

压控式毫米波 MEMS 移相器的可动薄膜*

郭方敏¹ 朱自强¹ 赖宗声¹ 朱守正¹ 朱荣锦¹ 忻佩胜¹ 范忠¹ 贾铭¹
程知群² 杨根庆²

(1 华东师范大学信息科学与技术学院, 上海 200062)

(2 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 传感技术国家重点开放实验室, 上海 200050)

摘要: 介绍了采用金、铝硅合金等金属分别用作压控式 RF MEMS 开关阵列——移相器的可动薄膜, 实验表明金的延展性比较好, 弹性比铝硅合金稍差, 启动电压较高. 相比较含硅 4% 的轻质量铝硅合金具有较低的启动电压 (5V), 用该弹性膜制备的 21 桥压控式开关阵列——毫米波移相器的下拉电压为 20V 时, 相移量可达到 370°/3.5mm 以上 (35GHz), 并能在不同的控制电压下根据要求改变相移量, 其传输损耗为 55~90 dB, 比金可动膜结构要高.

关键词: RF MEMS 开关; 移相器; 下拉电压; 铝硅合金

EEACC: 2220; 2570

中图分类号: TN405

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)06-0631-06

1 引言

射频微电子机械系统(MEMS)毫米波移相器是 MEMS 毫米波相控阵天线的关键部件之一, 它直接决定了毫米波相控阵天线的性能. MEMS 等技术的出现, 为制造低损耗、高集成度、毫米波移相器及其他毫米波器件和控制电路提供了一个全新的解决方法, 其突出特点是: 损耗低、体积小、制造成本低、重量轻、可靠性高、易于与 IC、MMIC 电路集成等, 而且可以批量生产. 根据国外的研究报道, 目前在研的 MEMS 移相器主要可分为两类^[1-3]: 一类是相位连续可调的分布式 MEMS 移相器, 模拟控制的 MEMS 移相器具有相位连续可调的特点, 因而可以更灵活地控制天线阵的波束; 但是不易控制相移量、插入损耗, 模拟控制偏压的起伏变化易引起相位噪声. 另一类则是以 MEMS 开关阵与不同长度传输线组成的数字式移相器, 它可以比较精确地控制相移量和插入损耗, 可靠性较高, 但设计困难, 体

积相对较大. 近年来, 有不少关于电容式 RF MEMS 开关和移相器的报道^[4-8], 但有的启动电压偏高, 有的相移效率低. 本文分析和设计了工作在 35GHz 频段的相位连续可调的多位开关阵毫米波微机械移相器. 它们主要是以共平面波导为基本结构, 通过改变共平面波导传输线的相速度来达到相位的改变. 为获得低启动电压、高相移效率, 其中压控式 MEMS 移相器可动薄膜的研究是一项关键技术.

2 MEMS 移相器可动薄膜的材料特性

2.1 MEMS 毫米波移相器结构

MEMS 移相器主要是作为毫米波相控阵天线的波束电控部件. Barker 等最早提出了分布式 MEMS 毫米波移相器的结构^[1], 它是在毫米波共平面波导(CPW)传输线中心导带的上方, 周期性地加载若干 MEMS 金属微桥, 形成加载金属桥与未加载金属桥间周期性级联的传输线结构, 其纵向结构

* 国家重点基础研究发展规划(No. G1999033105)、国家杰出青年基金(批准号: 69925409)、上海-应用材料研究与发展基金(No. 0004)、上海市科学技术发展基金(Nos. 15211066, 012261028)资助项目

郭方敏 女, 高级工程师, 从事半导体器件研究.

2002-07-12 收到, 2002-10-28 定稿

©2003 中国电子学会

如图 1(a) 所示. 图 1(b) 是 MEMS 金属微桥的横向剖面图. MEMS 毫米波移相器加载的金属桥宽度、周期间隔的大小和金属桥离共平面波导的高度决定了慢波传输线特性阻抗、电波传播的相速度和 Bragg 反射截止频率. MEMS 毫米波移相器加载金属桥所产生的电容与共平面波导传输线的分布电容并联. 在 MEMS 毫米波移相器传输线的中心导带上加载一直流偏置电压, 改变直流偏置电压的大小, 可以改变金属桥的高度, 从而改变传输线的分布电容、传播常数和特性阻抗等, 以达到改变相移量的目的. 如果连续改变直流偏置电压的大小, 那么从移相器就可以得到连续变化的相移量. 加载的 MEMS 金属桥的宽度、长度、高度以及周期的数目都决定了相移量的大小.

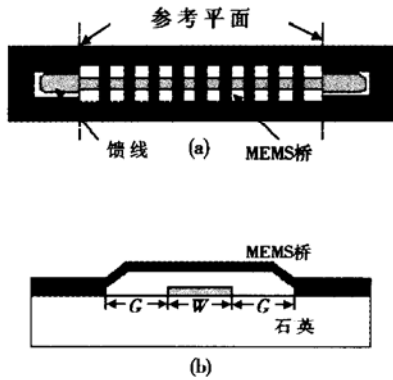


图 1 MEMS 毫米波移相器结构图 (a) MEMS 移相器的俯视图; (b) 移相器横截面图

Fig. 1 Schematic of the MEMS bridges of phase shifters (a) Top view; (b) Cross section

2.2 弹性系数的影响

加载在移相器中心导带上的直流偏置电压在金属桥周围空间中产生的静电场, 对 MEMS 金属桥有静电力($F = -U_e$)的作用:

$$F = \epsilon_0 W W_B V_{bias}^2 / 2h^2 \quad (1)$$

其中 ϵ_0 是自由空间介电常数; W 是 CPW 中心导带宽度; W_B 是加载电压后金属桥的宽度; h 是加载电压后金属桥和 CPW 中心导带之间的高度; V_{bias} 是施加在 CPW 中心导带上的偏置电压.

金属微桥由于材料应力而受到扭转力 F_0 的作用,

$$F_0 = k(h - h_0)N \quad (2)$$

其中 k 是金属桥材料的弹性系数; h_0 是零偏置电压下金属桥的高度. 金属桥的弹性系数 k 可近似为:

$$k = \frac{32Et^3W_B}{L^3} + \frac{8\sigma(1-\nu)tm}{L} \quad (3)$$

其中 E 是金属桥材料的杨氏模量; ν 是泊松率; σ 是金属桥的内部残留应力; t 是金属桥的厚度; $L = W + 2G$, 是金属桥的长度.

由于纯铝的杨氏模量为 $0.7 \times 10^{11} \text{N/m}^2$, 泊松比为 0.36, 硅的杨氏模量为 $1.9 \times 10^{11} \text{N/m}^2$, 泊松比为 0.28^[8], 假设铝硅合金的杨氏模量和泊松比与硅含量成线性关系^[4,5], 即铝硅合金的弹性系数大于纯铝的弹性系数, 又因为频繁的机械振动要求可动金属薄膜既具有一定的弹性, 又要有一定的刚性, 以确保静态时的机械稳定性和工作中的可靠性, 纯铝的刚性率是 $2.667 \times 10^{10} \text{N/m}^2$, 钛的刚性率是 $4.38 \times 10^{10} \text{N/m}^2$, 硅的刚性率是 $7.997 \times 10^{10} \text{N/m}^2$, 因此在硅中掺铝能有效地减少硅的刚性, 增强弹性, 得到最佳刚性/弹性比.

2.3 可动金属薄膜的下拉电压

金属桥的工作电压可通过建立静电力与金属桥的扭转力之间的力矩平衡而得到,

$$k(h - h_0) = - \frac{\epsilon_0 W W_B}{2h^2} V_{bias}^2 \quad (4)$$

求解上式, 当 $h < 2h_0/3$ 时, 方程只有一个正实根, 此即为金属桥的高度 h ; 而当 $h \geq 2h_0/3$ 时, (4) 式不再有正实根. 由此式可以看出, 当 MEMS 传输线的金属桥高度在 $h = 2h_0/3$ 处时, 金属桥的高度比变得不稳定, 这时会出现上下振荡, 而且金属桥的高度急剧下降. 因此, 可认为当 $h = 2h_0/3$ 时的工作电压是截止偏置电压 V_p ,

$$V_p = \sqrt{\frac{8k}{27\epsilon_0 W W_B} h_0^3} \quad (5)$$

所以加在 CPW 上的下拉偏置电压 V_{bias} 应小与截止偏置电压 V_p .

我们设计的可动金属薄膜厚度 $t = 0.7 \mu\text{m}$, 加载金属桥的宽度 $W_B = 300 \mu\text{m}$, CPW 中心导带宽度 W 分别为 50、100 和 $300 \mu\text{m}$, 加载金属桥和 CPW 中心导带之间的高度 $h = 2.5 \mu\text{m}$, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$.

2.4 下拉电压的理论模拟

应用 ANSYS 软件, 把静电场与力学场耦合, 模拟 MEMS RF 开关的下拉电压与不同比例铝硅合金的关系, 为了方便起见, 我们近似地认为铝硅合金

的杨氏模量和泊松比与硅含量成线性关系, 如图 2 所示. 图 3 表明工作电压与杨氏模量呈曲线关系, 并随杨氏模量的增加而上升. 此外薄膜的质量、产生静电的有效面积也是影响下拉电压的主要因素. 图 4 和图 5 表明通过 ANSYS 软件模拟获得的不同开关结构对下拉电压的影响. 由于图 4 可产生的静电面积比较大, 所以下拉电压相对较低.

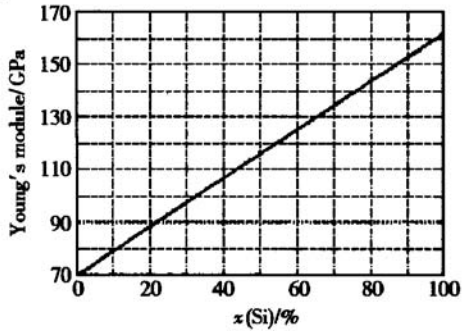


图 2 铝硅合金的杨氏模量与其中硅含量的关系
Fig. 2 Linear relationship between Young's module and silicon proportion

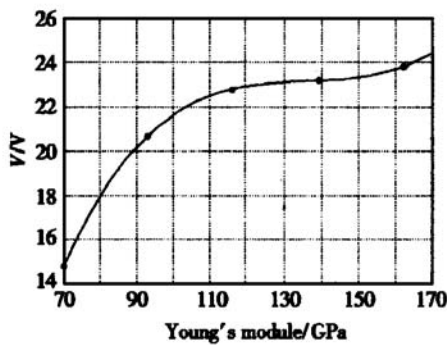


图 3 工作电压与铝硅合金的杨氏模量的关系
Fig. 3 Pull down voltage vs Young's module

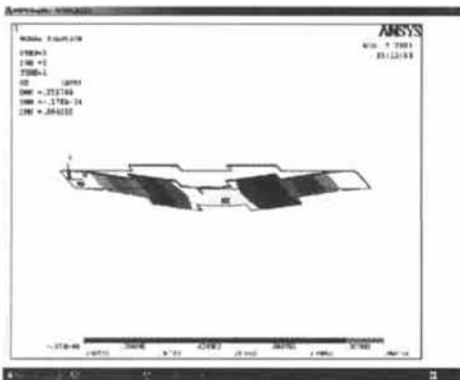


图 4 模拟下拉电压 10~ 11V 的开关结构
Fig. 4 Lower pull-down voltage of 10~ 11V

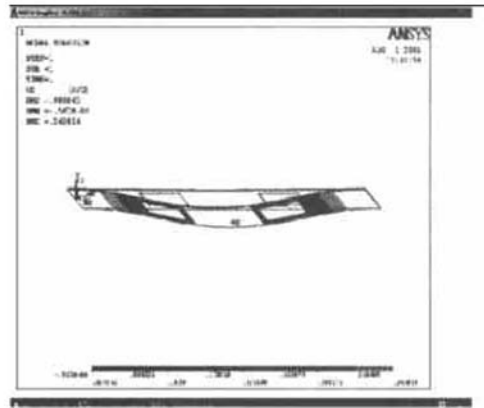


图 5 模拟下拉电压接近 17~ 18V 的开关结构
Fig. 5 Pull down voltage of nearly 17~ 18V

3 实验和结果

相位连续可调毫米波 MEMS 移相器的制造采用了 MEMS 牺牲层工艺, 移相器中的传输线是通过镀膜、光刻形成的 CPW 共平面波导, 整个结构制作在 600 μm 厚的石英基片上. 图 6 是移相器的制作工艺过程. 移相器开关桥膜分别采用蒸发 1 μm 左右铝硅合金 ($\text{Al}_{0.96}\text{Si}_{0.04}$) 可动薄膜和电镀金可动薄膜.

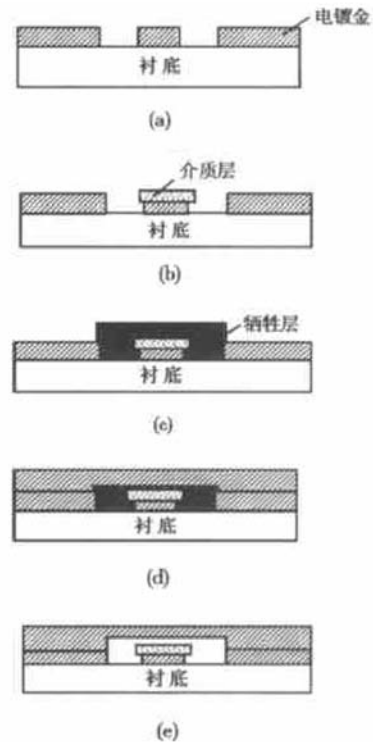


图 6 相移器加工步骤 (a) 1st 金属线电镀; (b) 形成介质层图形; (c) 形成牺牲层; (d) 薄膜桥电镀; (e) 去牺牲层

Fig. 6 Process of phase shifter

图 7 是 MEMS 毫米波移相器中含硅 4%, 厚度约为 $0.7\mu\text{m}$ 的铝硅合金可动膜的 SEM 照片, 图 8 是厚度约为 $1\mu\text{m}$ 的电镀金可动薄膜的 SEM 照片. 实验

表明虽然金的延展性比较好, 弹性却比铝硅合金稍差, 启动电压为 40V. 若金膜的厚度低于 $0.7\mu\text{m}$, 或用同样的工艺方法制作纯铝、铝钛合金弹性薄膜, 在

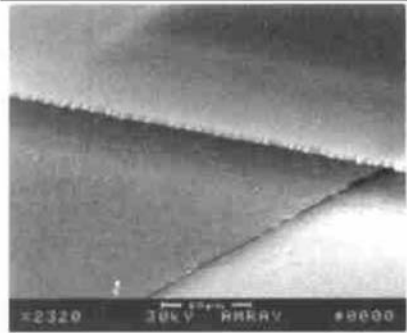


图 7 铝硅合金可动薄膜
Fig. 7 Al_{0.96}Si_{0.04} bridge

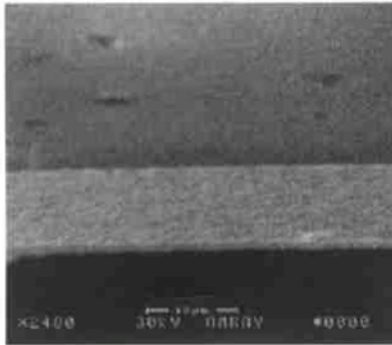


图 8 电镀金可动薄膜
Fig. 8 Gold bridge

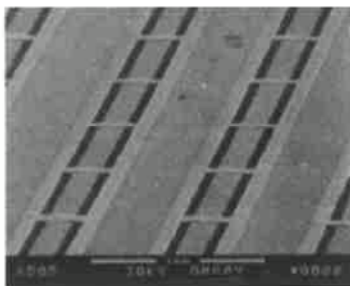
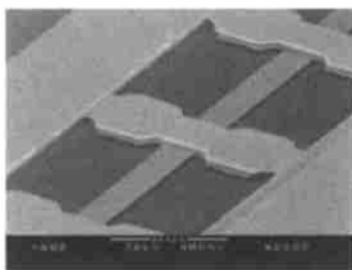


图 9 移相器照片
Fig. 9 Photos of MEMS phase shifter

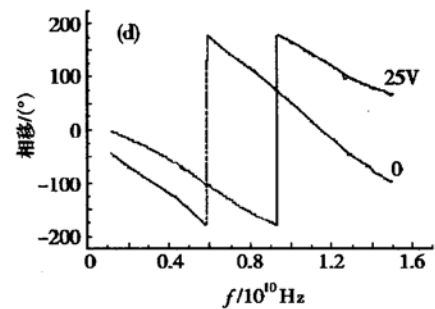
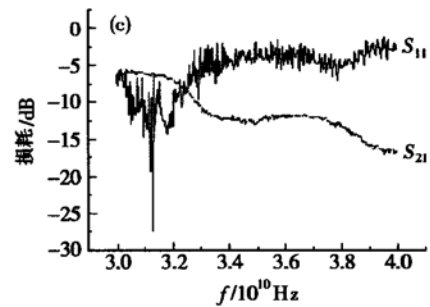
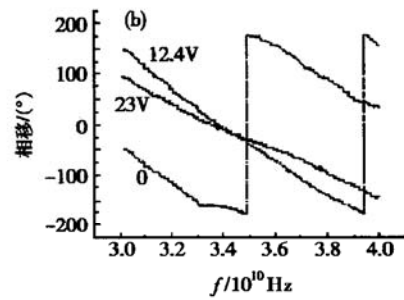
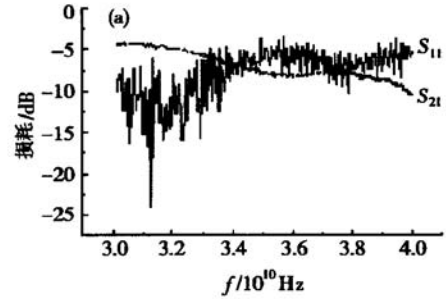


图 10 MEMS 移相器的 S 参数和随电压变化的相移曲线 (石英基片, 变中心导带结构, 铝硅工艺, 21 跨桥) (a) MEMS 移相器的 S 参数(30~ 40GHz, V= 0V); (b) 相移量随控制电压的变化曲线(30~ 40GHz); (c) MEMS 移相器的 S 参数(30~ 40GHz, V= 12.4V); (d) 相移量随控制电压的变化曲线(1~ 15GHz)

Fig. 10 S-parameters of a sample MEMS phase shifter and phase curves at different control voltages

牺牲层释放后,表现出不同程度的皱纹和坍塌,弹性膜失效.

我们通过 HP 网络分析仪和 Cascade2000 微波测试探针台进行在线测试.图 9 是移相器照片.图 10 中的(a)、(b)、(c)、(d)分别是具有铝硅合金可动膜的 MEMS 移相器在 30~40GHz 时的 S 参数和随电压控制相移量的变化曲线(1~40GHz),结果表明 21 桥压控式开关阵列——毫米波移相器在 35GHz 时,启动电压为 5V,下拉电压为 20V 时,相移量达到 372°/3.5mm,相移损耗为 55~90°/dB.

4 结论

通过设计与理论模拟,分别研究并制作了金、铝硅合金等金属的压控式 RF MEMS 开关阵列——移相器的可动薄膜,实验表明金的延展性比较好,弹性比铝硅合金稍差,下拉电压较高,21 桥金膜的启动电压是 40V,但传输损耗较低.相比较含硅 4% 的轻质量铝硅合金具有较低的下拉电压,用该弹性膜制备的 21 桥压控式开关阵列——毫米波相移器在 35GHz 时,启动电压在 5 和 20V 时相移量达到 100°/mm,相移损耗为 55~90°/dB,12GHz 时,相移量达到 140°/3.5mm,并能在不同的控制电压下根据要求改变相移量,但传输损耗比金膜大约 2 倍/3.5mm.

致谢 感谢中国科学院上海微系统与信息技术研究所工艺线的戈肖鸿、陈思琴、解健芳、李小良、姚文

澜、王加宽、郝有声等对本文中的工作所给予的大力支持.

参考文献

- [1] Barker N S, Reibel G M. Distributed MEMS true-time delay phase shifter and wide-bandswitches. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1998, 46(11): 1881
- [2] Park J H, et al. A micromachined millimeter wave phase shifter using semi-lumped element. *The 11th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*. Munich, Germany, 2001: 10
- [3] Baker N S, Rebeiz G M. Optimization of distributed MEMS phase shifters. *IEEE MTT-S Digest*, 1999: 299
- [4] Xin Peisheng, Ding Ling, Shi Yanling, et al. Application of AlSi alloy membrane in MEMS capacity switch. *Semiconductor Technology*, 2001, 26(12): 75 [忻佩胜, 丁玲, 石艳玲, 等. 铝硅合金膜在 MEMS 电容式开关中的应用. *半导体技术*, 2001, 26(12): 75]
- [5] Jia Ming, Guo Fangmin, Lai Zongsheng, et al. Theoretical study of electrostatic-field-induced bending of membrane in shunt-capacitance MEMS RF switches. *ICSICT-2001 Shanghai*, 2001: 835
- [6] Guo Fangmin, Zhu Shouzheng, Lai Zongsheng, et al. Millimeter wave phase shifters having periodically spaced MEMS bridges. *ICSICT-2001 Shanghai*, 2001: 769
- [7] Zhu Jian, Lin Jinting, Lin Liqiang. DC-20GHz RF MEMS switch. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22: 706
- [8] Shi Yanling, Qing Jian, Xin Peisheng, et al. MEMS phase shifter with AlSi alloy membrane on high-resistivity silicon. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23: 972 (in Chinese) [石艳玲, 卿健, 忻佩胜, 等. 高阻硅基铝硅合金弹性膜 MEMS 移相器. *半导体学报*, 2002, 23: 972]

Study of MEMS RF Switches Array Membrane ——Millimeter Wave Phase Shifter*

Guo Fangmin¹, Zhu Ziqiang¹, Lai Zongsheng¹, Zhu Shouzheng¹, Zhu Rongjin¹, Xin Peisheng¹,
Fan Zhong¹, Jia Ming¹, Cheng Zhiqun² and Yang Genqing²

(1 Department of Electrical Engineering, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

(2 State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: The simple design and fabrication of MEMS millimeter wave phase shifters are presented. They consist of a coplanar wave-guide (CPW) transmission line periodically loaded with 8~ 32 metal bridges, functioning as capacitive switches. Every switching element consists of a thin metallic membrane actuated when being applied bias. Several metallic bridges and shapes are analyzed and calculated by ANSYS software. The experiment results indicate that compared with Al_{0.96}Si_{0.04} alloy gold membrane has better ductility, lower elasticity and higher pulling-down voltage. Remarkable phase shifter performances are observed by Al_{0.96}Si_{0.04} alloy membrane. The phase shifter reaches to 372°/3.5mm under 20V bias at 35GHz, and better phase shifter performance (100°/mm) and with an insertion loss (S_{21}) of about 55~ 90°/dB from 30~ 40GHz. The experimental results also indicate that Al_{0.96}Si_{0.04} alloy has lower actuation voltage (5V) and gold has higher actuation voltage (45V); but the transfers loss of Al_{0.96}Si_{0.04} alloy is higher than that of gold.

Key words: RF MEMS switch; phase shifter; pulling-down voltage; Al_{0.96}Si_{0.04} alloy

EEACC: 2220; 2570

Article ID: 0253-4177(2003)06-0631-06

* Project supported by National Natural Science Foundation of China(No. 69925409), Key Basic Research and Development Program of China (No. G1999033105), AM Foundation of Shanghai (0004) and Shanghai Science & Technology Development Foundation (Nos. 15211066, 012261028)

Guo Fangmin female, senior engineer. She is engaged in design and fabrication of semiconductor devices.

Received 12 July 2002, revised manuscript received 28 October 2002

©2003 The Chinese Institute of Electronics