

# 射频/微波 MEMS Shunt 开关的开启时间研究

龙永福<sup>1,2</sup>, 朱自强<sup>1</sup>, 赖宗声<sup>1</sup>, 郭方敏<sup>1</sup>, 石艳玲<sup>1</sup>  
(1. 华东师范大学电子系, 上海 200062; 2. 常德师范学院物理系, 湖南常德 415000)

**摘 要:** 本文描述了射频/微波 MEMS shunt 开关的理论模型和数值结论. 把可动薄膜的运动近似地模拟为作用在可动薄膜上的变静电力、弹力及空气阻力的单自由度阻尼振动. 给出了典型 MEMS shunt 开关开启时间的数学表达式及数值计算值. 根据可动膜厚、材料和几何结构参数不同, 得到了典型的 MEMS shunt 开关的开启时间大约为 1~40  $\mu$ s. 其计算值同文献[4]的值相符得很好. 本文还讨论了该理论模型和数值计算的局限性.

**关键词:** MEMS 开关; 开启时间; 理论模型; 数值计算

中图分类号: TN304 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2002) 08-1204-03

## Study on Switching Times of RF/Microwave MEMS Shunt Switches

LONG Yong-fu<sup>1,2</sup>, ZHU Zi-qiang<sup>1</sup>, LAI Zong-sheng<sup>1</sup>, GUO Fang-min<sup>1</sup>, SHI Yan-ling<sup>1</sup>  
(1. Dept. of E. E., East China Normal University, Shanghai 200062, China;  
2. Dept. of Physics, Chang De Normal University, Changde, Hunan 415000, China)

**Abstract:** This paper presents the modeling and numeric calculations of a radio frequency (RF)/microwave MEMS shunt switch. The movement behavior of the movable membrane is taken as a single directional damped oscillation under an electrostatic force, an elastic recovery force and a drag force in the air. A set of mathematic formula and calculated results are given for a typical MEMS shunt switch. The calculated switching times for typical MEMS shunt switches are about 1~40  $\mu$ s, depending on the thickness of the membrane, constitutive materials and structure parameters. The obtained results are well agreed with the reported experimental ones<sup>[4]</sup>. Finally, The limitations about the modeling and numerical calculations are discussed.

**Key words:** MEMS switch; switching time; theory modeling; numeric calculations

### 1 引言

MEMS (Micro Electro Mechanical System), 即“微机电系统”, 是微电子元件和微机械元件相组合构成的系统, 它是用集成电路的工艺制作于半导体材料上的微型器件或器件阵列, 并且可用 IC 工艺批量制作. 自二十世纪八十年代中期, 随着机械加工技术 (Micromachining Technology) 的迅速发展: 既把集成电路中的 CMOS 工艺和 MEMS 技术相结合, 把微机械结构和微电子电路集成在一起, 构成单片集成电路, 人们开始将这种技术应用于微波领域. MEMS shunt 开关作为 MEMS 最重要的器件之一, 是构成数字控制天线、阻抗匹配电路、微振荡器、相移器、相控阵列天线等的基础. 已经有大量的文献讨论 MEMS 在这些领域的应用. 典型的 MEMS 开关可以制成桥梁、悬臂和横隔膜等几种结构. 现有的射频/微波 MEMS 开关有串联和并联两种形式. 在串联结构中<sup>[1]</sup>, MEMS 串联开关未激活时, 上方的电极板和下极板之间开路, 开关处于“关”的状态; 当在一定偏置电压 (大于等于阈值电压) 的作用下, 上极板被静电力拉下, 开关处于“开”的状态. 而本文讨论的并联结构<sup>[2]</sup>

(如图 1、2), 当开关被激活时, 信号线和地线高频短路, 为了避免开关激活后直流通路, 在底极板和上极板之间有一厚度为  $g_f$  的绝缘层 (如图 1). MEMS shunt 开关具有低的插入损耗 (0.08dB)、高的隔离度<sup>[3]</sup> (42dB) 和很高的信号处理能力, 是传统的 FETs 和 pin 器件所不能替代的. 但不足之处是其开启时间较长. 据文献[4]报道 MEMS shunt 开关开启时间在 2~10  $\mu$ s 之间. 本文研究了 MEMS shunt 开关的理论模型, 对影响开关开启时间的因素作了详细的数值分析和讨论, 为射频/微波 MEMS shunt 开关及其衍生器件的分析和设计提供了一定的理论依据.

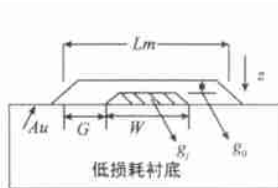


图 1 MEMS shunt 开关的剖面示意图

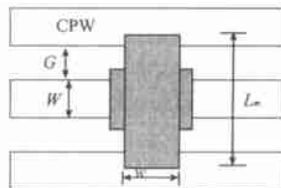


图 2 MEMS shunt 开关的俯视图

收稿日期: 2001-09-10; 修回日期: 2001-12-15

基金项目: 国家重点基础研究规划项目 (973) (No. G 199033105); 国家自然科学基金 (No. 69876012); 国家杰出青年基金 (No. 69925409); 上海市重点学科项目 (2001 年)

## 2 理论模型

### 2.1 MEMS shunt 开关的电容模型

MEMS shunt 开关的示意图如图 1、2 所示。当外加偏置电压  $V_{bias}$  加到可动薄膜和中间传输线之间时, 静电力拖动可动薄膜向底部介质层运动。开关的总电容  $C$  由介质层部分电容  $C_j$  和可动薄膜下表面到介质层上表面空气层的电容  $C_0$  两部分串联组成。即:

$$1/C = (1/C_j) + (1/C_0) \quad (1)$$

将图 1、2 中的器件参数代入可得到:

$$C = \frac{1}{[g_j/(\epsilon_0 \epsilon_r W w) + (g_0 - z)/\epsilon_0 W w]} \quad (2)$$

其中  $\epsilon_0$  为真空的介电常数,  $\epsilon_r$  为介质层的介电常数,  $W$  为共平面波导 (CPW) 中间传输导体的宽度,  $w$  为可动薄膜的宽度,  $g_0$  为可动薄膜离介质层上表面的标称高度,  $z$  为可动薄膜离开平衡位置的位移, MEMS shunt 开关的总电容  $C$  的大小随可动薄膜位移  $z$  的变化而变化。

### 2.2 动力学理论

MEMS shunt 开关可动薄膜两端被固定在共平面波导的底板上, 可动薄膜只能在  $z$  方向上运动, 因此我们可以把它近似为单自由度的阻尼系统: 其有效质量为  $M$ , 可动薄膜的弹性系数为  $K$ , 速度的阻尼系数为  $\xi$ 。为了启动 MEMS 开关, 在共平面波导传输线的中心微带线和底板之间加直流电压  $V_{bias}$ , 在静电场的作用下, 静电力拖动可动薄膜移向介质层, 其启动电压  $V_p$  由文献[4]可得到:

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

其中  $k$  为微机械系统有效弹性系数, 且由文献[5]可得:

$$k = \frac{32Yd^3w}{L_m^3} + \frac{8\sigma(1-\nu)d w}{L_m} (N/m) \quad (4)$$

$Y$  为薄膜材料的杨氏模量,  $d$  为可动薄膜的厚度,  $L_m$  为可动薄膜的长度,  $\sigma$  为薄膜内部残存的张应力,  $\nu$  为薄膜材料的泊松比。MEMS shunt 开关在“开”和“关”的过程中, 只受到静电力、空气的阻力和结构的弹力作用, 且只在  $z$  方向下移动, 我们可以把可动薄膜简化为单自由度的阻尼系统。在外加电压  $V_{bias} (> V_p)$  的作用下, 可动薄膜上受到的静电力  $F_1$  由电磁学的有关知识可以得到:  $F_1 = \partial E / \partial z$  (5)

$E$  为 MEMS shunt 开关电容的静电能, 且:

$$E = (1/2) * C * V_{bias}^2 \quad (6)$$

将式(2)、式(6)代入式(5)得到可动薄膜受到的静电力为:

$$F_1 = \frac{\epsilon_0 * W * w}{2(g_j/\epsilon_r + (g_0 - z))^2} V_{bias}^2 (N) \quad (7)$$

又可动薄膜受到的弹力为:

$$F_2 = -k * z \quad (8)$$

空气对可动薄膜的粘滞力为:

$$f = -\xi(\partial z / \partial t) \quad (9)$$

由牛顿运动定律, 可以得到可动薄膜在静电力  $F_1$ 、弹力  $F_2$  及空气对可动薄膜阻力作用下的动力学方程:

$$M(\partial^2 z / \partial t^2) = \sum_i F_i = F_1 + F_2 + f \quad (10)$$

其中  $M$  为可动薄膜上面积为  $W * w$  部分的质量, 整理式(7)~(10), 可得到可动薄膜运动的运动方程:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \left( \frac{\epsilon_0 * W * w}{2(g_0 - z + g_j/\epsilon_r)^2} V_{bias}^2 - k * z - \xi * \frac{\partial z}{\partial t} \right) / (\rho * W * w * d) \quad (11)$$

在外加偏置电压  $V_{bias}$  的作用下, 可动薄膜从其平衡位置向介质层移动。当 MEMS 电容开关未加偏置电压时, 可动薄膜保持平衡, 得到可动薄膜运动的初始条件为:

$$\text{初始位移: } z|_{t=0} = 0 \quad (12)$$

$$\text{初速度: } (\partial z / \partial t)|_{t=0} = 0 \quad (13)$$

通过使用初始条件公式(12)、(13), 结合公式(11), 使用数值计算方法, 可以计算出可动薄膜从平衡位置移动到介质膜上的时间。

### 3 开启时间的数值计算结果

在外加偏置电压的作用下, 可动薄膜从平衡位置向介质层移动。本文定义在外加偏置电压的作用下, 可动薄膜从开始离开平衡位置到与介质膜接触所经历的时间为开关的开启时间。为了得到 MEMS shunt 开关最佳的开启时间, 本文使用的外加偏置电压为矩形波, 其幅度为启动电压  $V_p$ 。式(11)的二阶微分方程的求解非常复杂, 通过它直接求解其解析式来计算开关的开启时间是不现实的, 本文使用四阶龙格-库塔方法及其它特殊的方法来进行求解。为了使数值计算结果有可比性, 在每一个具体的数值计算中, MEMS shunt 开关的结构参数采用文献[4]中的典型值, 未特殊说明均采用 Au 材料。其详细材料与结构参数及数值结果如图(3)~(6)所示, 更详细的数值计算过程将在其它文章中讨论。

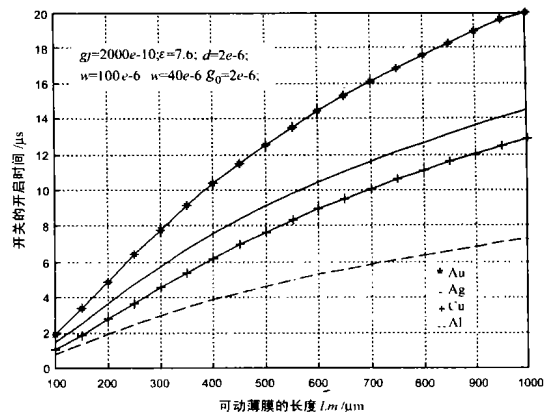


图 3 由 Al、Cu、Ag、Au 材料构成可动薄膜长度与开启时间关系

### 4 结论与讨论

本文在对 MEMS shunt 开关的开启时间的研究中, 假定可动薄膜的移动部分仅受到静电力、结构的弹力及空气阻力的作用。对 MEMS shunt 开关的材料与结构参数对 MEMS shunt 开关开启时间影响作了理论模拟和数值分析。由数值模拟结果可以得出如下结论: (1) 使用 Al 材料可以得到最佳的开启时

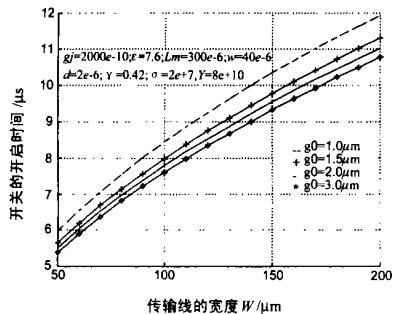


图 4 由 Au 构成的 CPW 的宽度、可动薄膜  
离介质层的高度与开启时间关系

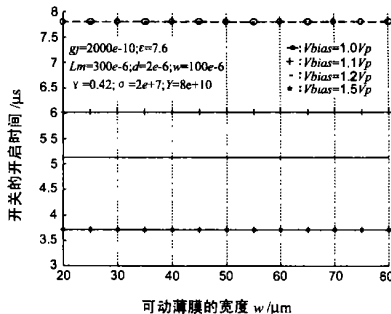


图 5 可动薄膜宽度、外加偏置  
电压与开启时间关系

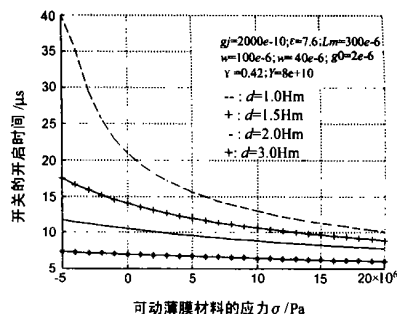


图 6 可动薄膜材料残存的应力、  
薄膜厚度与开启时间的关系

间. 由图 3 所示, 由 Al 材料构成的 MEMS shunt 开关, 其开启时间在  $0.8\mu\text{s}$ — $7.2\mu\text{s}$  之间变化. 而由 Au 材料构成的同样结构参数的 MEMS 开关开启时间则在  $2.5\mu\text{s}$ — $20\mu\text{s}$  之间变化. (2) 如图 4 所示, CPW 的宽度强烈影响开关的开启时间, 当 CPW 的宽度从  $50\mu\text{m}$  增加到  $200\mu\text{m}$  时, 其开启时间将延长近一倍; 但可动薄膜离开介质层的距离  $g_0$  对 MEMS shunt 开关的开启时间影响不大, 当  $g_0$  从  $1\mu\text{m}$  增加到  $3\mu\text{m}$  时, 开关的开启时间仅缩短 10% 左右. (3) 外加偏置电压  $V_{bias}$  对 MEMS shunt 开关的开启时间影响极大 (如图 5). 当外加偏置电压增大 50% 时, 开启时间约缩短了一倍, 尽管增加偏置电压降低了 MEMS 开关开启时间, 但却增加了可动薄膜对介质膜的冲击速度, 从而极大地牺牲 MEMS shunt 开关的使用寿命 (另文讨论). 因此, 偏置电压  $V_{bias}$  最好接近开关的启动电压  $V_p$ . 而可动薄膜的宽度  $w$  对开关的开启时间几乎没有影响. (4) 由图 6 可知: 可动薄膜材料的残存应力极大的影响开关的开启时间, 当材料的应力由  $-5 \times 10^6 \text{Pa}$  (压应力) 变为  $2 \times 10^7 \text{Pa}$  (张应力) 时, MEMS shunt 开关的开启时间从  $40\mu\text{s}$  缩短到  $10\mu\text{s}$ . 因此, 选用有残存张应力的材料可以改善开关的开启时间. 同时, 可动薄膜的厚度小于  $1\mu\text{m}$  时, MEMS shunt 开关的开启时间受材料应力的影响极大; 而薄膜厚度大于  $3\mu\text{m}$  时, 可动薄膜材料的残存应力对开关的开启时间影响很小 (从大约  $7\mu\text{s}$  提高到  $6\mu\text{s}$ ). (5) 在本文的研究中, 没有考虑 MEMS shunt 开关的材料与结构参数对开关启动电压大小的影响. 研究中所使用的偏置电压  $V_{bias}$  等于 MEMS shunt 开关的启动电压  $V_p$ . 而在实际应用中, 往往需要用较小的外加偏置电压得到最佳的开启时间. 因此, 为了得到高性能的 MEMS shunt 开关及其衍生器件, 需要综合考虑 MEMS 开关的材料与结构参数, 从而在最小的启动电压下得到开关的最佳开启时间.

本文的讨论是假定可动薄膜上面积为  $W \times w$  部分的单自由度的阻尼运动而忽略了可动薄膜的其它部分的运动情况; 且假设在所数值计算的小区间 (本文未讨论) 可动薄膜的加速度保持不变, 所有这些都会从模型的建立到数值计算的结果带来误差. 但从本文的数值计算结果可知: MEMS shunt 开关的开启时间随开关材料与结构参数的变化而变化, 大约在  $1$ — $40\mu\text{s}$  之间. 本文数值计算结果同文献 [4] 报道的值 ( $2$ — $10\mu\text{s}$ ) 拟合得很好. 同时, 从本文的讨论中可知: MEMS shunt 开

关的开启时间受可动薄膜的长度、厚度、可动薄膜内残存应力的大小等因素有密切的关系. 因此, 可动薄膜的结构参数是决定 MEMS shunt 开关开启时间重要的参数之一; 尤其是当外加偏置电压  $V_{bias}$  增加时, MEMS shunt 开关的开启时间将快速减少. 有趣的是, 由图 5 所示, 开关的开启时间受可动薄膜的宽度的影响不大. 这些结论都为高性能 MEMS shunt 开关及其衍生器件的设计和研制提供了一定的理论依据.

#### 参考文献:

- [1] J J Yao, M F Chang. A surface micromachined miniature switch for telecommunications applications with signal frequencies from DC up to 4 GHz [A]. in int Conf Solid State Sensors and Actuators [C]. Dig, Stockholm, sweden: 1996. 384– 387.
- [2] C Goldsmith, J Randall, et al. Characteristics of micromachined switches at microwave frequencies [A]. in IEEE MTT-S int Microwave Symp Dig, CA [C]. San Francisco: 1996. 1141– 1144.
- [3] Jae Y Park, Geun H Kim, et al. Monolithically integrated micromachined RF MEMS Capacitive switches [J]. Sensors and Actuators A. 2001, 89: 88– 94.
- [4] J B Mukdavin, G M Rebeiz. High Isolation MEMS shunt switches Part 1: Modeling [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech. 1999, 48: 1045– 1052.
- [5] P Osterberg, H Yie, et al. Self consistent simulation and modeling of electrostatically deformed diaphragms [A]. In Proc IEEE MEMS Conf [C]. Oiso, Japan: 1994. 28– 32.

#### 作者简介:



龙永福 男, 1965 年生, 1996 年毕业于华东师范大学物理系, 获硕士学位; 后在常德师范学院物理系从事教学科研工作, 讲师, 现华东师范大学电子系无线电物理专业博士研究生, 研究方向为 MEMS 系统技术和微机电 MEMS 器件的模拟分析与微波测量.