

Research on Release of Structure Layer for RF MEMS Capacitive Switches^{*}

ZHAO Xinghai^{1*}, LI Yuping¹, ZHENG Yingbin¹, GAO Yang¹, JIA Xiaohui²

(1. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan, 621900, China;
2. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan, 621010, China)

Abstract: The fabrication process and the removal of polyimide sacrificial layer for RF MEMS capacitive switches are investigated. A Si₃N₄ dielectric layer was deposited on the grounding wire layer using PECVD technology in this work, and then the DC bias gold line layer was sputtered on the dielectric layer Si₃N₄, so the isolation of DC and AC has been implemented. The wet and dry etching technology for removing the sacrificial layer has been discussed. The dry etching method induces the Si₃N₄ dielectric layer etched and damaged slightly. The structure layer has been released successfully by using wet etching combined with the critical point drying technology. The releasing process and parameters have been presented. The test pull-down voltage of RF MEMS capacitive Switch prototype is 30 V ~ 40 V and the pull-down distance is (1.7±0.2) μm, which are in agreement with the design.

Key words: RF MEMS; capacitive switch; polyimide sacrificial layer; releasing

EEACC: 2575; 2180

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2012.03.008

RF MEMS 电容式开关结构层释放技术^{*}

赵兴海^{1*}, 李玉萍¹, 郑英彬¹, 高 杨¹, 贾晓慧²

(1. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 研究了 RF MEMS 开关的制造工艺流程和聚酰亚胺牺牲层的去除工艺。在开关的设计和加工中采用在信号线两侧的地线上生长一层绝缘介质层, 直流偏置线生成在绝缘介质层之上, 与桥的锚点相连接, 实现了交直流隔离。讨论了干法刻蚀和湿法刻蚀牺牲层技术。干法刻蚀容易造成绝缘介质层的刻蚀和损伤。采用湿法刻蚀结合临界点干燥技术, 可以获得理想的微梁结构。通过测试, 开关样品的下拉电压为 34 V ~ 40 V, 下拉距离为 (1.7±0.2) μm, 满足设计要求。

关键词: RF MEMS; 电容式开关; 聚酰亚胺; 释放

中图分类号: TN305.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)03-0322-04

RF MEMS 技术是 MEMS 研究领域的一个分支, 它是二十世纪九十年代以来 MEMS 领域的最为重要的研究热点之一。采用 RF MEMS 技术可以制造出性能更高、可靠性更高、体积更小、价格更低的射频器件, 主要包括: 开关, 变容器, 谐振器, 滤波器, 电感器, 天线等。RF MEMS 开关在 MEMS 射频器件中是一种最基本的元器件, 也是射频电路的核心器件, 它既可以单独使用, 也可以与其他微波电路或器件组合, 形成其他复合器件, 比如移相器、可重构天线、滤波器等^[1-4]。

RF MEMS 开关的主要制造工艺为表面硅微机械加工工艺(表面工艺)。表面工艺是 RF MEMS 器件或组件的最主要的加工手段之一^[5]。1979 年文

献[6]报道了第一只 MEMS 开关, 它是采用静电驱动的悬臂梁式微小型开关, 用来控制低频电信号的通断。虽然近些年来, MEMS 开关的研究已经取得巨大进展, 已经逐步有实验室阶段进入商品化。但是 RF MSMS 开关仍然存在驱动电压高、可靠性低、成品率不高等问题。在 RF MEMS 开关的制作工艺流程中, 主要包括种子层技术、牺牲层技术、微电镀技术、封装技术等, 其中结构层释放技术是一个最为关键的工艺步骤^[7-8], 它直接影响到开关的微波性能和可靠性^[9-11]。本文主要以电容式 RF MEMS 开关为例子, 讨论了如何去除聚酰亚胺牺牲层, 释放结构层, 获得理想桥结构。

1 开关工艺流程

MEMS 电容式并联开关结构的剖面图和俯视图如图 1 所示,开关是在共面波导传输线的基础上,放置一个与接地线相连的悬空金属桥膜作为上电极。金属桥(Au)与信号线有一定初始间距。信号线上表面有一层绝缘介质层(Si_3N_4),衬底材料是硅。

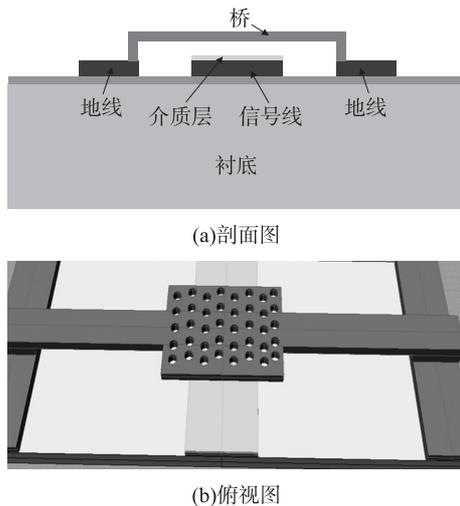


图1 电容式 RF MEMS 开关结构示意图

开关的整个加工工艺流程如图 2 所示。首先,清洗硅片表面,去除各种无机杂质和有机物等污染物,防止器件电性能受到影响,可提高器件可靠性、稳定性和成品率;然后,采用热氧化的方法生长氧化层,即先干氧,再湿氧,最后干氧的方法生长一层 $1\ \mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 作为缓冲介质层。目的是使硅衬底具有良好的电绝缘性,防止漏电流,降低衬底损耗和寄生电容;制备 CPW 传输线。二氧化硅和金的直接粘

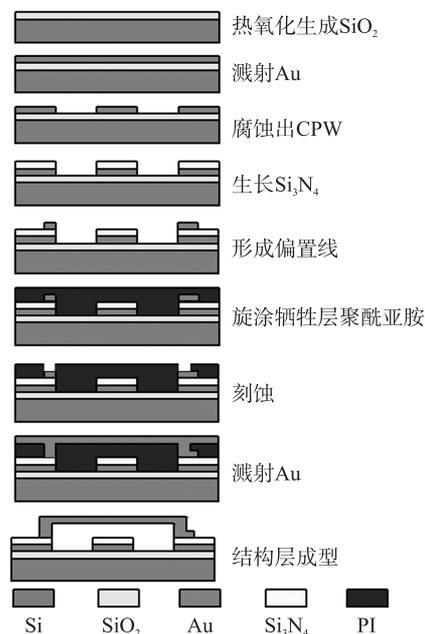


图2 RF MEMS 电容式开关加工工艺流程

附性不好,但金属 Cr 与二氧化硅和金均有好的粘附性,所以选用 Cr/Au 作为传输线材料。在 SiO_2 层上溅射一层 $1\ \mu\text{m}$ 厚的 Cr/Au 金属层;光刻出传输线的图形。采用 Au 腐蚀液腐蚀 Au,再采用 Cr 腐蚀液腐蚀 Cr,最后去胶形成传输线的图形;制备绝缘介质层。采用 PECVD 工艺淀积 $0.15\ \mu\text{m}$ 厚的 Si_3N_4 电介质层。采用 RIE (Reactive Ion Etching, 反应离子)刻蚀工艺刻蚀 Si_3N_4 电介质层,形成在 MEMS 桥正下方的信号线区域和地线上均覆盖有 Si_3N_4 介质层的结构,采用平面化技术使其表面光洁平整;比较关键的工艺是制备牺牲层。牺牲层用于支撑 MEMS 桥。旋涂厚度为 $2.0\ \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺,采用平面化技术使其表面光洁平整;然后是制备锚点。在牺牲层上刻蚀出锚点的图形,电镀金属 Au 作为锚点,实现偏置线与桥结构的联通,并增加锚点的强度,防止锚点变形;再就是制备 MEMS 桥。在牺牲层上蒸镀 $1.5\ \mu\text{m}$ 厚的金层。光刻出桥的图形,湿法刻蚀形成 MEMS 桥结构;最后释放牺牲层。可以采用干法或者湿法去除牺牲层,获得悬空结构。

对于 RF 开关,残余应力主要是淀积工艺时的非均匀变形、晶格失配等原因引起。从淀积工艺上考虑,减小残余应力主要方法有:选择合适的淀积工艺条件(温度,速度)等。对于较厚的结构层,考虑采用分次淀积的方法。淀积后采用高温退火工艺。由于高温退火会严重影响牺牲层的质量和后续的释放工艺,因此,这种方法不适合 RF 开关的研制。我们主要是通过淀积工艺条件的优化和多次淀积的方法以减小淀积结构层时残余应力的产生。传统的 MEMS 电容式并联开关将偏置电压直接加载到 CPW 的中心导体带上。这种方式由于交直流信号共用一个电极,存在交直流干扰的问题。为了解决这个问题,在信号线两侧的地线上生长一层绝缘介质层,隔离地线,直流偏置线设计在绝缘介质层之上,与桥的锚点相连接。当直流偏置电压加载到偏置线上, MEMS 桥由于静电力作用下拉,改变微波信号的传输速度。偏置电路加工时,在地线上生长绝缘介质层后,刻蚀出偏置线即可,加工工艺相对比较容易实现。

2 结构层释放工艺

在 RF MEMS 开关微桥的释放工艺中,主要采用可溶性的聚酰亚胺作为牺牲层。为了去除牺牲层,释放结构层,主要有两种方式:干法腐蚀和湿法腐蚀。

对于以光刻胶、聚酰亚胺等高分子聚合物为牺

性层的情况,可以采用等离子体刻蚀的方法来释放 MEMS 结构。 O_2 和 CF_4/O_2 气氛的等离子体刻蚀很容易地去除光刻胶和聚酰亚胺材料。等离子体刻蚀一般是各向同性的,刻蚀向着深处和四周同时发展。这种刻蚀最终能够完全去除膜底下的牺牲层材料。等离子体的刻蚀时间与膜上开孔的尺寸、间隔,以及牺牲层的厚度都有关,一般需要 25 min ~ 45 min。等离子体刻蚀后的表面十分清洁,不需要其它的后续清洗步骤。但随着刻蚀时间的增加,薄膜温度会升高到 $250\text{ }^\circ\text{C}$ ~ $350\text{ }^\circ\text{C}$,为提高成品率,需要将工艺优化。但是 CF_4 气体对 Si_3N_4 层一定的刻蚀作用,在本实验中最大刻蚀深度达到了 100 nm,如图 3 所示。可以采用铝作为掩蔽层,减少 CF_4 气体的侧向刻蚀作用。先采用 CF_4 进行初刻蚀,然后再采用 O_2 刻蚀,可以有效的减少对 Si_3N_4 的刻蚀作用^[12]。

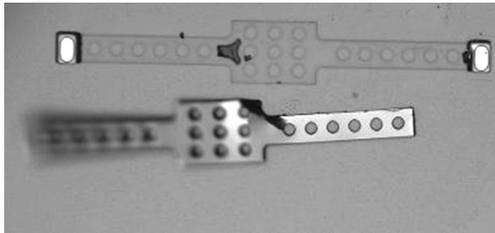


图3 干法刻蚀对 Si_3N_4 的刻蚀作用

另一种释放方法是湿法腐蚀,一般用于光刻胶、聚酰亚胺、PECVD 氧化层和铜的刻蚀。湿法腐蚀后的圆片需要在去离子水中清洗,以洗除表面残余的化学物质。清洗后如果采用一般的风干方法,水表面的张力会使 MEMS 开关粘附在衬底上,无法回复到原来位置,如图 4 所示。可以采用临界点干燥法和升华干燥法来消除粘附。

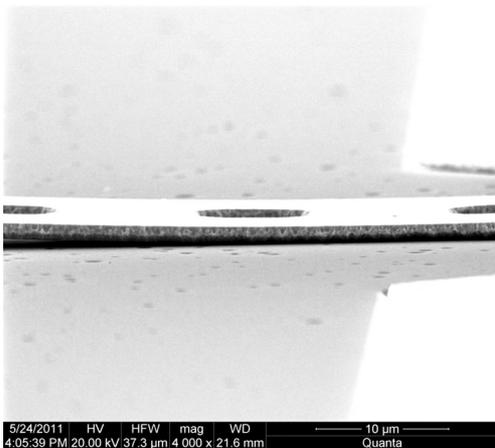


图4 湿法释放时结构层黏附导致梁变形

通过优化的牺牲层释放工艺和参数控制可以有效地去除聚酰亚胺牺牲层,获得较好的微梁结构(图 5)。我们采用的湿法释放工艺关键步骤和参数

如下:①牺牲层制备工艺参数:型号 PI 305IID-II;匀胶 1500RPM/50s;前烘条件 $150\text{ }^\circ\text{C}/30\text{ min}$;图形化后后烘 $200\text{ }^\circ\text{C}/20\text{ min}$;牺牲层厚: $2.0\text{ }\mu\text{m}$ 。②湿法释放:0.5% NaOH 溶液腐蚀样品浸没在腐蚀液中腐蚀 2.5 h。③清洗:去离子水漂洗 5 次,无水乙醇漂洗 3 次。④ CO_2 临界点干燥释放:液态 CO_2 置换时间 30 min,压力 1 440 psi,温度 $41\text{ }^\circ\text{C}$,达到临界点。

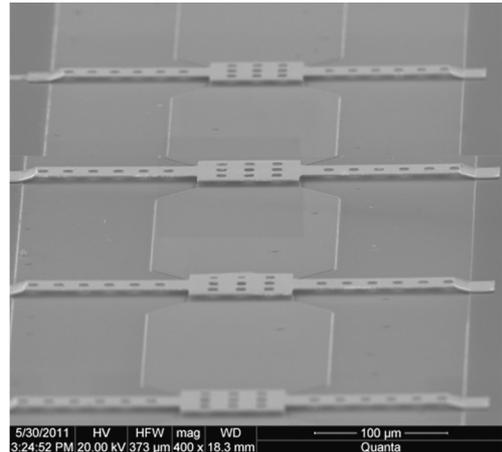


图5 释放的梁结构

3 结论

RF MEMS 电容式开关制造过程中,最为重要的环节之一就是微桥结构的释放。本文讨论了整个 RF MEMS 电容式开关的制造工艺过程,可以通过淀积工艺条件的优化和多次淀积的方法以减小淀积结构层时残余应力的产生。对聚酰亚胺牺牲层的去除,是获得理想微梁结构的关键。采用干法刻蚀容易造成绝缘介质层 Si_3N_4 的刻蚀。本文采用湿法刻蚀技术,通过优化工艺参数和采用临界点干燥释放工艺获得了理想的微梁结构。通过采用 Veeco 的动态测试仪,获得 RF MEMS 开关的下拉电压为 $34\text{ V} \sim 40\text{ V}$,下拉距离为 $(1.7 \pm 0.2)\text{ }\mu\text{m}$ 。

参考文献:

- [1] Hayden J S, Rebeiz G M. Very Low-Loss Distributed X Band and Ka-Band MEMS Phase Shifters Using Metal-Air-Metal Capacitors [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(1): 309-314.
- [2] Wong C H, Tan M J, Liew K M. Electrical Characteristics of RF Capacitive Microswitch [J]. Sensors and Actuators, 2003, 10(2): 296-310.
- [3] Lucyszyn S. Review of Radio Frequency Microelectromechanical Systems Technology [J]. IEE Proc. Sci. Meas. Technol., 2004, 151(2): 93-103.
- [4] 郁元卫, 贾世星, 朱健, 等. 宽带直接接触式 RF MEMS 开关 [J]. 传感技术学报, 2008, 21(4): 688-691.

- [5] Dong-Ming Fang, Shi Fu, Ying Cao, et al. Surface Micromachined RF MEMS Variable Capacitor[J]. *Microelectronics Journal*, 2007, 38:855-859.
- [6] Petersen K E. Micromechanical Membrane Switches on Silicon[J]. *IBM J. Res. Develop.*, 1979, 23:376-385.
- [7] 彭慧耀, 于映, 罗仲梓, 等. 聚酰亚胺 (PI) 树脂在电容式 RF MEMS 开关制作中的应用[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(5): 1896-1899.
- [8] 胡光伟, 刘泽文, 侯智昊, 等. 一种低驱动电压的 SP4T RF MEMS 开关[J]. *传感技术学报*, 2008, 21(4): 656-659.
- [9] 陶佰睿, 苗凤娟. RF MEMS 工艺中牺牲层的去除方法研究[J]. *微电子学*, 2007, 37(4): 511-514.
- [10] 汪继芳, 刘善喜. RF MEMS 开关工艺技术研究[J]. *电子与封装*, 2010, 10(3): 27-31.
- [11] 陈俊收, 尤政, 李滨. 桥式射频 MEMS 开关上电极薄膜的残余应力改进模型[J]. *纳米技术与精密工程*, 2011, 9(1): 16-20.
- [12] 胡梅丽, 赖宗声, 茅惠兵, 等. RF/MW MEMS 开关中聚酰亚胺的牺牲层技术研究[J]. *微电子学*, 2005, 35(1): 5-7.



赵兴海(1984-),男,助理研究员,主要研究方向为 RF MEMS 技术, xinghaiuestc@126.com。