

文章编号 1004-924X(2011)03-0593-05

毫米波 MEMS 开关 S 参数在开关过程中的瞬态变化

廖小平, 肖建斌

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要:研究了静电执行的电容式并联毫米波 MEMS 开关的 S 参数在开关过程中的瞬态变化。以一个电容式并联毫米波 MEMS 开关为实例, 采用已有的开关一维力学动态模型, 建立了开关过程中开关梁与介质层之间的间隙与时间的关系; 通过 HFSS 电磁仿真软件, 得到开关 S 参数在开关过程中的瞬态变化。结果显示, 在开关下拉过程中(用时约 $9.4 \mu\text{s}$), 插入损耗 S_{21} 先缓慢减小(从 Up 态稳定值 -0.20 dB 缓慢减小到 -1.02 dB 需时 $9.11 \mu\text{s}$, 占开关下拉时间的 97%), 但在下拉时间末段迅速减小; 在开关释放过程中(用时约 $20 \mu\text{s}$), S_{21} 在初段就迅速增大(从 Down 态的稳定值 -20.1 dB 迅速增加到 -1.16 dB 只需 $1.09 \mu\text{s}$, 占开关释放时间的 5.5%)。结果表明, 开关从导通信号到阻隔信号的转换时间约为开关的下拉时间; 开关从阻隔信号到导通信号的转换时间要比开关的释放时间小一个数量级。

关键词:毫米波开关; MEMS 开关; S 参数; 瞬态变化

中图分类号: TN631 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20111903.0593

Transient S -parameters of millimeter-wave MEMS switch

LIAO Xiao-ping, XIAO Jian-bin

(Key Laboratory of MEMS, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The transient S -parameters of a capacitive shunt and electrostatically actuated millimetre-wave switch were researched. The transient change of these parameters during switching in the gap between switch beam and dielectric layer was derived by a one-dimension mechanical dynamic model from a published paper. Then, the transient change in the gap was used for simulating the transient S -parameters during switching in HFSS software. Finally, this method was applied to a specific switch. Obtained results show that the inserting loss S_{21} decreases slowly until the end of the pull-in process (from steady value -0.20 dB in Up-state to -1.02 dB over $9.11 \mu\text{s}$, 97% of the pull-in time), and it increases quickly to nearly the ultimate value at the beginning of the release process (from steady value -20.1 dB in down-state to -1.16 dB over $1.09 \mu\text{s}$, 5.5% of the release time). The transition time from a passing RF signal to a blocking RF signal is about the time of pull-in, and the transition time from a blocking RF signal to a passing RF signal is one order of magnitude less than the releasing time.

Key words: millimeter-wave switch; MEMS switch; S -parameters; transient change

收稿日期: 2010-03-26; 修订日期: 2010-05-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61076108, 60976094, 60676043)

1 引言

射频(RF) MEMS 开关以其高隔离度、低插入损耗、高截止频率和高的线性度等优点备受人们关注^[1-3]。其中,静电执行的 RF MEMS 开关由于功耗低和制造简单等特点已成为研究的热点。S 参数是衡量 RF MEMS 开关电路特性的重要参数。其中, S_{11} (S_{22}) 表示回波损耗,反映开关对 RF 信号的反射程度; S_{21} (S_{12}) 表示插入损耗,反映开关对 RF 信号的导通程度。若开关处于开态, S_{21} 一般较大(如接近 0 dB),表示导通信号;若开关处于关态, S_{21} 一般较小(如小于 -20 dB),表示阻隔信号。由于静电执行的 RF MEMS 的开关时间较慢(微秒级),因而 S 参数在开关过程中也有一个较慢的瞬态变化过程,不能近似为理想的阶跃变化。只有分析出静电执行的 RF MEMS 开关 S 参数在开关过程中的瞬态变化,才能得知开关如何在阻隔信号和导通信号的状态之间转换以及转换所需要的时间。目前,对 RF MEMS 开关 S 参数的研究都集中在开态和关态两个稳态^[4-5],而本文则是首次对静电执行的电容式并联毫米波 MEMS 开关 S 参数在开关过程中的瞬态变化进行了研究。

2 毫米波 MEMS 开关 S 参数在开关过程中瞬态变化的原理分析

2.1 基本原理

电容式并联 RF MEMS 开关的结构如图 1 所示。 L 表示开关梁的长度; w 表示开关梁的宽度; W 表示共面波导(CPW)中心导线的宽度。

电容式并联 RF MEMS 开关的电路模型^[6-7]如图 2 所示。其中, Z_0 表示与开关相连的传输线的特征阻抗, C 表示开关的梁与中心导线间的电容, L_s 表示开关梁的电感, R_s 表示开关梁的串联电阻。这里, Z_0 通常取 50Ω 。

C 在开关的动态过程中随开关梁的空气间隙的变化而改变,如式(1)所示。

$$C = Ww \frac{\epsilon_0}{g(t) + \frac{d_0}{\epsilon_r}}, \quad (1)$$

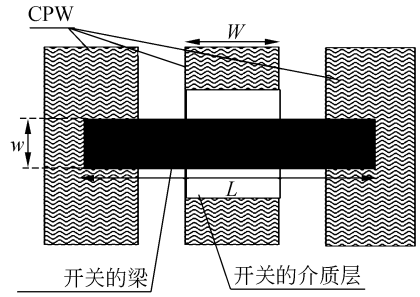


图 1 电容式并联 RF MEMS 开关

Fig. 1 Capacitive shunt RF MEMS switch

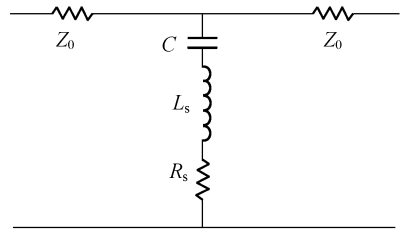


图 2 电容式并联 RF MEMS 开关的电路模型

Fig. 2 Circuit model of capacitive shunt RF MEMS switch

其中, g 表示开关梁与介质层的空气间隙的高度, d_0 表示介质层的厚度, ϵ_r 表示介质层的相对介电常数, ϵ_0 表示真空介电常数。

开关梁的电路模型的阻抗为

$$Z_b = \frac{1}{j\omega C} + j\omega L_s + R_s. \quad (2)$$

开关的 S 参数可以表示为

$$\begin{cases} S_{11} = S_{22} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \\ S_{21} = S_{12} = 1 + S_{22} \\ Z_L = \frac{Z_b Z_0}{Z_b + Z_0} \end{cases}. \quad (3)$$

从式(1)~(3)可知,在开关过程中,由于 C 随 g 变化,开关电路模型的阻抗发生变化,最终使开关的 S 参数也发生瞬态变化。

2.2 开关力学动态模型

从上述分析可知,要研究 RF MEMS 开关 S 参数在开关过程中的瞬态变化,必需得知开关位移的瞬态变化。

目前,对开关动态的研究较多的采用一维集总模型^[6,8]。图 3 给出了电容式 MEMS 开关一维集总模型的示意图。其中, k 为开关梁的弹性系

数, m 为开关梁的质量, U 为开关的静电驱动电压, x 为开关梁的位移。

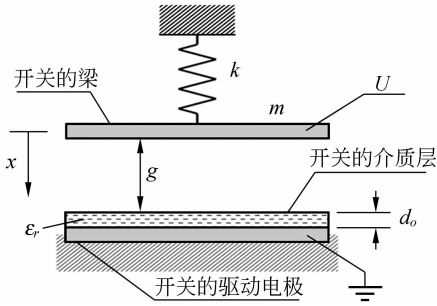


图 3 电容式 RF MEMS 开关一维集总模型

Fig. 3 Lumped model of capacitive shunt RF MEMS switch

本文采用文献[8]提出的一维动态集总模型, 如式(4)所示。其中, m_{eff} 为开关梁的有效质量, 大小为 $0.492m$; F_e 表示开关静电驱动力; n 表示开关梁的厚度; E 表示开关梁的杨氏模量; ν 表示开关梁的泊松比; S_r 表示开关梁的残余应力; g_0 表示开关梁的原始间隙; b 表示阻尼系数; Q_{eff} 表示开关梁的品质因素; λ 表示空气分子平均自由程。 b 与 g 有关, 因此开关梁的振动是变阻尼的。对于电容式并联开关, 开关从开态到关态的过程就是开关下拉的过程, 即从 Up 态到 Down 态; 开关从关态到开态的过程就是开关释放的过程, 即从 Down 态到 Up 态。在计算过程中, 开关采用常见的驱动方法, 在开关下拉过程所加的驱动电压恒定, 开关释放过程开关驱动电压为 0 V。

$$\begin{cases} m_{\text{eff}} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + b \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = F_e \\ F_e = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 W \omega U^2}{(g_0 + d_0/\epsilon_r - x(t))^2}, \text{ 下拉阶段} \\ 0, \text{ 释放阶段} \end{cases} \\ k = L\omega \cdot \left(\frac{32En^3}{W(1-\nu^2)(2L^3 - 2LW^2 + W^3)} + \frac{8S_r(1-\nu)n}{2LW - W^2} \right) \\ b = \frac{\sqrt{km}}{Q_{\text{eff}} \left(1.1 - \left(\frac{x(t)}{g_0} \right)^2 \right)^{3/2}} \end{cases} \quad (4)$$

开关梁的 Q_{eff} 可以由式(5)求得^[9-10]。其中, ρ 为梁的密度, μ 为空气的黏度, 这里取标准大气压和温度(SPT)下理想气体的黏度值 1.845×10^{-5} Pa · s。本文假设开关工作在 SPT 下。

$$Q_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{E\rho n^2}}{\frac{\mu}{\left(1 + 9.638 \left(\frac{\lambda}{g_0 - x(t)}\right)^{1.159}\right)} \left(\frac{L\omega}{2}\right)^2 g_0^3}, \quad (5)$$

2.3 开关实例

本文利用 HFSS 电磁仿真软件, 以一个电容式并联毫米波 MEMS 开关作为实例进行模拟分析, 如图 4 所示。开关的衬底材料为砷化镓(GaAs), 厚度为 100 nm。开关的介质层材料为氮化硅(SiN)。CPW 和梁的材料为金(Au)。开关工作在 35 GHz 时, 仿真结果为 Up 态 $S_{11} = -19.1$ dB, $S_{21} = -0.20$ dB; Down 态 $S_{11} = -0.21$ dB, $S_{21} = -20.1$ dB。开关的具体参数如表 1 所示。

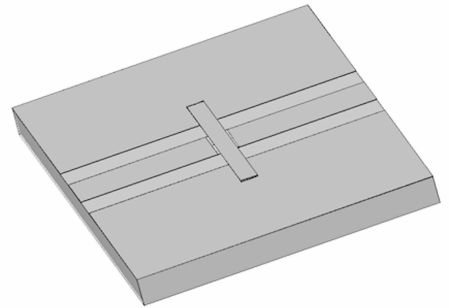


图 4 电容式并联毫米波 MEMS 开关
Fig. 4 Capacitive shunt millimeter-wave MEMS switch

表 1 开关的具体参数

Tab. 1 Specific parameters of switch

参数	值
梁的长度 $L/\mu\text{m}$	300
梁的宽度 $w/\mu\text{m}$	40
梁的厚度 $n/\mu\text{m}$	2
CPW 中心导线宽度 $W/\mu\text{m}$	70
梁的原始间隙 $g_0/\mu\text{m}$	1.6
开关介质层的厚度 $d_0/\mu\text{m}$	0.15
金的密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	19.3
金的杨氏模量 E/GPa	78
金的泊松比 ν	0.42
梁的残余应力 S_r/MPa	0
真空介电常数 $\epsilon_0/(\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	8.854×10^{-12}
开关介质层的相对介电常数 ϵ_r	7.6
SPT 下空气分子自由程 $\lambda/\mu\text{m}$	0.069
开关的工作频率 f/GHz	35
开关下拉的驱动电压 U/V	70

3 毫米波 MEMS 开关 S 参数在开关过程中的瞬态变化的结果分析

首先,利用式(5)可以计算出上述开关梁的品质因素 $Q_{\text{eff}}=1.2(g=1.6 \mu\text{m})$ 。根据公式(4),利用 MATLAB 软件可以计算出开关过程中梁的空气间隙变化。可以发现,开关下拉时间的计算结果约为 $9.4 \mu\text{s}$ (图 5),开关的释放时间的计算结果约为 $20 \mu\text{s}$ (图 6)。释放时间较大是由梁的振荡引起的。

利用上述开关过程中梁空气间隙与时间的变化关系,再结合 HFSS 软件模拟得到的在不同的梁空气间隙条件下开关的 S 参数,可以得到开关 S 参数在开关过程中的瞬态变化。

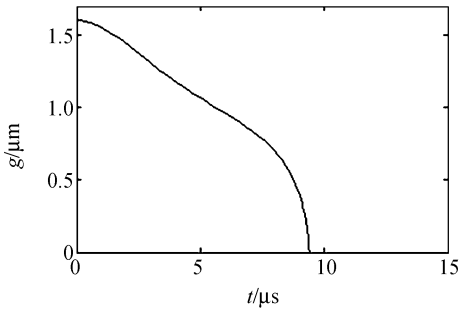


图 5 开关下拉过程,开关梁的空气间隙的变化

Fig. 5 Variation of air gap of switch's beam during pull-in

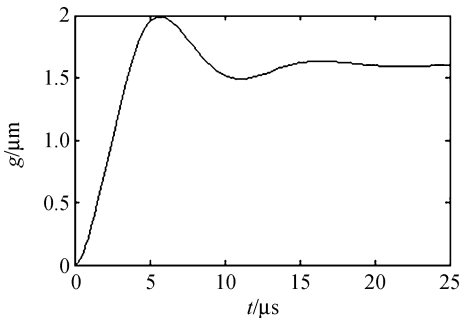


图 6 开关释放过程,开关梁空气间隙的变化

Fig. 6 Variation of air gap of switch's beam during release

通过模拟可以发现,开关在下拉过程中, S_{21} 先缓慢的减小:从 Up 态稳定值 -0.20 dB 减小到

-1.02 dB 需时 $9.11 \mu\text{s}$,占开关下拉时间的 97%; S_{21} 在下拉过程的时间末段才迅速减小:从 -1.02 dB 减小到 Down 态稳定值 -20.1 dB 只需 $0.29 \mu\text{s}$,占开关下拉时间的 3%,如图 7 所示。这表明在开关下拉过程中,开关大部分时间都导通信号,当开关的梁接近或接触介质层时才能有效地阻隔信号。在开关释放的过程中, S_{21} 在释放过程的初段就迅速增大:从 Down 态的稳定值 -20.1 dB 增加到 -1.16 dB 只需 $1.09 \mu\text{s}$,占释放时间的 5.5%,而从 -1.16 dB 到 Up 态的稳定值 -0.20 dB 则需时 $18.91 \mu\text{s}$,占释放时间的 94.5%;同时可以发现,梁从振荡衰减到稳态需要较长的时间。但是,梁的振荡对 S_{21} 影响很小(只引起 0.1 dB 的变化),如图 8 所示。因此开关从阻隔信号到导通信号所需要的时间比开关释放时间小一个数量级。

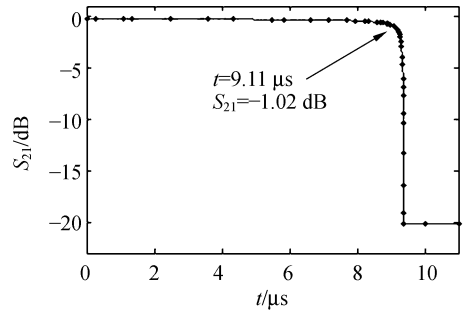


图 7 开关下拉过程,开关 S 参数的瞬态变化

Fig. 7 Transient S-parameters of switch during pull-in

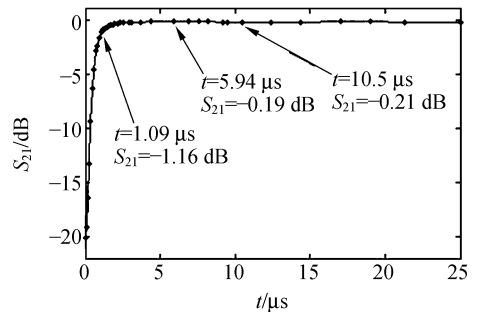


图 8 开关释放过程,开关 S 参数的瞬态变化

Fig. 8 Transient S-parameters of switch during release

4 结 论

本文采用一个电容式并联毫米波 MEMS 开

关首次模拟了 S 参数在开关过程中的瞬态变化。结果发现,在开关下拉过程中, S_{21} 先缓慢减小:从 Up 态稳定值 -0.20 dB 减小到 -1.02 dB 需时 $9.11 \mu\text{s}$,占下拉时间的 97%; S_{21} 在下拉过程的时间末段才迅速减小:从 -1.02 dB 减小到 Down 态稳定值 -20.1 dB 只需 $0.29 \mu\text{s}$,占开关时间的

3%。在开关释放过程中, S_{21} 在过程的初段就迅速增大:从 Down 态的初值 -20.1 dB 增加到 -1.16 dB 只需 $1.09 \mu\text{s}$,占释放时间的 5.5%。因此,开关从导通信号到阻隔信号的转换时间约为开关的下拉时间;开关从阻隔信号到导通信号的转换时间要比开关的释放时间小一个数量级。

参考文献:

- [1] JANG Y H, LEE Y S, KIM Y K, *et al.*. High isolation RF MEMS contact switch in V-and W-bands using two directional motions[J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(2):153-154.
- [2] CHAN K Y, RAMER R. A novel RF MEMS switch with novel mechanical structure modeling[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, 20(1):1-9.
- [3] GONG S B, SHEN H, BARKER N S. Study of broadband cryogenic DC-contact RF MEMS switches[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, 57(12):3442-3449.
- [4] MULDAVIN J B, REBEIZ G M. High-isolation CPW MEMS shunt switches-part 1: modeling[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2000, 48(6):1045-1052.
- [5] QIAN J, CHANG H P, CETINER B A, *et al.*. RF MEMS asymmetric capacitive switch with high-isolation at selected low-microwave frequency[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2007,

- 49(3):702-706.
- [6] SIMION S. Modeling and design aspects of the MEMS switch[C]. 2003 *International Semiconductor Conference, Vols 1 and 2, Proceedings*. 2003:125-128.
- [7] BUCCELLA C, FELIZIANI M, MANZI G. Circuit modeling of RF capacitive MEMS switch[C]. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics* 2005, 2005:1117-1121.
- [8] YUAN X L, HUANG Q A, LIAO X P. Analysis of electromagnetic interference of a capacitive RF MEMS switch during switching[J]. *Microsystem Technologies-Micro-and Nanosystems-Information Storage and Processing Systems*, 2008, 14(3):349-360.
- [9] HOWE R T, MULLER R S. Resonant-microbridge vapor sensor[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1986, 33(4):499-506.
- [10] VEIJOLA T, KUISMA H, LAHDENPERA J. Model for gas film damping in a silicon accelerometer [C]. *Proceedings of international Conference on Solid State Sensors and Actuators, Vol. 2.*, 1997: 1097-1100.

作者简介:



廖小平(1966—),男,湖南衡阳人,教授,博士生导师,1998年于东南大学获得博士学位,主要从事 RF MEMS 的研究。E-mail: xpliao@seu.edu.cn



肖建斌(1984—),男,广东肇庆人,硕士研究生,2007年于华南理工大学获得学士学位,主要从事 RF MEMS 的研究。E-mail: jianbinxiong@tom.com