

X 波段 MEMS 膜开关的阻抗分析模型

郑惟彬^{1,2}, 黄庆安¹, 廖小平¹, 李拂晓²

(1. 东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 江苏南京 210096; 2. 南京电子器件研究所, 江苏南京 210016)

摘 要: 射频微机械 (RF MEMS) 开关由于其优越的高频特性在微波和毫米波电路中表现出巨大的应用前景. 但是目前对微机械开关的研究主要都集中在开关梁的结构设计和力学分析上, 对开关的电磁特性的研究, 尤其是开关高频阻抗匹配分析的研究与验证比较少. 本文在高频传输线研究的基础上, 推导出微机械开关的“开态”阻抗匹配模型, 并利用 HFSS 软件对开关的高频特性进行模拟. 其结果有助于设计高性能的 RF MEMS 开关.

关键词: 微机械膜开关; 阻抗匹配; 插入损耗; 隔离度

中图分类号: TN4, TN713, O357 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12A-2213-03

An Impedance Analysis of MEMS Membrane Switches for X-Band Application

ZHENG Wei-bin^{1,2}, HUANG Qing-an¹, LIAO Xiao-ping¹, LI Fu-xiao²

(1. Key Laboratory of MEMS of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. Nanjing Electronic Device Institute, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: Microelectromechanical switches have demonstrated great potential in microwave and millimeter-wave circuits for their superior high-frequency performance. Most of researches on MEMS switches were concentrated on the structural design and mechanical analysis of their beams. There are few researches that have been done to analyze the electromagnetic characteristics of the MEMS switches, especially the high-frequency impedance matching of the switches. In this paper, the on-state impedance matching formulation of MEMS switches is developed based on the results of the high-frequency transmission line, and the electromagnetic characteristics of MEMS switches are confirmed by using the HFSS software. This helps to design high-performance RF MEMS switches.

Key words: MEMS membrane switches; impedance matching; insertion loss; isolation

1 引言

在低损耗的微波和毫米波电路中, 静电驱动的射频微机械开关表现出巨大的应用前景. 简单的来说, 射频微机械开关是由静电驱动的金属梁和 RF 信号线构成. 到目前为止, 研究的射频微机械开关主要有两种结构形式: 金属直接接触的静电悬臂梁开关^[1]和微机械膜开关^[2]. 在微机械膜开关中, 金属梁悬挂在 CPW 信号线的上面, 两端固定在 CPW 地平面上. 在金属梁和 CPW 信号线之间, 为了防止直流短路, 淀积有 0.1 ~ 0.2 μm 厚的绝缘层 (通常为 Si₃N₄, 见图 1). 当开关处于“开态”时, 金属梁和地平面间有较小的并联电容, 信号导通, 开关表现出较小的插入损耗; 当开关处于“关态”时, 并联电容值增大为“开态”时的 20 ~ 100 倍, 开关处于射频短路, 表现出较大的隔离度.

和传统的 FET 开关和 PIN 二极管开关相比, 由于在结构上消除了金属-半导体结和 p-n 结, MEMS 开关具有以下优点:

(1) 极其优越的高频特性. 在通常情况下, MEMS 开关具有极低的插入损耗 (< 0.25 dB/30 GHz) 和较高的隔离度 (< -

20 dB/30 GHz);

(2) 极低的直流功耗. MEMS 开关功耗的典型值约为 10 nW;

(3) 较高的关/开电容比 ($C_d/C_u = 20 \sim 100$).

但是, 目前制作的 MEMS 开关的机械特性还比较差, 无法满足工程应用的要求.

本文主要讨论工作在 X 波段的射频 MEMS 膜开关的阻抗匹配模型. 在对开关梁等效微波电路深入分析的基础上, 推导出微机械膜开关的“开态”阻抗匹配模型, 并用 HFSS 进行了模拟. 这对设计高性能的微机械开关具有重要意义.

2 MEMS 膜开关的阻抗模型

本文中, RF MEMS 开关是制作在高电阻率衬底 50 欧姆平面波导 (CPW) 上的, 共平面波导的尺寸为 $G/S/G = 84/140/84 \mu\text{m}$, 工作频段为 X 波段 (8 ~ 12 GHz). 开关梁的基本尺寸为: 梁长 $L = 300 \mu\text{m}$, 梁宽 $b = 20 \sim 140 \mu\text{m}$, 梁厚 $h = 1.5 \mu\text{m}$, 极板间距 $g_0 = 2 \mu\text{m}$.

对于微波器件, 插入损耗和隔离度是衡量其高频特性的

重要指标. 射频 MEMS 开关的器件结构和工作机理决定了 MEMS 开关具有优越的高频特性. 因此, 在 MEMS 开关的微波设计中, 开关的“开态”输入/输出阻抗匹配问题成为微机械开关设计的重要问题. 在推导 MEMS 开关“开态”阻抗匹配模型之前, 先研究开关梁的微波等效电路.

2.1 固支架的微波等效电路

在微机械膜开关的微波设计中, 固支架等效为 L 、 C 、 R 的串联回路, 其中电容 C 和开关的工作状态有关, 是可变电容, 如图 1(c) 所示^[3].

由图可知, LC 回路串联谐振频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2\sqrt{LC}} \quad (1)$$

其中: $C = C_u$ 或 C_d , 和固支架的位置有关.

根据开关的工作状态, 串联谐振频率可细分为“开态”串联谐振频率 f_u 和“关态”串联谐振频率 f_d , 即:

$$\begin{cases} f_u = \frac{1}{2\sqrt{LC_u}} \\ f_d = \frac{1}{2\sqrt{LC_d}} \end{cases} \quad (2)$$

因为 $C_u \ll C_d$, 所以 $f_u \gg f_d$.

等效 CLR 串联回路的输出阻抗为:

$$Z_B = R + jL + \frac{1}{jC} \quad (3)$$

依据传输的微波信号频率, 可对公式(3)做进一步的简化, 得:

$$Z_B = \begin{cases} \frac{1}{jC} & , f \ll f_0 \\ jL & , f \gg f_0 \\ R & , f = f_0 \end{cases} \quad (4)$$

对于具有上述结构尺寸的 MEMS 膜开关, 等效 CLR 回路的“关态”串联谐振频率约为 20~36GHz, “开态”串联谐振频率大于 100GHz (此结果适用于绝大多数的 RF MEMS 开关). 下面是用 HFSS 软件模拟的开关插入损耗曲线图和隔离度曲线图, 所模拟的开关尺寸为: 梁长 300 μ m、梁宽 120 μ m、梁厚 1.5 μ m、极板间距 2 μ m, CPW 尺寸 $G'/S'/G = 84/140/84\mu$ m.

由图 2(b) 可知, $f_d = 21.3$ GHz. 因此, $f_u \gg f_d > 10$ GHz.

2.2 膜开关的“开态”阻抗匹配模型

RF MEMS 膜开关的微波电路可等效为两段均匀传输线

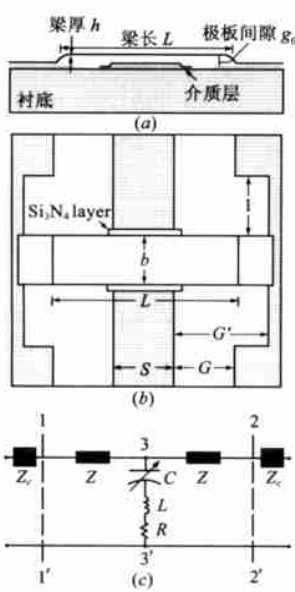


图 1 射频 MEMS 膜开关的结构示意图 (a) 截面图; (b) 顶视图; (c) 微波等效电路图

阻抗 Z 和 CLR 回路的串并联, 其中等效均匀传输线的长度为 $l + b/2$, 是开关不均区长度的一半 (见图 1(c)).

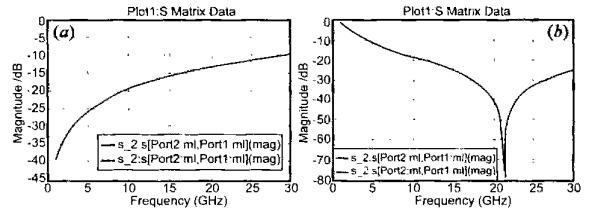


图 2 (a) 射频微机械开关的插入损耗曲线图; (b) 隔离度曲线图

根据相关的电路理论, 共

平面波导 (CPW) 可看作无损耗传输线, 无损耗传输线的阻抗为纯电阻, 即 Z_c 、 Z 为实阻抗^[4]. 此外, 由于 RF MEMS 开关是应用于微波电路的, 所以对开关的阻抗匹配分析将针对在 2-2 端后接特性阻抗 Z_c

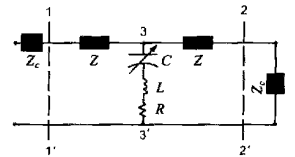


图 3 射频微机械开关的微波等效电路

的微波电路模型 (见图 3). 本节主要研究使开关输入/输出阻抗为特性阻抗 Z_c 时, 等效均匀传输线阻抗 Z 的取值模型.

由相关的电路理论^[4], 3-3 端的输入阻抗 (不包括 CLR 串联回路) 为:

$$Z_{33} = Z \frac{Z_c + jZ \tan(l)}{Z + jZ_c \tan(l)} \quad (5)$$

其中, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi c}{f\lambda}$ 是电磁波的相位常数; $l = l + b/2$ 是等效均匀传输线的长度.

因为设计的 MEMS 开关是工作在 X 波段的, 所以微波信号的频率 $f \ll f_u$, 根据公式(4)的结论, 得:

$$Z_B = \frac{1}{jC_u} \quad (6)$$

由此得 3-3 端的阻抗为:

$$Z_2 = Z_B \quad Z_{33} = \frac{Z(Z_c + jZ \tan(l))}{(Z + jZ_c \tan(l)) + Z(Z_c + jZ \tan(l))jC_u} \quad (7)$$

同理, 1-1 端的输入阻抗为:

$$Z_{in} = Z \frac{Z_c + jZ \tan(l)}{Z + jZ_c \tan(l)} \quad (8)$$

根据阻抗匹配条件: $Z_{in} = Z_c$, 将公式(7)、(8)代入, 得:

$$Z^3 C_u \tan^2(l) - 2Z^2 \tan(l) + Z Z_c^2 C_u + 2Z_c^2 \tan(l) = 0 \quad (9)$$

公式(9)就是射频 MEMS 开关的“开态”阻抗匹配模型. 模型求解可借助 Mathematica 软件.

根据该阻抗匹配模型, 可得如下结论:

- (1) 射频 MEMS 开关的匹配阻抗 Z 仅与开关的不均匀区长度 $(2l + b)$ 和“开态”耦合电容 C_u 有关;
- (2) 因为共平面波导的特性阻抗由波导的结构尺寸所决定, 所以根据得到的匹配阻抗 Z 值, 可以反推开关 CPW 的结构尺寸;
- (3) 开关的“开态”耦合电容为:

$$C_u = (1 + k) \frac{\epsilon_0 S b}{g_0} \quad (10)$$

其中: k 是边缘效应系数, 约为 $0.3 \sim 0.5^{[3]}$;

ϵ_0 是空气的介电常数;

结构尺寸 S 和 g_0 由开关的力学模型所确定, 因此匹配阻抗 Z 是通过改变梁宽 b 实现的。

当 $Z_c = 50$ 时, 公式 (9) 就是 50 欧姆输入/输出匹配阻抗模型, 下面模拟 50 欧姆匹配阻抗与不均匀区长度和梁宽之间的关系 (见图 4)。

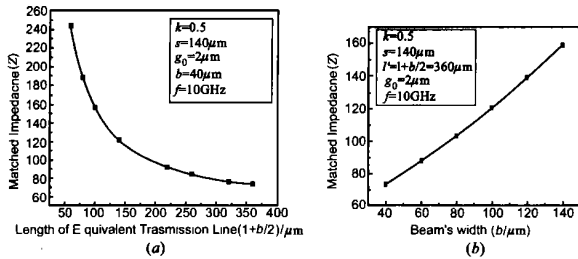


图 4 50 输入/输出匹配阻抗与等效传输线长度 (a) 和梁宽; (b) 之间的关系

4 结论

本文推导了射频微机械膜开关“开态”阻抗匹配模型, 并用 HFSS 软件进行了验证. 这对设计高性能的射频微机械开关具有重要的指导意义. 从上述分析中, 可以得到如下结论:

(1) 在 RF MEMS 开关的阻抗匹配分析中, 仅通过改变开关不均匀区长度和梁宽来实现。

(2) 当保持梁宽不变时, 匹配阻抗 Z 随不均匀区长度的增加而减小, 且减小幅度逐渐变小; 当不均匀区长度大于 $600\mu\text{m}$ 时, 长度的改变对匹配阻抗值的影响变得很小。

(3) 当保证不均匀区长度不变时, 匹配阻抗 Z 随梁宽的增大而几乎线性增大。

参考文献:

[1] J J Yao, MF Chang. A surface micromachined miniature switch for telecommunications applications with signal frequencies from DC up to 4 GHz [A]. Int. Conf. Solid-State Sens. Actuators Dig[C]. Stockholm, Sweden June 1996. 384 - 387.
 [2] C Goldsmith J Randall, S Eshelman, TH Lin, D Denniston, S Chen, B Norvell. Characteristics of micromachined switches at microwave frequencies [A]. IEEE MTT-S int. Microwave Symp. Dig[C]. San Francisco, CA June 1996. 1141 - 1144.
 [3] JB Muldavin, GM Rebeiz. High-isolation CPW MEMS shunt switches

3 模型验证

为了验证 RF MEMS 开关电磁模型的正确性, 根据公式 (9), 我们对 RF MEMS 膜开关结构进行了电磁优化设计, 并利用 HFSS 软件对优化设计前后的回波损耗 (S_{11}) 进行了模拟 (见图 5, 优化后的结构参数为: $l = l + b/2 = 360\mu\text{m}$, $b = 40\mu\text{m}$)。

由图可知, 经电磁优化设计后的 MEMS 开关的回波损耗不仅被减小, 而且在较大的频率范围内不随频率的变化而变化. 这说明开关的输入/输出阻抗匹配是成功的。

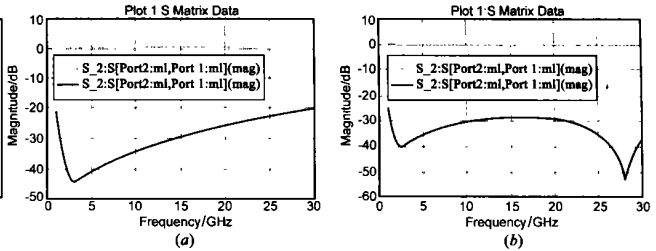


图 5 MEMS 开关“开态”插入损耗和回波损耗模拟值 (a) 优化前; (b) 优化后

Part 1: Modeling [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques June 2000, 48(6):1045 - 1052.

[4] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.

作者简介:



郑惟彬 男, 1974 年 10 月生于安徽省, 分别于 1997 年和 2000 年获合肥工业大学学士和硕士学位. 目前是东南大学 MEMS 教育部重点实验室博士研究生, 研究方向为: RF/MEMS.



黄庆安 男, 1963 年生于河南洛阳, 博士, MEMS 教育部重点实验室主任, 教授, 博士生导师, 研究方向为: 微电子学及 MEMS 系统与器件. 出版专著 1 部《硅微机械加工技术》, 科学出版社 1996, 发表 SCI/ EI 论文 70 余篇, 中国发明专利 2 项, 教育部自然科学一等奖 1 项, 现任 IEEE Senior Member, JAP, APL, JMEMS 和 JMM 审稿人, 国家“863”计划 MEMS 重大专项总体组专家, 国家杰出青年基金获得者.