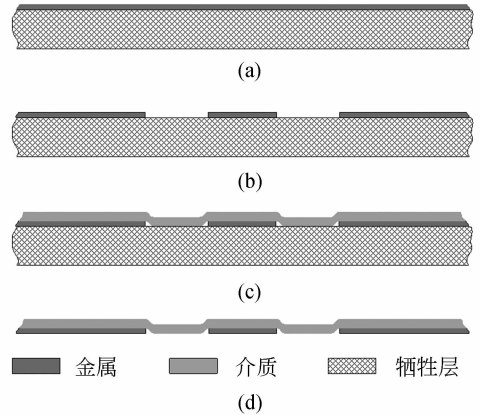


图 2 常规桥膜制备工艺

Fig. 2 Regular fabrication process of bridge

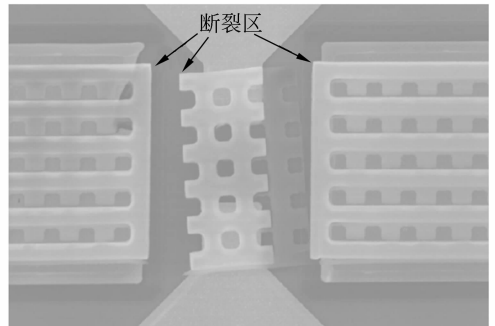


图 3 介质桥机械失效

Fig. 3 Mechanical failure of dielectric bridge

为了避免应力集中,开关需要有平坦的桥膜。本文提出了一种新型的制备工艺,如图 4 所示。旋涂完牺牲层后,先溅射一层金属,见图 4 (a);随即淀积介质层,并连同金属层一起刻蚀形成带 $8\ \mu\text{m}\times 8\ \mu\text{m}$ 大小系列小孔的桥膜形状,见图 4(b);接着在光刻胶的保护下,用金属刻蚀液透过小孔侧向钻蚀,图形化金属层,形成接触金属和上电极,见图 4(c);最后释放牺牲层,见图 4 (d)。采用改进后的工艺,能够使 SiON 桥膜保持平整的形状,避免应力集中区,提高桥膜机械可靠性,如图 4(d)所示。

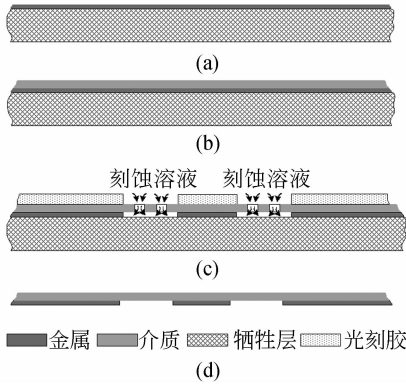


图 4 新型桥膜制备工艺

Fig. 4 Novel fabrication process of bridge

3 开关制备

整个开关的制备,可以通过略加修改的 CMOS 工艺进行,如图 5 所示。

第 1 步:在 $10\ \text{cm}$ ($4\ \text{in}$) 的高阻硅 ($900\ \Omega\cdot\text{cm}$, $[100]$ 晶向) 衬底表面湿氧化,生成一层 $0.8\ \mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 (Silicon Dioxide, 二氧化硅),并部分刻蚀,形成 $0.3\ \mu\text{m}$ 高的凸点形状,见图 5(a)。

第 2 步:溅射 Au 种籽层,以厚胶 AZ4620 为模具,电镀 $2\ \mu\text{m}$ 厚的 Au 层,刻蚀剩余种籽层,形成 CPW 和下电极;然后在下电极上 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD),淀积 $0.3\ \mu\text{m}$ 厚的 SiN 作电极间的隔离层;信号线接触区的凸点通过自然转移获得,见图 5(b)。制备凸点是为了开关吸合时在接触金属和信号线之间保持良好的接触。

第 3 步:旋涂一层 PI (Polyimide),并固化作为牺牲层;在牺牲层上溅射一层 $0.3\ \mu\text{m}$ 厚的

Au, PECVD 一层 $0.6\ \mu\text{m}$ 厚的 SiON;然后将 SiON 层和 Au 层依次刻蚀出带系列小孔的桥膜形状,见图 5(c)。

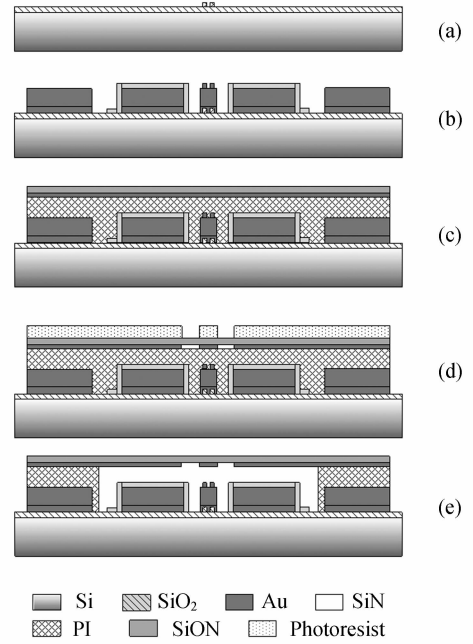


图 5 工艺流程图

Fig. 5 Main fabrication flow

第 4 步:旋涂一层光刻胶,并图形化;通过 SiON 桥边缘和桥上小孔,采用金属刻蚀液侧向钻蚀法,图形化下面 Au 层,形成接触金属和侧拉上电极,见图 5(d)。

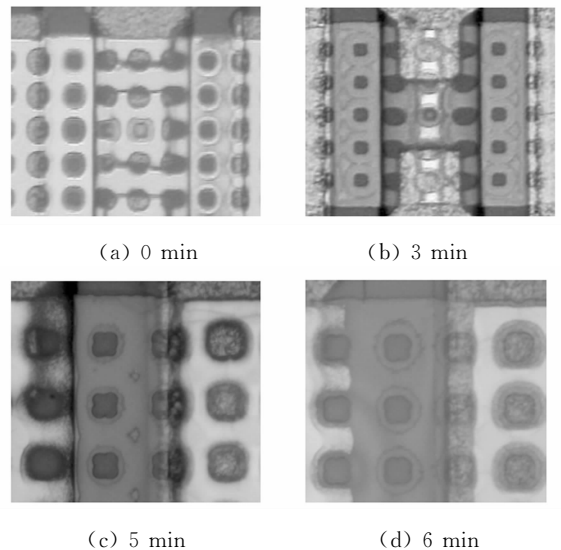


图 6 侧向钻蚀过程

Fig. 6 Process of isotropic undercutting

第 5 步:去掉残留光刻胶,在氧等离子体氛围中,释放牺牲层,并留下部分 PI 作为桥膜支撑柱,完成开关制备,见图 5(e)。

Au 层刻蚀液为 KI/I₂ 溶液,配比为 KI:I₂:H₂O=10 g:25 g:100 ml,在室温下,刻蚀速率为 1.5 μm/min。在制备过程中,侧向钻蚀完成 Au 层刻蚀,需要 6 min,刻蚀过程如图 6 所示。

4 结果及讨论

制备得到的介质桥接触式 RF MEMS 开关如图 7 所示。开关整体尺寸为 880 μm×840 μm。CPW 主体部分尺寸为 G/S/G=120 μm/200 μm/120 μm,在 DC-10 GHz 频段内满足 50 Ω 特征阻抗匹配要求。CPW 信号线中间断开,并在断开处窄缩,以使开关在关态获得较高隔离度。桥膜悬空部分长度为 500 μm,宽度为 100 μm。桥膜上刻出 8 μm×8 μm 的系列小孔,用以释放桥下牺牲层,并减小开关动作过程中的空气阻尼。

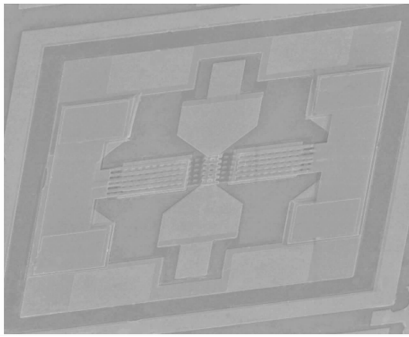


图 7 开关 SEM 照片

Fig. 7 SEM photo of switch

开关的接触为 Au-Au 接触,这是由于 Au 具有良好的接触特性和较小的接触电阻。

桥膜除了随下方的 CPW 和下电极拓朴结构稍有起伏外,比较平整地横悬于 CPW 上方,如图 8 所示。桥膜与信号线之间的初始间隙为 2.0 μm。根据基底曲率法测量,SiON 桥膜的初始张应力为 76.8 MPa。经测试,开关的下拉电压为 23.3 V。

得益于改进后的侧向钻蚀工艺,SiON 桥膜没有在下面 Au 边缘处形成应力集中区,提高了桥膜的机械可靠性。这可以由工艺改进前后的成品率得到验证。工艺改进前开关的流水成品率只

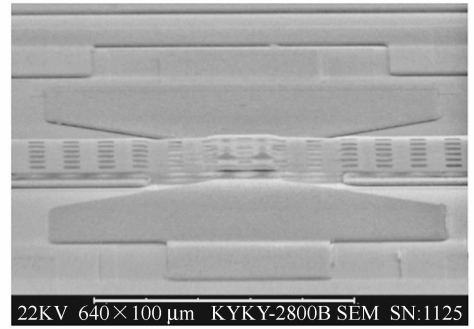


图 8 桥膜细节图

Fig. 8 SEM detail photo of bridge

有 10% 左右(批量:2 000 个),而且次品原因主要是桥膜在应力集中区断裂,如图 2(d)所示。采用改进工艺制备的开关,成品率达到了 95% 以上(批量:2 000 个),而且次品主要是由其他工艺上的原因造成的。

通过由激光发生仪和位移测试仪组成的光学台阶仪,可以测得开关在 30 V 驱动电压下,桥膜下拉时间为 80 μs,桥膜释放至首次达到平衡位置时间为 140 μs,释放至稳定状态的时间为 320 μs,开关工作周期为 400 μs。

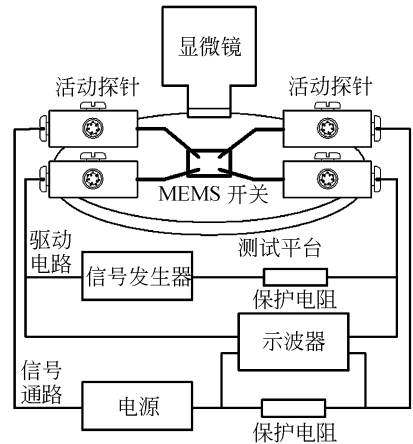


图 9 寿命测试系统示意图

Fig. 9 Scheme of lifetime testing system

寿命测试系统如图 9 所示,由信号发生器输出电压 30 V 频率 4 kHz 的方波信号,连接开关上下电极来控制桥膜的动作,并由示波器观察驱动电路的波形;电源输出恒压,通过保护电阻连接信号线两端,用示波器检测保护电阻两端的电压变化,来判断开关的通断状态。

图 10 为寿命测试过程中,示波器显示的信号

照片。由图中信号可知,施加驱动高电平后,相隔约 $80 \mu\text{s}$ 左右,信号线接通;撤消驱动电压,桥膜随即弹起,信号线断开。

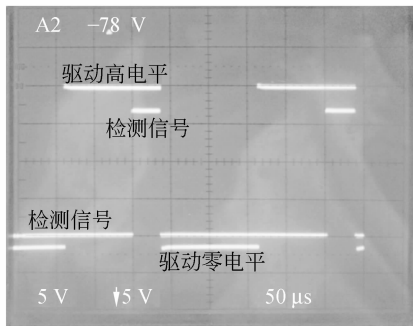


图 10 示波器照片

Fig. 10 Photo of oscillograph

开关工作约 2.5×10^7 次以后,信号线不再导通。通过显微镜观察,开关桥膜不再动作。采用改进前工艺制备的开关,大约经历了 1 000 次工作后,桥膜即不再动作。相比之下,采用改进工

艺后,开关寿命提高了 2.5×10^4 倍。

开关的 RF 性能由 HP8722ES 网络分析仪和 SUSS PM5 微波探针台测试得到。结果显示,在 DC-10 GHz 频段,开关开态插入损耗 $< 0.55 \text{ dB}$,隔离度 $> 53.2 \text{ dB}$ 。

5 结 论

本文提出了一种新型开关制备工艺,通过湿法侧向刻蚀,图形化介质桥下面的 Au 层,提高了桥膜的平整度,避免了应力集中问题,提升了机械可靠性。与常规工艺相比,成品率从 10% 提高到了 95%,寿命从 1 000 次提高到了 2.5×10^7 次。另外,在开关工作电压为 23.3 V;30 V 电压驱动时,开关速率为 $400 \mu\text{s}$;在 DC-10 GHz 频段下,插入损耗 $< 0.55 \text{ dB}$,隔离度 $> 53.2 \text{ dB}$,满足现代民用无线通讯要求。

参考文献:

- [1] REBEIZ G M. RF MEMS switches status of the technology, digest of technical papers[C]. *The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems*, 2003, (2):1726-1729.
- [2] LEI X F, LIU Z W, XUAN Y, et al.. Effect of dielectric layer surface roughness on the isolation of a RF MEMS switch [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006, 46(1): 122-125.
- [3] LIU L J. High performance RF MEMS series contact switch-design and simulations[C]. *Electronic Components and Technology Conference*, 2007: 158-164.
- [4] MIHALOVICH R E, KIM M, HACKER J B, et al.. MEM relay for reconfigurable RF circuits [J]. *Microwave Wireless Components Letters*, 2001, 11(2): 53-55.
- [5] CHOW L W, VOLAKIS J L, SAITOU K, et al.. Lifetime extension of RF MEMS direct contact switches in hot switching operations by ball grid array dimple design [J]. *Electron Device Letters*, 2007, 28(6): 479-481.
- [6] 胡小东. MEMS 开关的失效模式及机理的分析[J]. *微纳电子技术*, 2002(10):31-35.
- [6] HU X D. Failure mode and mechanism of a MEMS relay[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2002(10):31-35. (in Chinese)
- [7] COUTU R A, KLADITIS P E, CORTEZ R, et al.. Micro-switches with sputtered Au, AuPd, Au-on-AuPt, and AuPtCu alloy electric contacts[C]. *Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts*, 2004: 214-221.
- [8] Van SPENGEN W M, CZARNECKI P, PUERS R, et al.. The influence of the package environment on the functioning and reliability of RF-MEMS switches[C]. *Reliability Physics Symposium*, 2005: 337-341.

作者简介:胡光伟(1979—),男,浙江宁波人,博士,主要从事 RF MEMS 开关及 MEMS 天线的研究;E-mail: hgw02@mails. tsinghua. edu. cn

李志坚(1928—),男,浙江宁波人,教授,中国科学院院士,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