

射频微机械开关的计算机辅助设计*

魏华征¹ 郭方敏¹ 赖宗声¹ 朱守正¹ 朱自强¹ 李小卫² 程知群² 孙晓玮²

(1 华东师范大学信息科学技术学院, 上海 200062)

(2 中国科学院上海冶金研究所 传感技术联合开放实验室, 上海 200050)

摘要:应用计算机辅助设计(CAD)方法模拟设计一种射频微机械(RF-MEMS)开关.用 Agilent ADS 软件模拟分析了共面波导的传输线损耗和 MEMS 开关的等效电路模型,并应用 ANSYS 软件模拟开关的驱动电压,得到了 35GHz 工作频率的并联电容式 MEMS 开关一些有意义的理论分析结果.

关键词: 并联电容式开关; 微电子机械系统 (MEMS); 共面波导; ADS 软件; ANSYS 软件

EEACC: 2220; 2570

中图分类号: TN405

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)09-0947-05

1 引言

MEMS 开关是利用静电吸附力来控制微桥或悬臂的上、下运动从而实现开、关特性,它可广泛应用于射频微波、毫米波领域.它与传统的 FET 或 PIN 二极管开关相比,优点是^[1]:(1)消除了由欧姆接触引起的电阻损耗,同时传输 RF 信号的高电导率金属结构使传输损耗减小.(2)消除了由半导体结引起的 $I-V$ 非线性,改善了 RF 器件的失真特性,提高电源控制能力.(3)由于 RF-MEMS 开关在静电下工作,基本上没有静电流,其功率消耗近似于零.南京电子器件研究所已研制成功了国内首只宽带射频(DC-20GHz) MEMS 开关^[2].虽然 MEMS 开关速度只有微秒级,但对于很多应用场合已足够了,如在相控阵天线中应用等.根据结构形式, MEMS 开关可分为两种^[3]:一种是一端固定另一端是自由的悬臂或弹性梁结构;另一种是桥式结构.本文提出了用 ADS 和 ANSYS 分析设计桥式 MEMS 开关并对其进行信号模拟.

2 MEMS 开关的设计

2.1 衬底材料的选择

硅和砷化镓都可用于制造半导体集成电路.常用硅材料电阻率为 $1\sim 100\Omega\cdot\text{cm}$,绝缘性差,作微波、毫米波电路的衬底时,介质漏电损耗比砷化镓约高一个数量级.通常有两条途径可以解决硅衬底的损耗:一种是用高电阻率($>1000\Omega\cdot\text{cm}$)硅;另一种是在硅晶片与传输线导体之间加绝缘介质层.第二种方法虽然可以降低介质漏电损耗,但不能有效抑制传输线间的耦合噪声,尤其是在高频端^[4].

砷化镓半绝缘衬底可通过补偿机制获得,其电阻率比硅高 4 个数量级.用砷化镓作微波集成电路的衬底,其绝缘性能好,介质漏电损耗小,工艺简化,可靠性提高.

2.2 MEMS 开关结构和工作原理

本文模拟的并联电容式 MEMS 开关结构如图 1 所示.共面波导传输线、介质层和空气桥等开关电

* 国家基础研究发展基金(973)(No.G199903310-5)、国家杰出青年基金(批准号:69925409)及上海市 AM 基金(No.0004)资助项目

魏华征 男,1978 年出生,硕士研究生,主要从事 MEMS 器件和电路的研究.

郭方敏 女,1957 年出生,高级工程师,长期从事微波、毫米波器件与电路、光电子器件及 MEMS 器件的研究工作.

2001-12-13 收到,2002-03-20 定稿

路制作在砷化镓衬底上. 介质层是避免开关受静电驱动时, 直流信号短路. 微桥和介质材料之间是空气, 信号由传输线传输, 相当于开关处于开态, 如图 1(a) 所示. 当加上一定电压, 异性电荷间的静电吸引力把桥金属膜拉下来, 接触到绝缘介质材料上, 如图 1(b) 所示. 这时, 微桥、介质材料和共面波导中间的传输线三者形成一个大电容, 信号将通过这个电容接地, 从而开关实现关态. 开关的插入损耗及隔离性能取决于开态和关态的电容^[1].

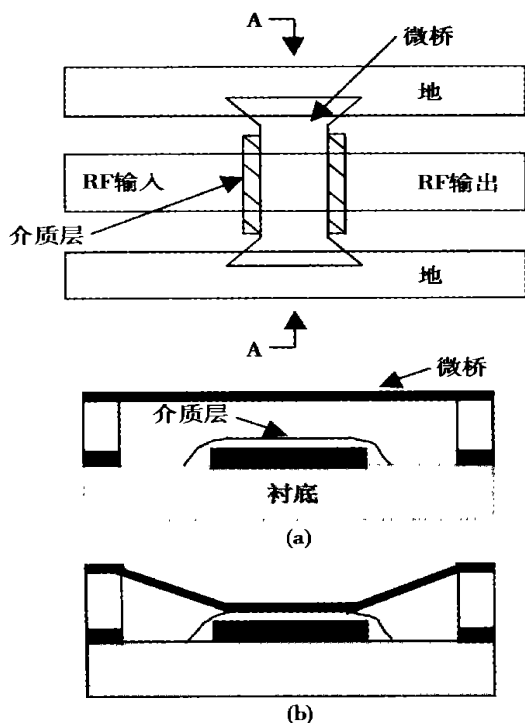


图 1 MEMS 开关的顶视图和 A-A 方向的剖面图 (a) 开态; (b) 关态

Fig. 1 Schematic of top-view and cross section A-A of a shunt MEMS switch (a) Switch up; (b) Switch down

MEMS 开关的基本要求是: 开关接通时, 传输损耗应尽可能小, 即插入损耗小. 开关关断时, 衰减应尽可能大, 即隔离度要高. 开关的驱动电压应尽可能低. 一般来说, 开关处于关态和开态的电容比要尽可能大, 但同时也要考虑开关的驱动电压、介质击穿及开关速度等因素.

2.3 共面波导(CPW)设计

MEMS 开关的插入损耗由两部分组成: 传输线损耗和微桥损耗^[3]. 传输线损耗随共面波导的尺寸而变化, 我们用 ADS 软件来设计共面波导, 并分析

它的传输损耗(包括导体损耗和介质损耗). 图 2 是砷化镓衬底上不同尺寸的共面波导的传输损耗随频率的变化, 图中 W 是共面波导中心导带的线宽, G 是共面波导中心导带与地线的间距, 设定传输线特性阻抗 $Z_0 = 50 \Omega$. 从图 2 中三条曲线可以看出, 共面波导的传输损耗随频率的增加而增大, 但共面波导尺寸(W 、 G)越大, 它的传输损耗越小. 共面波导的传输线厚度由导体材料的趋肤深度决定, 通常传输线厚度等于 3~4 倍导体材料的趋肤深度 ($\sim 0.4 \mu\text{m}$). 我们用金作传输线材料, 厚度取 $1.5 \mu\text{m}$.

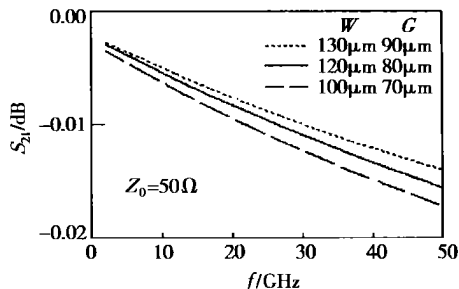


图 2 不同尺寸时共面波导的传输线损耗随频率的变化
Fig. 2 Attenuation of CPW lines versus frequency with various dimensions

2.4 MEMS 开关等效电路模拟

MEMS 开关可以等效为两小段传输线和一个微桥的集总 CLR 串联模型^[3], 如图 3 所示.

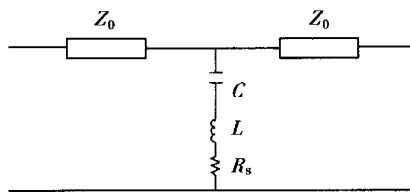


图 3 MEMS 开关等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit model of the shunt MEMS switch

其中, 电容 C 在开关处于开态和关态时的典型值分别为 $20 \sim 60 \text{fF}$ 和 $2 \sim 5 \text{pF}$, 串联电感和电阻的典型值分别为 $2 \sim 8 \text{pH}$ 和 $0.1 \sim 0.4 \Omega$ ^[3]. 我们用 Agilent ADS 软件模拟开关等效电路. 图 4 给出了开关处于开态时 R 、 L 、 C 对插入损耗的影响. 从图 4(a) 可以看出, 电容值不同对开关的插入损耗的影响很大, 电容越小插入损耗也越小. 从图 4(b) 中可以看到, 电阻和电感取三组不同值时, 它们的 S_{21} 参数几乎重合. 可见电阻和电感较小时对开关的插入损耗

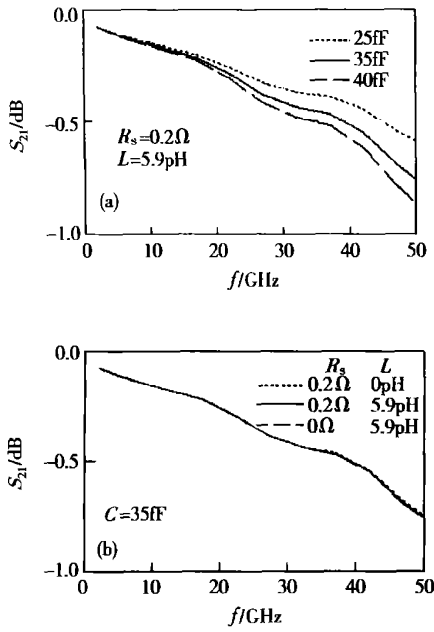


图4 MEMS 开关处于开态时 R, L, C 对插入损耗的影响
 Fig. 4 Effect of R, L, C on the insertion loss when MEMS switch being on

几乎没有影响. 图 5 给出了开关处于关态时 R, L, C 对隔离度的影响. 从图 5(a) 可以得到, 当 R_s, L 的值不变, 电容决定开关处于关态时的频率响应, 电容不同, 谐振频率点就不同, 从而影响开关的隔离度. 从图 5(b) 中可知, 一旦电容确定之后, 电感决定谐振频率, 从而影响开关的隔离度. 图 5(c) 表明, 开关处于关态时, C 的值不变, 电感和电阻对隔离度的影响都很大. 电感越小, 谐振频率就越高, 而电阻越小, 谐振曲线在谐振点附近就越陡, 同时隔离度也就越大.

2.5 MEMS 开关驱动电压模拟分析

MEMS 开关的驱动电压也是设计时要考虑的一个很重要的参数. 它可以通过建立静电力和微桥的回复力之间的力平衡方程得到^[5]. 它的值由下式给出:

$$V_p = (8kg^3/27 \epsilon Ww)^{1/2} \quad (V) \quad (1)$$

其中 ϵ 是真空介电常数; W 是共面波导中心导带宽度; w 是微桥的宽度; g 是微桥的高度; k 是微桥的弹性系数,

$$k = 32Et^3w/L^3 + 8\sigma l - \gamma tw/L \quad (N/m) \quad (2)$$

其中 E 是微桥材料的杨氏模量; t 是微桥的厚度; $L = W + 2G$ 是微桥的长度; σ 是微桥的内部残余应

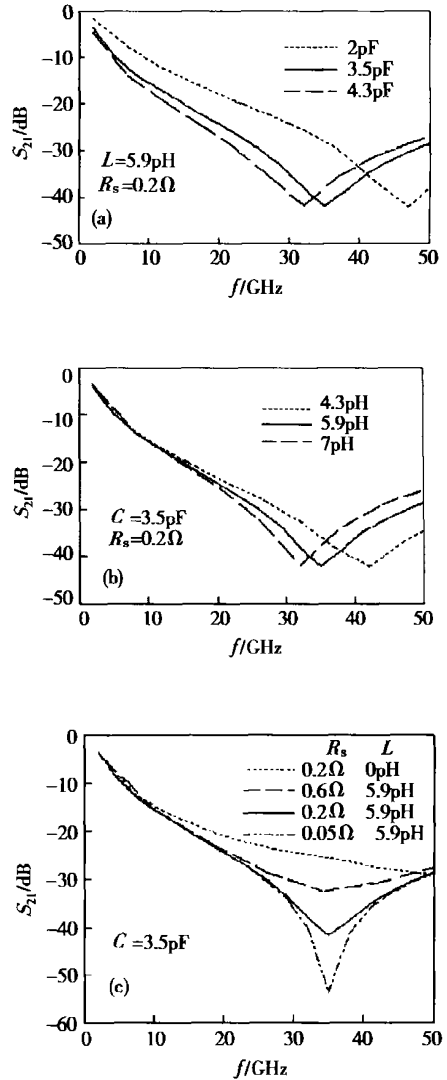


图5 MEMS 开关处于关态时 R, L, C 对隔离度的影响
 Fig. 5 Effect of R, L, C on the isolation when MEMS switch being off

力; ν 是泊松比. 由开关的驱动电压 V_p 的计算公式知道, 当开关的尺寸确定后, 影响驱动电压 V_p 的因素还有微桥所用的材料及其淀积后的内部残余应力 σ 常用金属材料通过公式 (1)、(2) 计算可知道, 用金、铝和钛在各个不同的 σ 下, 其下拉电压较接近. 但是, 在这三种金属材料中, 金作微桥材料时, 下拉电压最低. 同时, 金还具有电阻率低、性能稳定、表面不易氧化、抗腐蚀、易连接等优点, 所以用金作微桥材料是比较理想的. 无论微桥材料用哪种金属, 其厚度 (t) 对下拉电压影响都很大. 因此, 在选择微桥的厚度时, 一方面要考虑微桥的机械性能, 另一方面还要考虑微桥厚度对下拉电压的影响. 微桥太厚, 它的

机械性能固然好,但下拉电压却很大.若微桥的厚度太薄,下拉电压自然下降很多,但微桥在不停地上、下振动过程中容易变形或折断.

为了准确得到开关的驱动电压,我们用 ANSYS 软件对它进行静电模拟,研究其力学、电学的耦合.经过综合考虑开关的其它参数,介质层厚度取 150nm,电容比取 100.开关的基本尺寸为:共面波导中心导带宽 120 μm ,中心导带与地线的间距 80 μm .微桥材料是金,长 360 μm ,宽 70 μm ,厚 1 μm .由 ANSYS 软件模拟得到开关的静电驱动电压为 25V,微桥被下拉 2.1 μm .

3 讨论与结论

传输线损耗由衬底和波导结构组成,是 MEMS 开关插入损耗的一部分.

首先,共面波导的尺寸(W 、 G)越大,它的传输损耗越小,但还要考虑开关的其它性能和集成度.再者,开关尺寸过大,会产生高次模,增加传输损耗.另外,在 $W+2G$ 总尺寸不变时,随着 W 的增大,共面波导的传输损耗减小;在 G 不变的情况下,随着 W 的增大,或在 W 不变的情况下,随着 G 的增大,共面波导的传输损耗也减小;但上述两种情况下特性阻抗 Z_0 都将改变.

MEMS 开关在设计时主要考虑它的插入损耗、隔离度和驱动电压的大小.从插入损耗和隔离度方面来看,希望关态和开态的电容比尽可能大,但大的电容比使得驱动电压增大.因此,在设计开关的几何尺寸时,要用软件模拟分析使参数优化.

ADS 软件对 MEMS 开关等效电路的模拟,主要是分析电路中 R 、 L 、 C 对其电学性能的影响.而 ANSYS 软件是分析开关受到静电力作用时的力学性能.只有综合考虑了开关的电学、力学参数,才能较全面地反映其性能,才能对开关的设计有一定的指导意义.

经过理论计算和软件模拟分析,我们设计了并联电容式 MEMS 开关.开关在 35GHz 时插入损耗小于 0.5dB,隔离度高于 40dB,驱动电压小于 30V.参考文献[1]中制作的开关在 35GHz 时插入损耗小于 0.3dB,隔离度高于 35dB.我们的计算结果可以合理解释他们的实验结果.我们将通过对模型的进一步研究,并结合工艺分析来进一步提高 MEMS 开关的性能.

参考文献

- [1] Jamie Z, Shea Y, Susan C, et al. Micromachined low-loss microwave switches. IEEE MEMS, 1999, 18(2): 129
- [2] Zhu Jian, Lin Jintong, Lin Liqiang. DC-20GHz RF MEMS Switch. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22: 706
- [3] Muldavin J B, Rebeiz G M. High-isolation CPW MEMS shunt switches. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2000, 48(6): 1045
- [4] Mao Fajun. Microwave integrated circuits on Si substrate. Chinese Journal of Microwave, 2001, 17(1): 54 (in Chinese) [毛发军. 硅衬底微波集成电路. 微波学报, 2001, 17(1): 54]
- [5] Barker N S, Rebeiz G M. Distributed MEMS true-time delay phase shifter and wide-band switches. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1998, 46(11): 1881

Computer-Aided Design of RF-MEMS Switch^{*}

Wei Huazheng¹, Guo Fangmin¹, Lai Zhongsheng¹, Zhu Shouzheng¹, Zhu Ziqiang¹,
Li Xiaowei², Cheng Zhiqun² and Sun Xiaowei²

(¹ College of Information Science & Technology, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

(² Shanghai Institute of Metallurgy, Laboratories of Transducer Technology,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: A RF-MEMS switch is designed by computer-aided design (CAD) method. The transmission-line loss of the coplanar waveguide (CPW) and the equivalent-circuit model of the microelectromechanical systems (MEMS) switch are simulated using Agilent ADS software. The actuation voltage of the switch is also analysed by ANSYS software. Significant simulation results of the shunt capacitive switch, operating at 35GHz, are obtained.

Key words: shunt capacitive switch; MEMS; CPW; ADS; ANSYS

EEACC: 2220; 2570

Article ID: 0253-4177(2002)09-0947-05

^{*} Project supported by Basic Research and Development Program of China(973)(No.G199903310-5), National Excellent Youth Foundation of China(No.69925409) and AM Foundation of Shanghai(No.0004)

Wei Huazheng male, was born in 1978, graduate student. He is engaged in the research on MEMS devices & circuits design.

Guo Fangmin female, was born in 1957, senior engineer. She is engaged in the research on microwave devices & circuits, photoelectron devices and MEMS devices.

Received 13 December 2001, revised manuscript received 20 March 2002

©2002 The Chinese Institute of Electronics

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>