

# RF MEMS 并联开关的结构设计及分析

许马会<sup>a,b</sup>, 刘凤丽<sup>a,b</sup>, 郝永平<sup>a</sup>

(沈阳理工大学, a. CAD/CAM 技术研究与开发中心; b. 机械工程学院, 沈阳 110159)

**摘要:**针对传统的 RF MEMS 开关的开关速度慢、寿命短、功率处理能力低等缺点,设计了一种新的 RF MEMS 并联开关结构。这种结构不仅能提高开关速度和开关寿命,还能防止粘附和介质击穿问题。首先介绍了 RF MEMS 并联开关的结构设计,以及如何根据需要确定合理的尺寸;然后利用 CoventorWare 软件对开关进行了静态特性分析和动态特性分析,重点分析了开关的吸合电压;最后利用 Saber 系统仿真法分析了改变开关的不同结构尺寸对吸合电压的影响。

**关键词:**RF MEMS; 并联开关; 特性分析; 吸合电压

**中图分类号:**TM564.6

**文献标志码:**A

## 引言

RF MEMS 开关是以传统微电子为基础发展起来的一种新兴产物,是无线通讯领域的重要器件。它具有成本低、体积小、重量轻、可靠性高等优点,在军、民用领域和微波集成电路中具有广泛的应用前景<sup>[1-3]</sup>。按照传统分类方法,RF MEMS 可分为固定器件和可动器件。固定 RF MEMS 器件包括本体微机械加工传输线、滤波器和耦合器,可动 RF MEMS 器件包括开关、调谐器和可变电容<sup>[4]</sup>;按照在高频毫米波电路的应用来看,RF MEMS 开关有两种基本形式:并联开关和串联开关<sup>[5]</sup>。

本文所设计的结构与传统的悬臂梁开关结构相似,但它比悬臂梁开关具有更快的恢复力、较高的开关速度、较长的开关寿命,还能防止粘附问题和介质击穿问题以及吸合之后两边的接触端出现翘曲现象(悬臂梁开关如果结构尺寸设计的不合理,开关吸合之后,在接触端会出现翘曲现象);与目前射频系统中所用的电控开关(PIN 二极管或 GaAs FET)相比,RF MEMS 并联开关采用微机械执行方式,没有半导体 PN 结或金属半导体

结,插入损耗很低(可小于 0.2 dB,而 PIN 或 FET 的插入损耗总大于 1 dB),隔离性能很好,互调失真极低<sup>[6]</sup>。

## 1 并联开关的结构设计

### 1.1 基本原理

并联开关的结构如图 1。

此并联开关是两端固定的,梁和驱动电极之间形成一个电容,当在梁和驱动电极之间加一偏置电压时,在梁上就会产生一个下拉静电力,当偏置电压的值达到驱动电压的值时,梁迅速下落,和下电极紧密接触,这时上下两个接触电极接触,开关导通。图 2 为并联开关 A-A 方向的断开和闭合的剖视图。

### 1.2 结构设计

并联开关采用高电阻率(3000  $\Omega \cdot \text{cm}$ )的硅衬底,相对介电常数  $\epsilon_r = 11.9$ ,衬底厚度 50  $\mu\text{m}$ 。同时为了减少传输线的导体损耗,选用金作为导体材料,金的电导率为  $4.1 \times 10^7 \text{ s/m}$ ,厚度为 1  $\mu\text{m}$ ,介质层采用的是  $\text{SiO}_2$ 。由于开关的吸合电压不仅和开关的材料有关,而且还和开关的结构尺寸、工艺过程紧密相关,因此本文通过分

收稿日期:2015-08-31

基金项目:国家 863 项目(2015AA042701)

作者简介:许马会(1986-),女,山东菏泽人,硕士生,主要从事机械精密仪器检测方面的研究,(E-mail)494078143@qq.com

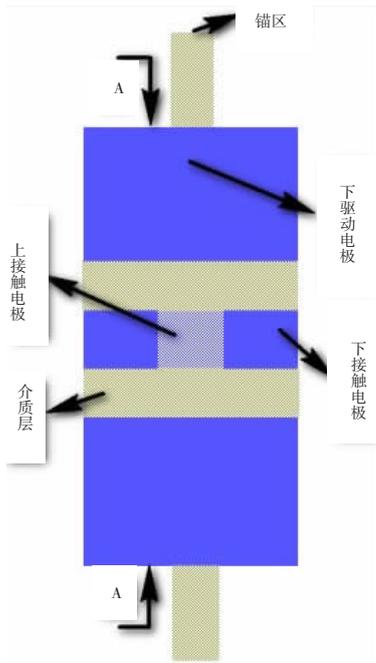


图 1 并联开关的仰视图

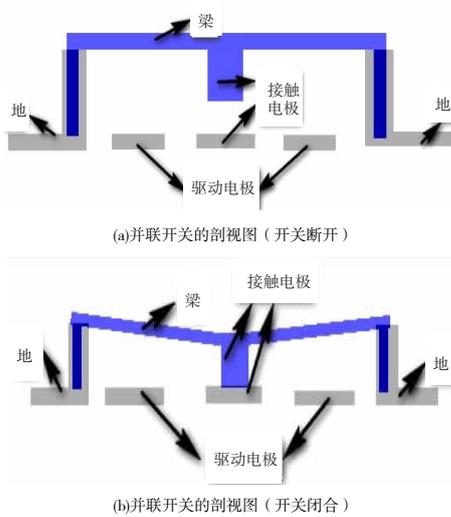


图 2 并联开关 A-A 方向的断开和闭合的剖视图

析开关的结构尺寸,利用 CoventorWare 软件对 RF MEMES 开关进行工艺设计,见表 1。

表 1 开关的工艺步骤

Number	Step Name	Layer Name	Material Name	Thickness	Mask Name	Photore sist	Depth	Mask Offset	Sidewall
0	Substrate	Substrate	SILICON	50	GND				
1	Stack Material	psds	GOLD	1					
2	Straight Cut				ElecLayer	+	0	0	
3	Stack Material	sacr	THERM_OXIDE	2					
4	Stack Material	btmlyr	Si3N4	0.5					
5	Straight Cut				MechLayer1	+	1	0	0
6	Plaser Fill	midlyr	GOLD	1					
7	Straight Cut				MechLayer2	+	0	0	0
8	Plaser Fill	toplyr	Si3N4	0.5					
9	Straight Cut				MechLayer3	+	0	0	0
10	Delete		THERM_OXIDE						

为了保证吸合电压不能过大(可能会造成开关失效)或过小(不易控制),因此所设计的开关的吸合电压

控制在 30 V 左右,初定开关的尺寸见表 2。

表 2 开关的结构尺寸(单位:μm)

参数	数值
锚区梁的尺寸	80 × 20 × 2
驱动电极尺寸	120 × 100 × 1
隔断部分梁的尺寸	25 × 100 × 1
上接触部分尺寸	45 × 100 × 1
下接触极板尺寸	45 × 25 × 1
极板间隙	2

经仿真分析,此时吸合电压为 16 V,不满足要求。经过反复验算,最终确定开关的结构尺寸见表 3。

表 3 开关的结构尺寸(单位:μm)

参数	数值
锚区梁的尺寸	55 × 20 × 2
驱动电极尺寸	100 × 80 × 1
隔断部分梁的尺寸	25 × 80 × 1
上接触部分尺寸	45 × 80 × 1
下接触极板尺寸	45 × 25 × 1
极板间隙	2

此开关的结构主要由梁、驱动电极、接触电极组成。其中在驱动电极上有一层介电层,为了避免开关作用时直流控制电压的短路。

## 2 特性分析及影响因素

### 2.1 开关的准静态分析——吸合电压分析

计算开关吸合电压的方法很多:有采用简单的一维平板假设进行计算<sup>[3]</sup>;当考虑梁的弯曲之后的状态时,有采用竖直平面的二维方法进行计算<sup>[7]</sup>;还有完全采用三维的有限元方法进行计算。采用一维方法最简单,精度也相对较低,三维的方法最精确,也是最复杂的。为了在易用性和精度上都能达到要求,已经有采用准一维来计算开关的吸合电压的方法问世<sup>[8-9]</sup>,也就是将二维的问题转化为一维问题进行处理。

本文所介绍的并联开关,计算吸合电压所采用的是 Coventor Ware 软件中的 Saber 系统仿真法和有限元分析法。

#### 2.1.1 Saber 系统仿真分析吸合电压

根据第一部分所设计的开关结构尺寸,利用 Coventor Ware 软件中的 Saber 进行系统级分析,结果如图 3 所示。

当极板间距为 2 μm 时,电压达到 26 V,悬臂梁和驱动极板发生吸合效应,所以 26 V 为悬臂梁的吸合电压。

#### 2.1.2 有限元法分析吸合电压

根据开关的结构尺寸,利用 CoventorWare 软件中的有限元分析吸合电压。图 4 为并联开关的 FEM 模型。经分析可以得出悬臂梁的吸合电压,结果如图 5 所示,

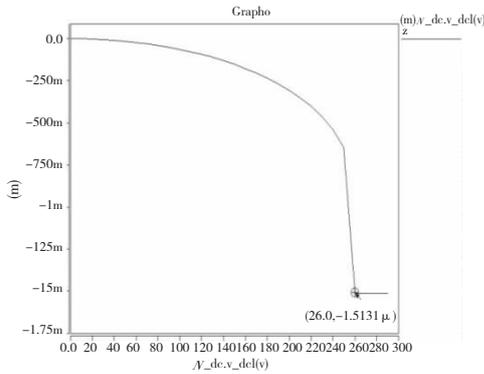


图 3 系统级求解电压与位移的关系曲线

吸合电压大约在 28 V 左右。

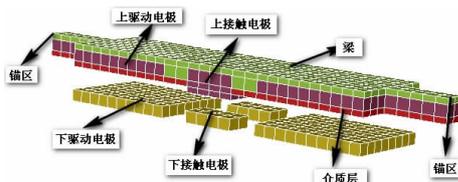


图 4 并联开关的 FEM 模型

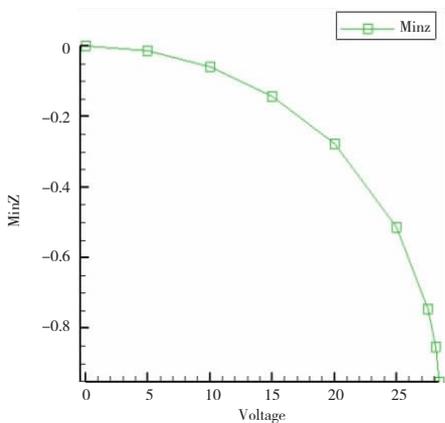


图 5 有限元法求解电压与位移的关系曲线

此次采用是 Manhattan bricks 的网格类型, X、Y、Z 的尺寸为 10、10、8。如果将网格的划分尺寸减为一半, 仿真得出的吸合电压只相差 0.3 V, 但仿真的时间是原来的 8 倍, 所以在保证结果相差不超过 1% 的情况下, 尽量将网格尺寸定大一些(结合开关的尺寸)。

上述两种方法得出的吸合电压结果相差 2V。然后利用公式<sup>[10]</sup>:

$$V_{pi} = \sqrt{\frac{8kg_0^3}{27\epsilon_0 A}} \quad (1)$$

其中  $k$  为弹性系数,  $A$  为驱动电极的正对面积,  $V_{pi}$  为开关的吸合电压,  $\epsilon_0$  为极板间介质的介电常数,  $g_0$  为极板初始间距。此结构中  $k = 5.2$ ,  $A = 31\ 200\ \mu\text{m}^2$ ,  $\epsilon_0 = 3.9$ ,  $g_0 = 2\ \mu\text{m}$ , 经计算开关的吸合电压  $V_{pi} \approx 23\ \text{V}$ 。从上述

结果可以看出, 利用公式计算出的结果与其他两种方法得出的结果也有 3 ~ 5 V 的差距, 但 Saber(几秒)比有限元(1 小时以上)和公式法要快, 所以在做系统仿真时一般会用 Saber 仿真, 至于哪个更精确, 还有待做实验进一步确定。

## 2.2 动态特性分析

### 2.2.1 瞬态应力分析

RF MEMS 开关不仅要在阈值加速度可调范围内能够安全可靠地工作, 还要具有一定的抗过载能力。利用 CoventorWare 软件中的 Analyzer 对 RF MEMS 开关进行瞬态动力学分析, 在 Z 轴负方向施加周期为 800  $\mu\text{s}$  正弦波形, 阈值加速度值为 10 000 g, 其应力分布如图 6 所示。RF MEMS 开关所受到最大应力发生在两端支撑梁锚区的根部, 只要满足这部分的应力值小于材料的许用应力, 弹性元件就不会发生塑性形变, 就能使 RF MEMS 开关实现抗过载保护。多晶硅的许用应力:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_p}{n} \quad (2)$$

其中,  $n$  为安全系数, 一般取  $n = 4 \sim 5$ 。

当取  $\sigma_p = \frac{E}{100}$ , 杨氏模量  $E = 1.6 \times 10^5\ \text{MPa}$  时, 由式(2)可计算出  $[\sigma] = 320 \sim 400\ \text{MPa}$ 。由图 6 可以看出开关的最大应力 220 MPa, 小于多晶硅材料的许用应力  $[\sigma] = 320 \sim 400\ \text{MPa}$ , 保证了梁不会发生塑性变形和断裂, 满足抗过载要求。

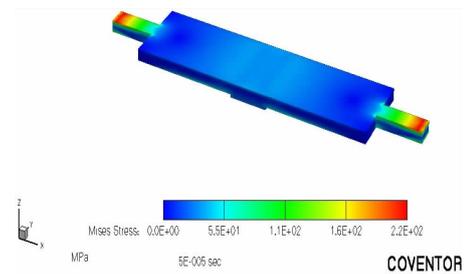


图 6 瞬态应力图

### 2.2.2 均布载荷分析

利用 CoventorWare 软件中的 Analyzer 对 RF MEMS 开关进行均布载荷分析, 在梁的 Z 方向上加 0.01 MPa 的均布载荷, 由图 7 可知, 当梁的最大偏移量达到 4.2  $\mu\text{m}$  时, 梁将发生断裂。

## 2.3 影响开关吸合电压的因素

影响开关吸合电压的因素主要有开关的材料与尺寸<sup>[11]</sup>, 下面用改变参数的宽度和长度来介绍尺寸对吸合电压的影响。图 8 为增大和减小左右两端紧贴锚区两个梁的宽度, 吸合电压的变化情况。

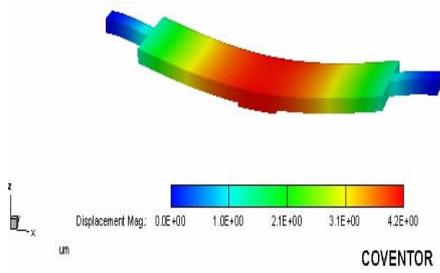


图7 均布载荷图

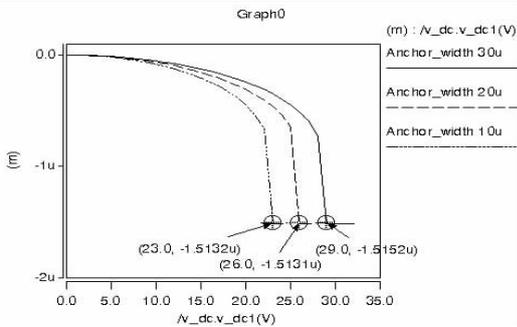


图8 改变左右两端紧贴锚区两个梁的宽度

图9为增大和减小左右两端紧贴锚区两个梁的宽度,吸合电压的变化情况。

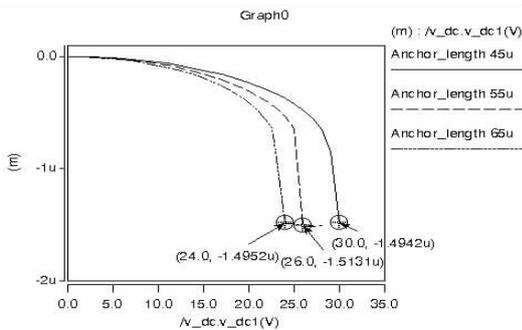


图9 改变左右两端紧贴锚区两个梁的长度

图10为增大和减小下驱动电极的长度,吸合电压的变化情况。

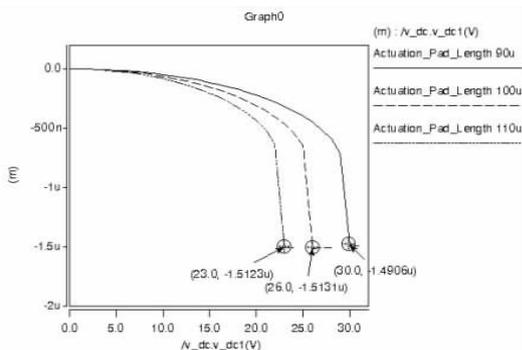


图10 改变驱动电极的长度

图11为减小下接触电极的长度,吸合电压的变化

情况。

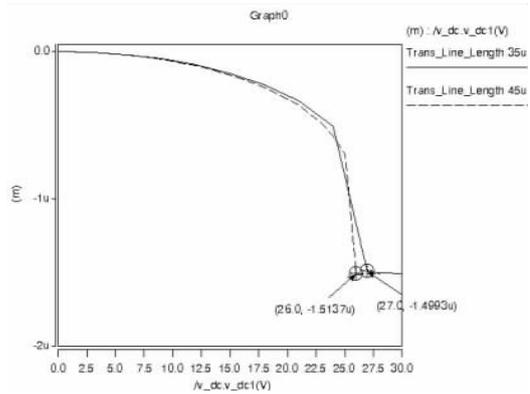


图11 改变下接触电极的长度

图12为减小隔断部分两个梁的长度,吸合电压的变化情况。

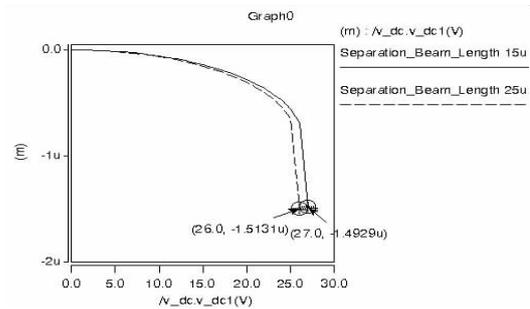


图12 改变隔断部分两个梁的长度

通过图8~图12仿真结果,可以得出以下结论:

- (1) 改变开关参数的长度和宽度对吸合电压的影响是不一样的,吸合电压会随着长度的增加而减小(减小而增大),随着宽度的增大而增大(减小而减小)。
- (2) 改变隔断部分两个梁的长度(下接触电极的长度),当长度超过 25 um (45 um) 时,吸合电压保持在 26 V,不发生变化。
- (3) 吸合电压不随下接触电极宽度的变化而变化。
- (4) 如果改变下驱动电极或隔断部分两个梁其中一个参数的宽度,另一个参数的宽度也将随之变化,因此不能确定吸合电压的变化情况。

### 3 结束语

本文在研究并联开关结构的基础上,进一步分析了开关的静态特性和动态特性,以及影响吸合电压的主要因素。通过对开关吸合电压的分析,可以得出 Saber 系统分析法要比有限元法运算的速度快、效率高,因此 Saber系统分析法是未来的发展趋势。对于影响开关吸合电压因素的分析可以得出,改变参数的不同结构尺

寸,对吸合电压的影响是不同的。

#### 参 考 文 献:

- [1] Yao J J. RF MEMS from a device perspective[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2000, 10(4): R9-R38.
- [2] Rebei G M. RF MEMS theory, design and technology [M]. Hoboken, NJ: Wiley Interscience, 2003.
- [3] Santos H J D L. RF MEMS circuit design for wireless communications[M]. Boston: Artech House, 2002.
- [4] Gabriel M Rebeiz. RF MEMS 理论·设计·技术, MEMS 开关的电磁模型[M]. 南京: 东南大学出版社, 2005.
- [5] 严春早, 许高斌, 叶刘晓. RF MEMS 开关的发展现状 [J]. 微纳电子技术, 2008, 45(11): 647-653.
- [6] 有德义, 任波, 郝永平. 并联电容式 RF MEMS 开关的系统级设计与分析[J]. 仪表技术与传感器, 2014(4): 1-3.
- [7] Elata D, Bamberger H. On the dynamic pull-in of electrostatic actuators with multiple degrees of freedom and multiple voltage sources [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2006, 15(1): 131-140.
- [8] Chowdhury S, Ahmadi M, Miller W C. Pull-in voltage study of electrostatically actuated fixed-fixed beams using a VLSI on-chip interconnect capacitance model [J]. Journal of Micromechanical Systems, 2006, 15(3): 639-651.
- [9] Pamidighantam S, Puers R, Baert K, et al. Pull-in voltage analysis of electrostatically actuated beam structures with fixed-fixed and fixed-free end conditions [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2002, 12(4): 458-464.
- [10] 贾盟军. 硅微机械加速度开关技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2007.
- [11] 周光亚. RF MEMS 开关的可靠性研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2013.

## Structural Design and Analysis of RF MEMS Switches in Parallel

XU Mahui<sup>a,b</sup>, LIU Fengli<sup>a,b</sup>, HAO Yongping<sup>a</sup>

(a. CAD/CAM Technology Research and Development Center; b. Mechanical Engineering of Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

**Abstract:** Aiming at the disadvantages of the traditional RF MEMS switch with low switching speed, short life and low power handling capability, a new structure of RF MEMS parallel switch is designed. This structure can not only improve the switching speed and switch life, but also can prevent the adhesion and dielectric breakdown problem. First, the paper introduced the structure design of RF MEMS parallel switch, and how to determine the reasonable size according to the need; then the analysis of static characteristics and dynamic characteristics of switching is analyzed by using CoventorWare software, which focuses on analysis of the switch pull-in voltage. Finally, the effect of different structure size of changing switch on pull-in voltage is analyzed by using the Saber system simulation method.

**Key words:** RF MEMS; parallel switch; characteristic analysis; pull-in voltage