

射频微机械 CPW 开关的研究

张正元^{1,2}, 温志渝¹, 徐世六², 张正番², 黄尚廉¹

(1. 重庆大学光电工程学院, 重庆 400044; 2. 国家模拟集成电路重点实验室, 重庆 400060)

摘 要: 本文采用聚酰亚胺牺牲层技术和二氧化硅介质隔离技术, 成功地在绝缘多晶硅衬底上研制出一种射频微机械 CPW 开关. 初步测试结果如下: 开态电容为 0.21pF, 关态电容为 6.1pF, 致动电压为 22V, 关态下的隔离度为 35dB, 开态下插入损耗为 3dB. 该工艺完全与硅基 IC 工艺兼容, 这为射频微机械 CPW 开关与 IC 实现单片集成化, 降低体积提高可靠性打下了基础.

关键词: 射频微机械开关; CPW 开关; 金属膜; 绝缘层; 牺牲层

中图分类号: TN820.8⁺3

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2003) 05-0671-03

Research for RF Micromechanical CPW Switch

ZHANG Zheng-yuan^{1,2}, WEN Zhi-yu¹, XU Shi-lu², ZHANG Zheng-fan², HUANG Shang-lian¹

(1. Dept. of Optoelectronic Eng. Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. National Laboratory of Analog Integrated Circuits, Chongqing 400060, China)

Abstract: An RF micromechanical CPW switch on the isolation polysilicon has been developed by using polyimide sacrificial layer, and by dielectric isolating technology. The preliminary test results are as follows: the C_{off} and C_{on} are 0.21pF, 6.1pF respectively; the actuated voltage is 22V. The isolation is 35dB in the off state, and insertion loss is 3dB in the on state. The process is compatible with silicon IC, so is the basis of monolithically integrating RF micromechanical switch and IC for high reliability and low volume.

Key words: RF micromechanical switch; CPW switch; metal membrane; isolation layer; sacrificial layer

1 引言

与 PIN 开关相比, 射频微机械 CPW (coplanar waveguide) 开关没有使用 PN 结或金半结 (即肖特基结), 消除了 PIN 开关所固有的 PN 结 $I-V$ 非线性和因扩散电阻等带来的高插入损耗等问题, 因而它具有线性度高、插入损耗低的优点而备受关注^[1~4]. 在 1999 年, Z. Jamie Yao 等人在高阻衬底 (高阻硅、蓝宝石、GaAs 衬底) 上研制出了一种射频微机械 CPW 开关, 其开关的致动电压是 50V^[3]. 在 2001 年, 朱健等人在 3000 μcm 的硅衬底上研制出一种 DC-20GHz 的射频微机械开关^[1]. 随着通讯整机系统向小型化方向进一步发展, 要求射频微机械 CPW 开关与 IC 实现单片集成化, 形成一种开关系统, 以降低体积, 提高可靠性. 为此, 本文着重对微机械开关的设计改进和与 IC 工艺兼容方面开展研究, 利用聚酰亚胺牺牲层技术成功地研制出一种新颖的射频微机械 CPW 开关. 通过介质隔离工艺技术在低阻硅材料 (电阻率为 1-10 μcm) 上形成绝缘的多晶硅区域, 然后将射频微机械 CPW 开关制作在绝缘的多晶硅衬底上, 这就满足了射频微机械 CPW 开关必须制作在高阻衬底上的要求. 该工艺完全与 IC 工艺兼容, 完全能够实现与 IC 单片集成化, 这为射频微机械 CPW 开关与 IC 实现单片集成化

降低体积提高可靠性打下了基础.

2 射频微机械 CPW 开关的工作原理与设计

射频微机械 CPW 开关的结构如图 1 所示^[1], 它是由一薄层金属膜像桥一样悬在底电极上方, 底电极上有一层绝缘层保证金属膜与底电极实现直流绝缘. 当接地的这一层金属膜桥悬在空中处于平衡位置时, 如图 1(a) 所示, 此时在底电极上的 RF 信号可以自由通过, 开关处于开态; 当在底电极与悬在空中的金属膜桥之间加一直流电压时, 它们之间就会产生静电引力, 底电极通过静电引力作用把金属膜拉到与绝缘层接触, 如图 1(b) 所示, 这时在底电极上的 RF 信号通过底电极与金属膜之间的大电容直接到地, 因而 RF 信号就传送不到

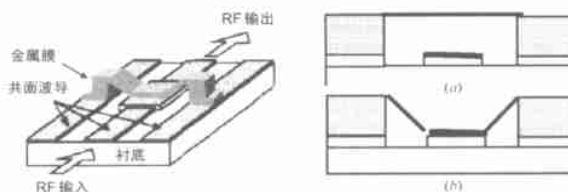


图1 射频微机械 CPW 开关的结构图

收稿日期: 2002-05-23; 修回日期: 2002-09-12

基金项目: 重庆市科技攻关项目 (No. 20017036)

底电极的输出端,在底电极的输出端检测不到 RF 信号,即实现了开关的关态.这是基于静电引力作用的原理来改变底电极与地之间的距离,以底电极与地之间电容的变化来实现开关的功能.

当金属膜没有受静电引力的作用时,金属膜处于平衡状态,这时金属膜与底电极之间的电容表示为^[1]

$$C_{on} = 1 / \left(\frac{h_D}{\epsilon_0 A} + \frac{g_0}{\epsilon_0 A} \right) \quad (1)$$

其中 C_{on} 表示开关开态下的电容, ϵ_D 与 ϵ_0 分别表示绝缘层和空气的介电常数; h_D 表示绝缘层的厚度, g_0 表示绝缘层与金属膜之间的空高, A 为金属膜与底电极之间交叠的面积.

当开关的金属膜受静电引力的作用超过某个值时,金属膜被下拉到与底电极上的绝缘层接触,此时金属膜与底电极之间的电容表示为^[1]

$$C_{off} = (\epsilon_D A) / h_D \quad (2)$$

这种开关的特性如:插损、隔离度都取决于开关的开态和关态电容.因此开关的开态电容和关态电容需要严格调整,以满足 CPW 开关的要求.

开关的致动电压可表示为^[1]

$$V_p = \sqrt{\frac{8k}{27\epsilon_0 W w g_0^3}} \quad (3)$$

其中, k 为金属膜的有效弹性系数, w 为 CPW 的底电极宽度, w 为金属膜的宽度, ϵ_0 为真空介电常数, g_0 为底电极与金属膜桥的距离.这个 k 可以近似表示为

$$k = \frac{32 E^3 w}{L_m^3} + \frac{8(1-\nu)tw}{L_m} \quad (4)$$

其中 E 为金属膜材料的杨氏模量, t 为金属膜的厚度, L_m 为金属膜的长度, ν 为金属膜残余的张应力, ν 为金属膜材料的泊松比.

从公式(3)和(4)可以看出,开关的致动电压与 \sqrt{k} 的平方根成正比,而 k 又与金属膜材料的杨氏模量、金属膜的厚度和宽度成正比;与金属膜的长度成反比.因此,调整金属膜的厚度、宽度和选择合适的金属材料可以降低开关致动电压.但由于材料选择的限制,这种方法降低开关的致动电压还是有限的.为了进一步降低开关的致动电压,以满足通讯使用的要求,还需要采用其它方法或结构来改善该开关的致动电压.本文针对这一问题,提出采用在金属膜的两个接近支撑点处各刻出一个槽的方法,让金属膜完全靠四根金属梁拉着,这样降低了金属膜的有效弹性系数,从而大大降低了开关的致动电压.另外,本文通过用 ANSYS 模拟优化,调整金属膜与底电极之间的距离和金属膜与底电极之间交叠的面积使开关的开态电容与关态电容的比值达到 100,保证该开关远远满足射频通讯的使用要求(一般射频通讯的通断信号比值要求大于 20).其设计的射频微机械 CPW 开关尺寸如下:

底电极的宽度为 $180\mu\text{m}$,与两边的地线距离都为 $50\mu\text{m}$,金属膜的长宽分别为 $300\mu\text{m}$, $280\mu\text{m}$.

3 射频微机械 CPW 开关的研制

射频微机械 CPW 开关的衬底制作工艺:以集成电路

用的单晶硅材料片(电阻率为 $5-7\Omega\cdot\text{cm}$)作衬底材料,在这个衬底材料上氧化一层二氧化硅($1\mu\text{m}$)——光刻用作射频微机械 CPW 开关衬底的区域——依靠二氧化硅作掩蔽层,用 KOH 溶液(KOH40% 异丙醇 = 100:1,温度为 75 度)湿法刻蚀射频微机械 CPW 开关衬底区域的硅(深度为 $50-70\mu\text{m}$)——去掉二氧化硅掩蔽层——外延绝缘多晶硅(厚度为 $500\mu\text{m}$)——减薄单晶硅衬底(直到刻槽区域的多晶硅露出来为止)——抛光单晶衬底——用于作射频微机械 CPW 开关的绝缘多晶硅衬底和用于作集成电路的低阻硅衬底都制作完毕.

研制射频微机械 CPW 开关的工艺流程如下:在前面制作完毕的射频微机械 CPW 开关衬底材料上氧化二氧化硅($1\mu\text{m}$)——光刻(形成射频微机械 CPW 开关的底电极区)——刻蚀二氧化硅和绝缘多晶硅(刻蚀多晶硅的深度为 $1.2-1.5\mu\text{m}$)——溅射硅铝($1.2\mu\text{m}$)——光刻(形成底电极和地线)——淀积氮化硅($0.13\mu\text{m}$)——光刻(电极引出孔)——悬涂聚酰亚胺——光刻(形成聚酰亚胺牺牲层区域)——溅射硅铝——光刻(形成射频微机械 CPW 开关的金属膜桥和上层引线)——去掉光刻胶和聚酰亚胺牺牲层——获得射频微机械 CPW 开关.

从前面的理论分析知道,金属膜桥的厚度增加会加大射频微机械 CPW 开关的致动电压,因此,为了降低射频微机械开关的致动电压,需要尽量降低金属膜桥的厚度.但是,金属膜桥厚度愈薄,金属膜桥愈容易断裂失效.为此,需要合理的选择金属膜桥的厚度.我们在通过模拟和实验后,决定选择溅射一层 $2.0\mu\text{m}$ 厚的硅铝来形成射频微机械 CPW 开关的金属膜桥和上层引线,这样既能保证射频开关的稳定可靠,又能降低致动电压.上述整个工艺只需要 6 块光刻掩模版,完全与 IC 工艺兼容.

4 实验结果与讨论

按照上述工艺流程,本文成功地研制出这种新颖的射频微机械 CPW 开关,

如图 2 所示.采用 TE2819 电容仪测试出该射频微机械 CPW 开关的开态和关态电容分别为 0.21pF , 6.1pF , 获得其开关转换与致动

电压的关系曲线如图 3 所示.从图 3 得出该射频微机械 CPW 开关的致动电压为 22V ,低于 Z. Jamie Yao. 等人作的射频微机械开关的致动电压(50V),这是本文在

分析了该开关的工作原理和影响致动电压因素后,在金属膜的两个接近支撑点处各刻出一个槽,降低了金属膜的有效弹性系数所致,该电压更适合射频领域的应用.从测试该射频微

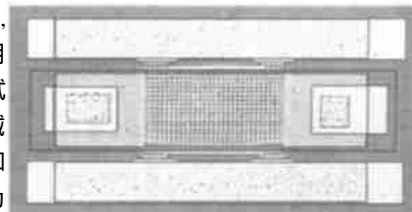


图 2 射频微机械 CPW 开关芯片图

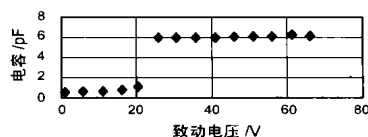


图 3 射频微机械 CPW 开关的电容与致动电压的关系曲线

机械 CPW 开关电容的结果得出:开态与关态电容之比大约为 30,远低于设计的比值,可能是因为本文中使用的测试仪器误差引起的(TE2819 电容仪的误差大约有 0.1pF),这有待于用更高精度的电容仪器来进一步分析.对该开关进行微带封装,封装后的样品如图 4 所示,采用 HP8753C 网络分析仪对该开

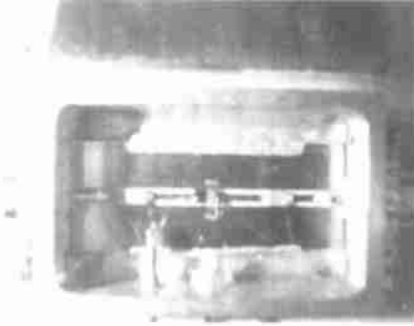


图 4 射频微机械 CPW 开关的微带封装样品图

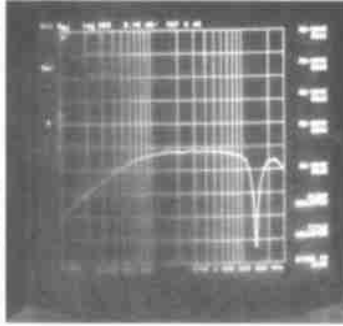


图 5 射频微机械 CPW 开关在关态的频谱分析曲线

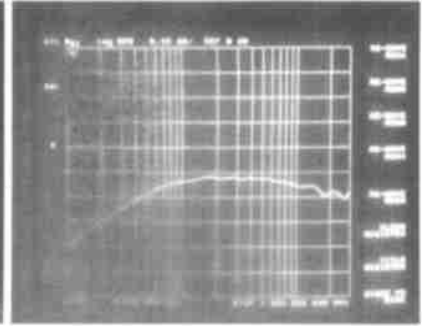


图 6 射频微机械 CPW 开关在开态下频谱分析曲线

关的开态和关态进行频谱测试分析,测试结果如图 5、6 所示,从图中得出开关关态下的隔离度为 35dB,开态下插入损耗为 3dB.这种开关的隔离度远高于 PIN 开关的隔离度(10 - 20dB),但是其插入损耗高于 PIN 开关,可能是本文测试中所用的隔直电容、隔离射频信号的电感以及封装形式等因素引

起的,这还需要进一步改进封装和测试结构,提高其性能.

5 结论

通过对微机械开关的设计改进和与 IC 工艺兼容方面开展研究,利用聚酰亚胺牺牲层技术成功地研制出一种新颖的射频微机械 CPW 开关.经过测试得出:开关的开态和关态电容分别为 0.21pF,6.1pF;开关的致动电压为 22V,该电压更适应射频领域的应用.封装后测试出开关的关态下的隔离度为 35dB;开态下插入损耗为 3dB.由于这种开关是通过介质隔离工艺制作在绝缘的多晶硅衬底上,因此该工艺完全与 IC 工艺兼容,完全能够实现与 IC 单片集成化,这为射频微机械 CPW 开关最终与 IC 实现单片集成化,降低体积提高可靠性提供了一个很好的研究思路.

参考文献:

- [1] 朱键,林金庭,林立强. DC-20GHz RF MEMS switch [J]. 半导体学报, 2001, 22(6): 706 - 709.
- [2] Clark T - C Nguyen, Linda P B Katehi, Gabriel M Rebeiz. Micromachined devices for wireless communications [J]. Proceeding fo the IEEE, 1998, 86(8): 1756 - 1766.
- [3] Yao Z Jamie, Chen Shea, Suan Eshelman, David Denniston. Micro-machined low-loss microwave switches [J]. Microelectron-mechanical systems IEEE, 1999, 8(2): 129 - 134.
- [4] Zhang zhengyuan, Wen Zhiyu, Xu Shilu, Li Kaicheng, Zhang Zhengfan, Huang Shanglian. A polysilicon micro-machined switch [A]. Micro-machining and micro-fabrication process technology and devices proceedings of SPIE [C]. Nanjing, China, 2001, 4061: 434 - 437.

作者简介:



张正元 男, 1964 年 3 月生于四川安岳, 1987 年毕业于兰州大学物理系半导体器件专业, 获学士学位, 1994 年考入成都电子科技大学微电子学系攻读硕士学位, 1997 年毕业, 获硕士学位, 现为重庆大学光电工程学院在职博士研究生, 至 1987 年毕业以来, 在电子 24 所长期从事集成电路生产和工艺技术研究, 完成国防重要工程配套项目十余项, 获得国防科技进步二等奖一项, 三等奖一项, 现主要研究兴趣为 RF MEMS 的工艺技术研究.



温志渝 男, 1951 年生于重庆万州, 教授, 博士生导师, 1982 年 1 月毕业于四川大学半导体物理专业, 1998 - 1999 年在美国 California Santa Barbara 大学任访问教授, 现为军用模拟集成电路国家重点实验室学术委员会委员, 重庆市 MEMS 专家组成员, 长期从事微型传感器和微型机电系统 (MEMS) 集成技术的研究, 完成了多项国家重点项目, 获得教育部科技进步二等奖、三等奖各一项, 申请发明专利一项, 已在国内外发表论文 70 余篇.



徐世六 男, 1957 年生于四川邻水, 研究员, 1982 年 1 月毕业于电子科技大学固体器件专业, 现为模拟集成电路国家重点实验室主任, 电子科技大学兼职教授, 重庆市首届科学技术顾问团成员, 长期从事模拟集成电路技术研究, 完成多项国家重点项目, 获得部级科技进步奖 6 项, 已在国内外刊物发表论文 30 余篇.