

悬臂式 RF MEMS 开关的设计与研制*

郭方敏^{1,3} 赖宗声¹ 朱自强¹ 贾 铭¹ 初建册¹ 范 忠¹
朱荣锦¹ 戈肖鸿² 杨根庆² 陆 卫³

(1 华东师范大学信息科学与技术学院, 上海 200062)

(2 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200050)

(3 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

摘要: 介绍了一种制作在低阻硅($3\sim 8\Omega\cdot\text{cm}$)上的悬臂式 RF MEMS 开关. 在 Cr/Au CPW 共面波导上, 金/ SiO_xN_y /金三明治结构或电镀金作为悬置可动臂, 静电受激作为开关机理. 当开关处于“关断”态, 其隔离度小于 -35dB ($20\sim 40\text{GHz}$); 阈值电压为 13V ; 开关处于“开通”态, 插入损耗为 $4\sim 7\text{dB}$ ($1\sim 10\text{GHz}$), 反射损耗为 -15dB . 另外, 还分析了开关的悬臂梁弯曲度与驱动电压的关系, 并应用 ANSYS 软件对开关进行了电学、力学及耦合特性的计算机模拟.

关键词: 悬臂梁; 插入损耗; 隔离度; ANSYS 软件; 阈值电压

PACC: 2220; 2570; 3220D

中图分类号: TN405; TN304

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)11-1190-06

1 引言

RF MEMS 开关是一个极有前途的研究课题. 它通常采用电容式、悬臂式或隔膜(旋转)结构^[1,2], 具有频带宽、插入损耗小、功耗低、线性度好、隔离度高、体积小等优点, 比固态开关(FET、二极管)具有更优越的高频特性, 且可与常规 CMOS 工艺兼容, 能与微波电路集成, 广泛用于微波元件和系统、信号路径、阻抗匹配网络和可调增益放大器中, 是微波、毫米波无线通信系统收/发部件中的关键元器件. 然而用于无线通信的开关要求在高频带中“开”、“关”态阻抗之间具有大的动态范围, “开”态具有尽可能小的阈值电压和接触电阻, “关”态时具有低的寄生耦合电容. 国内已有 RF MEMS 电容式开关的文献报道^[3,4], 这些开关通常以并联方式结合在微波电路中. 本文描述了在低阻硅衬底上, 金/ SiO_xN_y /金三明治结构或电镀金悬臂式 RF MEMS 开关的设计和制造, 它的工作频段可以从直流到高频^[1], 它与微波

电路的结合方式更灵活, 既可串联, 也可并联. 本文用有限元分析软件 ANSYS 进行开关的电学、力学及耦合特性的模拟, 以获得较低的阈值电压.

2 开关设计

2.1 工作原理

图 1 是悬臂式 RF MEMS 开关的俯视和剖面示意图. 开关由衬底材料、底电极、悬臂结构、接触金属点和一个介质层组成. 开关通过静电力操纵悬臂自由端与衬底材料的倾斜度大小的改变, 形成“开”、“关”态. 从剖面看, 这种悬置可动结构由电极层和介质层组成, 它有一个固定区、介质区和一个相对于衬底电极的可动末端区. 当电压施加于上电极且大于阈值电压时, 悬浮臂在上下电极间产生的静电力作用下, 突然向下运动, 开关闭合. 关断电压后, 在弹性力作用下, 悬臂梁回复其原来状态位置.

* 国家重点基础研究发展规划(No. G1999033105)、国家杰出青年基金(批准号: 69925409)资助项目

郭方敏 女, 副教授, 从事半导体器件研究.

2002-11-14 收到, 2003-04-30 定稿

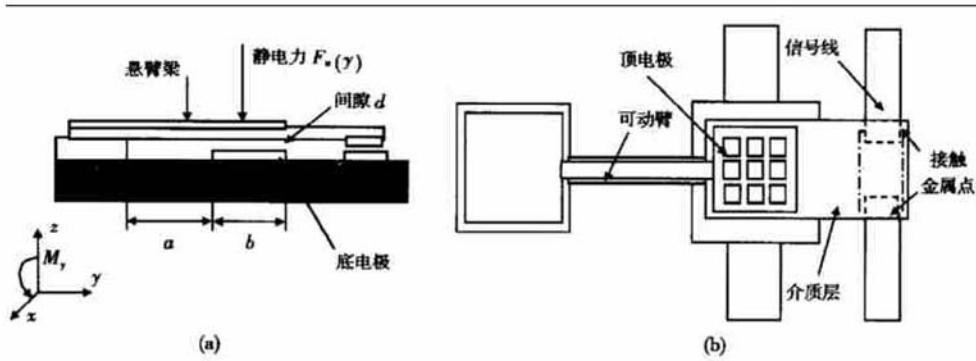


图 1 MEMS 悬臂式开关示意图 (a) 剖面图; (b) 俯视图

Fig. 1 Schematic diagram of MEMS switch (a) Side-view; (b) Top-view

2.2 阈值电压的分析

对于悬臂式 RF MEMS 开关, 需要较为精确地设计开关的阈值电压. 如果开关结构具有规则的几何外形和良好的对称性, 这类问题可以用图 2 所示

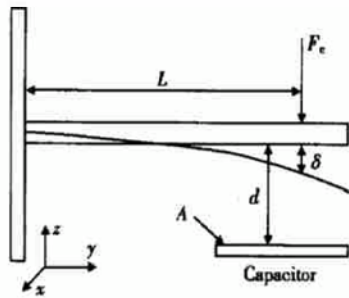


图 2 梁受静电力变曲模型

Fig. 2 Curved mode of cantilevered arm

的简单模型进行理论分析. 图中, δ 为梁弯曲的高度, F_e 是施加的力, L 是梁的长度, d 是平行板电容的板初始间距. 根据简单梁理论^[5], 有:

$$\delta = FL^3/3EI \quad (1)$$

这里 F 是静电力(F_e); E 是弹性材料的 Young's 模量; I 是惯性矩.

对于矩形梁, 有:

$$I = \frac{xz^3}{12} \quad (2)$$

这里 x 是悬臂梁宽度; z 是梁的厚度. 由(1)和(2)式可以得到梁的有效弹性系数

$$K = \frac{Exz^3}{4L^3} \quad (3)$$

则

$$F_e = K\delta \quad (4)$$

而平行板电容间的静电力为

$$F_e = \epsilon V^2 \frac{A}{2(d - \delta)^2} \quad (5)$$

其中 A 为平行板面积; V 是施加的电压.

则由(4)、(5)式得到电压和悬臂梁弯曲度的关系^[6]:

$$V = \sqrt{\frac{Exz^3\delta}{2\epsilon A L^3(d - \delta)}} \quad (6)$$

其关系曲线如图 3 所示. 当施加一定电压 V , 悬臂梁沿 y 轴方向产生形变或偏转, 随着电压增加, 梁的偏转程度也单调增加. 当梁偏转从 0 到 $d/3d_0$ 间距时 (见图 3), 需要加的电压达到最大值; 过了 $d/3d_0$ 间

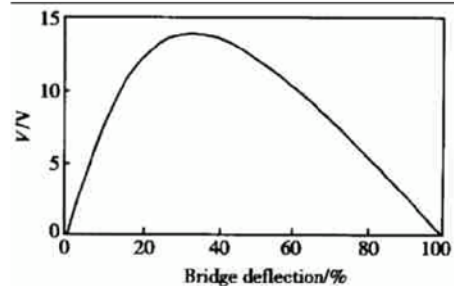


图 3 梁的弯曲和所加电压的关系曲线

Fig. 3 Applied voltage versus cantilever arm deflection

距之后, 当梁的偏转程度进一步增加, 需要使梁处于平衡位置的电压却开始单调减少, 该转折点电压称为阈值电压. 一过阈值电压, 开关悬臂梁由静电力驱使突然向下吸住, 开关闭合. 根据图 2 和图 3, 阈值电压可以表示为^[6]

$$V_{th} = \frac{2}{3} d_0 \sqrt{\frac{2Kd}{3\epsilon_0 A}} \quad (7)$$

当开关处于闭合位置, 悬浮臂与底电极之间的间隙要比在阈值电压点小. 当电压降低到小于阈值电压时, 开关处在恢复位置. 假如我们把开关闭合时

悬浮臂与底电极之间的间距定义为 $d_c < d_0$, 则开关处于关态的电压为^[7]:

$$V_{off} = (d_0 - d_c) \sqrt{\frac{2Kd_c}{\epsilon_0 A}} \quad (8)$$

因此, 开关对电压的反应相对滞后. 显然结构越硬, 开关速度越高. 但是, 阈值电压也将随着硬度增加而提高. 为了数字化地解决由上下电极间的静电场引起悬臂梁的弯曲率, 从图 1、2 我们得到作用在梁上的静电力(每单位长度)为^[6]

$$f_c(y) = \frac{-V^2}{2[d - v(y)]^2}, \quad a < y < b \quad (9)$$

式中 $v(y)$ 是在 z 轴方向悬臂梁的挠度, 可以通过下式求解:

$$\frac{d^2v(y)}{dy^2} = \frac{M(y)}{EI(y)} \quad (10)$$

式中 $M(y)$ 是沿着 y 方向悬臂梁受内应力的弯矩; $I(y)$ 是沿着 y 方向悬臂梁的惯性运动. 悬臂梁内应力的弯曲运动可以通过下述边界条件进行计算.

- (1) $y = 0$, 挠度为零;
- (2) $y = a, b$, 挠度的斜率连续.

系列方程可用迭代法解, 直至完全收敛. 在不同的电压下重复得到梁的偏转位置, 可以确定悬臂开关的阈值电压. 由于上述计算值没有考虑多种因素的集成影响, 如果是设计形状复杂的悬臂开关, 计算会变得更加复杂.

2.3 阈值电压的理论模拟^[8]

对于大多数不规则的器件, 进行常规的理论分析比较困难, 要想精确计算器件的结构、性能, 还需要解决静电场和机械力的耦合问题. 悬臂式 MEMS 开关的模拟要根据实际需求, 进行多重条件的优化, 包括器件几何学上复杂的离散化引起的大量耦合-平衡问题. 在可以运用的大量模拟软件中, ANSYS 是属于几种适合于 MEMS 器件模拟的软件之一, 具有操纵众多数据耦合的多重物理界面的能力.

在整个模拟过程中, 模拟对象是一被剪裁的限定单元. 我们布置了所有的参数, 如悬臂自由度、位移、Young's 模量、物理环境等. 通过 ANSYS/Multiphysics, 对悬臂式 MEMS 开关进行静电、力学及其耦合特性的理论模拟, 分析悬臂梁受激和形变能力. 我们用 ANSYS 软件分别模拟了三种不同形状的镀金悬臂梁 MEMS 开关, 定义悬臂梁厚度 $z = 2\mu\text{m}$, 上下电极间距 $d = 3\mu\text{m}$, 表 1 是三种开关的几

何尺寸. 通过分析分别获得了各自的阈值电压(见 4 ~ 6 图标题). 在这些结构中, 模型 2 具有最大的受激电极面积 ($140\mu\text{m} \times 175\mu\text{m}$), 所以获得最低的受

表 1 悬臂式 MEMS 开关的几何尺寸设计(单位: μm)

Table 1 Designed dimensions of the suspended cantilever MEMS switch (unit: μm)

参数	模型 1	模型 2	模型 3
悬臂梁宽度	70	200	150
悬臂梁长度	310	400	375
顶电极宽度	70	200	150
顶电极长度	85	250	150
底电极长度	65	140	65
底电极宽度	20	175	30

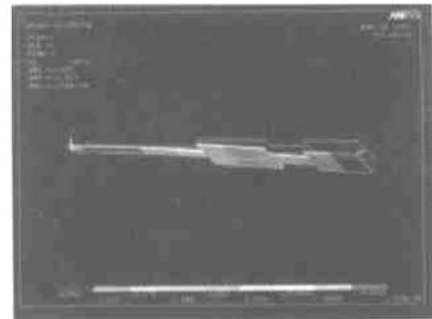


图 4 模型 1 阈值电压 25V

Fig. 4 The model 1

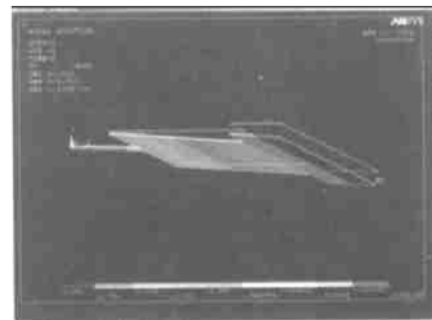


图 5 模型 2 阈值电压 2V

Fig. 5 The model 2

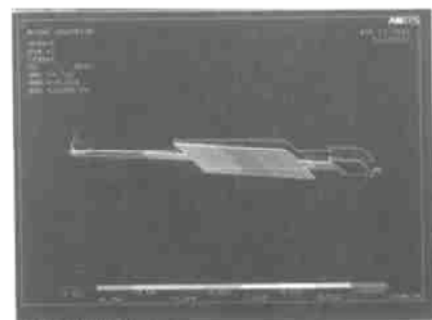


图 6 模型 3 阈值电压 10V

Fig. 6 The model 3

激阈值电压. 模型 1 的电极面积($20\mu\text{m} \times 65\mu\text{m}$)比模型 2 要小近 20 倍, 所以在忽略其它影响因素的情况下, 它们的阈值电压模拟值相差约 12 倍; 同样地, 模型 3 的电极面积是 $65\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$, 所以模型 2 的阈值电压模拟值约为模型 3 的 5 倍.

3 实验和结果

悬臂式 RF MEMS 开关采用表面微机械加工技术, 整套工艺一共 5 块版子. 采用价廉的低阻硅($3 \sim 8\Omega \cdot \text{cm}$)作为衬底材料, 通过光刻、蒸发 Cr-Au、剥离、电镀在衬底上形成 CPW 共面波导微带线. 聚酰亚胺具有较好的工艺兼容性, 被选为牺牲层. 通过光刻、蒸发和电镀金完成悬浮臂. 为了较好地控制悬臂应力, 我们还选用增强等离子体化学气相沉积

(PECVD) 技术生长 SiO_xN_y , 形成金/ SiO_xN_y /金三明治悬臂梁结构. 整个加工过程不超过 400°C .

图 7 是悬臂式 RF MEMS 开关的扫描电镜照片. 图 7(a) 是电镀金悬臂结构, 整个悬浮臂显得比较平直, 尽管与衬底的间隙较小($2 \sim 3\mu\text{m}$), 由于金的 Young's 模量是 $8 \times 10^{10}\text{N/m}^2$, 弹性率是 $21.7 \times 10^{10}\text{N/m}^2$, 所以表现出较高的阈值电压(40V , 见(1)~(7)式). 图 7(b) 和 (c) 是金/ SiO_xN_y /金悬臂结构, 图 7(c) 是双悬臂开关, 因为金/ SiO_xN_y /金悬浮臂张应力比较大, 使得悬臂可动端点与信号线距离 $20 \sim 30\mu\text{m}$, 获得了很好的隔离度^[9,10](如图 10 所示, 开关在 "Off" 态). 因为上下电极间隙还是 $2 \sim 3\mu\text{m}$, SiO_3N_4 的 Young's 模量是 $3.00 \times 10^{10}\text{N/m}^2$, 弹性率也小, 所以阈值电压较小(13V).



图 7 悬臂式 RF MEMS 开关 SEM 照片

Fig. 7 SEM photograph of completed RF MEMS switches

悬臂式 RF MEMS 开关采用 Cascade 12000 微波探针和 HP8722D 矢量网络分析仪, 在大气环境下进行在线测试, 测试范围分别为 $1 \sim 10\text{GHz}$ 和 $20 \sim 40\text{GHz}$ 两个频段. 镀金悬臂开关在 "关断" 态的隔离度是 -30dB ; 在 "开通" 态的反射损耗接近 -20dB (如图 8 所示); 插入损耗为 $4 \sim 7\text{dB}$ (如图 9 所示). 相比较, 金/ SiO_xN_y /金悬臂开关在 "关断" 态的隔离度接近 -40dB (图 10), 经可靠性测试, 开关寿命为 10^5 次.

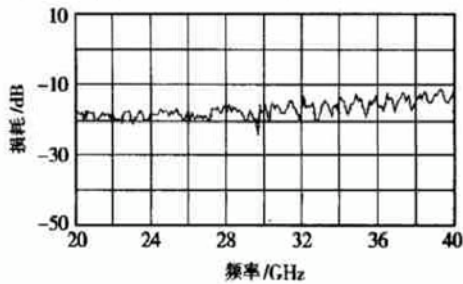


图 8 悬臂梁开关在 "开通" 态的反射损耗(S_{11})

Fig. 8 Reflecting loss of electroplated gold/ SiO_xN_y /gold cantilever arm switch in the "On" state

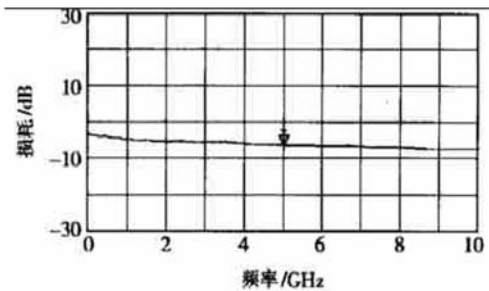


图 9 悬臂开关在 "开通" 态的插入损耗

Fig. 9 Insertion loss of gold/ SiO_xN_y /gold cantilever arm switch in the "On" state

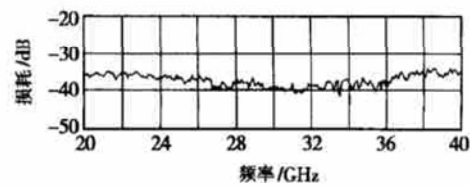


图 10 金/ SiO_xN_y /金悬臂开关在 "关断" 态的隔离度 S_{21}

Fig. 10 Electrical isolation of gold/ SiO_xN_y /gold cantilever arm switch in the "OFF" state

4 结论

我们设计、模拟和研制了悬臂式 RF MEMS 开关, 在开关的隔离度和阈值电压方面获得了令人满意的结果, 插入损耗偏大主要有两个原因, 一是接触电阻偏大, 可以通过调整工艺来改进; 二是采用 $3\sim 8\Omega\cdot\text{cm}$ 的硅作为开关衬底材料, 衬底带来的插入损耗可以通过改变衬底材料来完成, 如改用半绝缘 GaAs、InP、多孔硅、 $2\sim 10\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ 的高阻硅和石英等都可以获得小于 1dB 的插入损耗. 开关寿命偏低, 可以通过进一步改进工艺条件来完善.

致谢 感谢中国科学院上海微系统与信息技术研究所传感技术国家重点开放实验室的陈思琴、解健芳、李小良、姚文澜、王加宽、郝幼申等对本文工作所给予的大力支持.

参考文献

- [1] Yao J J, Chang M F. A surface micromachine miniature switch for telecommunications applications with signal frequencies from DC up to 4GHz. The 8th International Conference on Solid-State Sensor and Actuator, and Eurosensors IX. Stockholm, Sweden, 1995: 386
- [2] Hyman D, Schmitz A, Warneke B, et al. GaAs-compatible surface-micromachined RF MEMS switch. Electron Lett, 1999, 35(3): 224
- [3] Zhu Jian, Lin Jinting, Lin Liqiang. DC-20GHz RF MEMS switch. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22: 706
- [4] Shi Yanling, Qing Jian, Xin Peisheng, et al. MEMS phase shifter with AlSi alloy membrane on high-resistivity silicon. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23: 972(in Chinese) [石艳玲, 卿健, 忻佩胜, 等. 高阻硅基铝硅合金弹性膜 MEMS 移相器. 半导体学报, 2002, 23: 972]
- [5] Tucker J C. Guide for designing microelectromechanical systems in MUMPS. <http://www2.ncsu.edu/8010/eos/project/erl-html/tutorials/mumps/>
- [6] Northeastern: microsensors: microrelay, electrostatically actuated micromechanical switches using surface micromachining. <http://www.ece.neu.edu/edsnu/zavracky/mfl/programs/relay.html>
- [7] Zavracky P M, Majumder S, Mcgruer N E. Micromechanical switches fabricated using nickel surface micromachining. J Microelectromech Syst, 1997, 6(1): 3
- [8] Jia Ming, Guo Fangmin, Zhu Ziqiang, et al. Theoretical study of surface MEMS RF switch structure. International Conference on Sensor Technology (ISTC-2001), 2001: 242
- [9] Guo Fangmin, Chu Jianpeng, Lai Zongsheng. Miniature RF switch technology. 1st Nano Technology and Application National Conference of China, 2000: 193(in Chinese) [郭方敏, 初建朋, 赖宗声. 第一届全国纳米技术与应用学术会议论文集, 2000: 193]
- [10] Guo Fangmin, Lai Zongsheng, Zhu Ziqiang, et al. The study of surface micromachined miniature RF switch. International Conference on Sensor Technology (ISTC-2001), 2001: 239

Design of Micro Electro Mechanical System RF Switch*

Guo Fangmin^{1,3}, Lai Zongshen¹, Zhu Ziqiang¹, Jia Ming¹, Chu Jianpeng¹, Fan Zhong¹,
Zhu Rongjin¹, Ge Xiaohong², Yang Genqing² and Lu Wei³

(1 *Department of Electrical Engineering, East China Normal University, Shanghai 200062, China*)

(2 *State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

(3 *National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
The Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China*)

Abstract: The simple design, fabrication and result of surface micromachined switch are presented. It consists of Cr-Au coplanar waveguide (CPW) made on a low resistivity of the silicon substrate ($3\sim 8\Omega\cdot\text{cm}$), using a suspended SiO_2/N micro-beam as cantilever arm, a chromium-to-gold electrical contact, and electrostatic actuation as switch mechanism. The voltage as a function of beam deflection, electricity and mechanics simulations of RF switch by software ANSYS is presented. The switch has an electrical isolation (S_{21}) of -30dB in the 'Off' state and an insertion loss of $4\sim 7\text{dB}$ from 1 to 10GHz with a reflecting loss (S_{11}) of -15dB in the 'On' state. The high insertion loss is attributed to generation of parasitic current in low resistivity of the silicon substrate.

Key words: cantilevered arm; low loss; isolation; finite cell analysis; threshold voltage

PACC: 2220; 2570; 3220D; 5270G

Article ID: 0253-4177(2003)11-1190-06

* Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China (No. G1999033105), National Natural Science Foundation of China (No. 69925409)

Guo Fangmin female, associate professor. She is engaged in the research on semiconductor devices.

Received 14 November 2002, revised manuscript received 30 April 2003

©2003 The Chinese Institute of Electronics