

高阻硅基铝硅合金弹性膜 MEMS 相移器<sup>\*</sup>

石艳玲 卿 健 忻佩胜 朱自强 赖宗声

(华东师范大学电子科学技术系, 上海 200062)

**摘要:** 级联式 MEMS 相移器可通过悬浮于共平面波导之上的微机械可调电容的变化, 来改变传输线的特性阻抗和相速, 达到相移的目的. 文中讨论了 MEMS 相移器特性对微机械电容和下拉电压的要求, 并通过轻质量的铝硅合金弹性膜, 获得了较低的下拉电压. 测试结果表明, 相移器的下拉电压不大于 40V, 且当控制电压大于 10V 时, 即有明显的相移. 该 MEMS 相移器制备于电阻率大于  $4000 \Omega \cdot \text{cm}$  的高阻硅衬底上, 获得了较好的传输特性, 在整个测试频段  $1 \sim 40 \text{GHz}$ ,  $S_{21}$  均小于 3dB, 并在 25V 时获得了大于 25° 的相移量.

**关键词:** MEMS 相移器; 铝硅合金膜; 高阻硅 (HR-Si); 下拉电压

EEACC: 2220; 2570

中图分类号: TN405

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)09-0972-05

## 1 引言

在无线通信领域中, 迫切需要一些低功耗、超小型化且能与信号处理集成的新型平面结构器件, 相移器正是上述器件之一. 微波相移器在现代雷达和通信系统中有很多用途, 例如相控阵天线有多达几千个单元, 每一个单元都有一个相移器; 在改变电磁波的极化方式和检测系统中也常需要相移器. 因此制备超小型化、低功耗、易于与信号处理电路集成的相移器至关重要.

分布式 MEMS 相移器如图 1 所示. 其设计思想是在共面波导上周期性地放置 MEMS 电容, 这些 MEMS 桥相当于可变的分路电容, 通过在桥上加不同的偏置电压, 改变传输线的分布电容, 引起传输线负载电容值、特性阻抗和相速的变化, 从而引起相移. 近年来, MEMS 技术已在微型传感器、微型执行器等许多领域有了广泛的应用, 因此使得通过 MEMS 技术制备悬浮于共平面波导上方的微机械

可调电容成为可能. 文献[1, 2]报道了中在石英衬底上制备了金属材料弹性膜的相移器, 由于石英衬底的良好绝缘特性, 获得了较好的传输损耗, 但由于金属材料弹性膜厚度较大, 因此相应的下拉电压也较大, 一般为  $40 \sim 70 \text{V}$ .

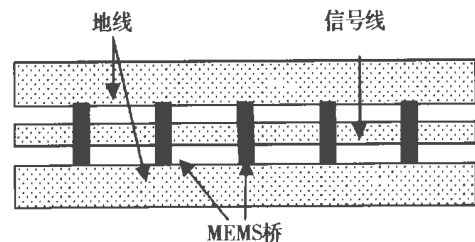


图 1 级联式 MEMS 相移器结构示意图

Fig. 1 Layout of distributed MEMS phase shifter

将传输线直接制备在集成电路使用的硅衬底之上, 其损耗为介质损耗和导体损耗之和, 且根据衬底电阻率不同, 介质损耗也有较大差异. 例如, 在  $30 \text{GHz}$  时, 对  $\rho = 8 \sim 10 \Omega \cdot \text{cm}$  的硅衬底, 约为

\* 国家 973 计划 (No. G1999033105)、国家自然科学基金 (批准号: 69876012)、国家杰出青年基金 (批准号: 69975409)、上海应用材料研究与发展基金 (No. 0103)、上海市重点学科 (No. 012261028) 资助项目

石艳玲 女, 1969 年出生, 副教授, 博士研究生, 研究方向为微机械技术和半导体器件设计与分析.

卿 健 男, 1978 年出生, 硕士研究生, 研究方向为微机械技术和微波系统设计与分析.

忻佩胜 男, 1957 年出生, 工程师, 从事微机械加工技术和半导体器件制备.

2001-12-12 收到, 2002-03-21 定稿

©2002 中国电子学会

18dB/cm, 而对  $\rho=0.3\sim 1\Omega\cdot\text{cm}$  的硅, 则增大到 30~40dB/cm. 因此低阻硅衬底具有极大的介质损耗, 限制了其在微波集成电路领域的应用. 近年来对高阻硅衬底上的微波器件和电路的研究表明, 微波传输和损耗特性有了极大的改善, 这更利于硅单片微波集成电路的研究及应用<sup>[3~5]</sup>. 本文对高阻硅衬底上获得低损耗传输进行了研究, 尝试了采用多种材料制备 MEMS 相移器的弹性膜, 并获得较低的下拉电压.

## 2 微机械单元结构参数的设计

相移器必须具有低损耗, 且其特性阻抗值要与系统相匹配, 以降低反射; 另外可调电容量应尽可能大, 以获得较好的相移效果; 相移器下拉电压则定义为 MEMS 电容处于关态时的外加电压, 外加电压小于下拉电压时可获得不同的相移量, 因此该下拉电压越小越好, 有利于实现相移器与其他微波器件和电路的集成, 扩大其应用领域. 所以对相移器的结构和特性参数进行系统的分析和设计就显得尤为重要.

### 2.1 可调电容

MEMS 单元电容的设计如图 2 所示, 在微机械桥与中心信号线即图 2 所示的上电极和下电极之间加一个下拉电压, 使悬空部分受到静电作用下沉, 从

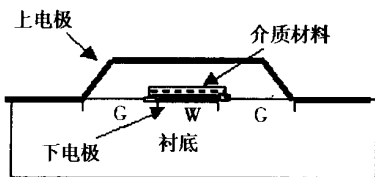


图 2 MEMS 微桥结构

Fig. 2 Micromachined structure

而使 MEMS 电容值从开态  $C_{on}$  变化到关态  $C_{off}$ . 忽略其电阻和漏电导, 设该 MEMS 相移器的桥电容处于开和关态时的特性阻抗分别为  $Z_{in}$ 、 $Z_{id}$ , 由于 MEMS 可获得的最大相移量为<sup>[6]</sup>

$$\Delta\varphi = \frac{wZ_0}{c} \epsilon_r \left( \frac{1}{Z_{in}} - \frac{1}{Z_{id}} \right) \quad (1)$$

其中  $Z_0$  为无负载 CPW 的特性阻抗. MEMS 电容值从开态  $C_{on}$  变化到关态  $C_{off}$  将决定传输线的特性阻抗  $Z_{in}$ 、 $Z_{id}$ , 由此可见较大的  $C_{off}/C_{on}$  比值有利于获得

更宽的相移范围.

用平板电容器模型分析 MEMS 微桥开态和关态的电容量, 当控制电压为零时, “微机械桥(上电极)-空气-介质膜-信号线(下电极)”可调电容处于开态, 因此

$$C_{on} = \frac{1}{\frac{h_d}{\epsilon A} + \frac{h_a}{\epsilon A}} \quad (2)$$

其中  $\epsilon$ 、 $\epsilon$  分别为介质材料和空气的介电常数;  $h_d$ 、 $h_a$  分别为介质薄膜的厚度和空气腔的高度;  $A$  为上下电极的交叠区域面积. 当下拉电压足够大, 使上电极下拉至与介质薄膜紧密接触时, 可调电容处于关态, 则有

$$C_{off} = \frac{\epsilon A}{h_d} \quad (3)$$

由上述公式可以看到, 空气腔的高度  $h_a$  越大、介质薄膜  $h_d$  越小、 $\epsilon$  越大, 越有利于获得高的  $C_{off}/C_{on}$  比值, 从而增强相移效果. 选择典型的结构和制备工艺参数  $h_d = 0.3\ \mu\text{m}$ ,  $h_a = 3\ \mu\text{m}$ ,  $A = 50\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$ ,  $\epsilon = 7.5$  ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), 计算可得  $C_{on} = 7\ \text{fF}$ ,  $C_{off} = 0.67\ \text{pF}$ ,  $C_{off}/C_{on} \approx 100$ .

### 2.2 下拉电压

分析 MEMS 相移器的工作原理可以看到, 悬空弹性膜既是控制电压的上电极又作为执行开关的动作机构, 因此要求其具有良好的导电性、良好的机械弹性和适度的刚性, 因此弹性薄膜材料的选取影响器件的下拉电压和长期工作的可靠性.

从理论上对单元结构的下拉电压进行计算, MEMS 结构上的静电力  $F$  取决于上下电极之间所加的电压.

$$F = \frac{\epsilon W w}{2g} V_{\text{bias}}^2 \quad (N) \quad (4)$$

其中  $W$  为下电极宽度;  $w$  为上电极宽度;  $g$  为上电极的高度;  $V_{\text{bias}}$  为外加控制电压. 从微结构的静电力和恢复力之间的力平衡方程可得 MEMS 桥的下拉电压为<sup>[6]</sup>

$$V_p = \frac{\sqrt{8k}}{27 \epsilon W w g^3} \quad (V) \quad (5)$$

由上式可知, 上电极材料的弹性常数  $k$  越大、微结构高度  $g$  越小、微结构受力面积越大, 越有利于减小微结构的工作电压.

实验中, 我们用纯铝、纯金、含钛 1% 的铝钛合金, 以及含硅 4% 的铝硅合金等四种材料分别制备

了弹性膜,结果表明厚度较薄的 Al、Au、AlTi 膜刚度较差,极易引起多次开关后的失效,增加薄膜厚度则提高了器件的下拉电压.而  $\text{Al}_{0.96}\text{Si}_{0.04}$  合金的弹性系数大于纯铝膜的弹性系数,这有利于在提高开关的可靠性同时获得较低的下拉电压.

铝硅合金材料的杨氏模量与纯铝的杨氏模量有所不同.对于  $\text{Al}_x\text{Si}_{1-x}$ ,假设其杨氏模量与 Si 含量成线性关系即:  $E = E_{\text{Al}x} + E_{\text{Si}}(1-x)$ ,计算出其弹性系数,可对 AlSi 合金弹性膜的下拉电压做近似分析.

综合上述分析可见,微结构开态的高度越大越有利于提高电容比值,但为了保证上电极材料对台阶的良好覆盖,其厚度  $t$  必须相应增加,从而导致  $k$  增加,下拉电压也增大,因此实际工艺参数的选取必须在微结构高度和上电极厚度两者之间折中选取.选用  $\text{Al}_{0.96}\text{Si}_{0.04}$  合金做上电极材料,我们得到了两种结构的下拉电压  $V_p$  理论值和测试结果,如表 1 所示.

表 1  $\text{Al}_{0.96}\text{Si}_{0.04}$  合金弹性膜微结构的下拉电压

Table 1 Pull-down voltage of MEMS structure with  $\text{Al}_{0.96}\text{Si}_{0.04}$  alloy membrane

样品 A			样品 B		
$g=3\ \mu\text{m}, t=1.5\ \mu\text{m}$			$g=1.5\ \mu\text{m}, t=0.7\ \mu\text{m}$		
$k/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$V_p/\text{V}$ 理论值	$V_p/\text{V}$ 测试值	$k/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$V_p/\text{V}$ 理论值	$V_p/\text{V}$ 测试值
74.1	105	110	22.2	34	36

由表 1 可以看到,理论值和实际值符合得较好,其中的偏差可能由  $\text{Al}_{0.96}\text{Si}_{0.04}$  杨氏模量的计算误差引起.

### 3 MEMS 相移器性能的测试和分析

本文设计的相移器由制备在高阻硅衬底上的一根  $4\ \text{mm}$  长的共面波导组成,其上方周期性地加载有 6 个 MEMS 电容.为降低导体损耗,传输线采用电镀工艺制备  $1.5\ \mu\text{m}$  的 Ti/Au,信号线宽度和信号与地线之间的间距分别为  $80\ \mu\text{m}$  和  $51\ \mu\text{m}$ ,然后采用 PECVD 淀积介质薄膜 SiN,厚度约为  $200\ \text{nm}$ .用于形成微结构的牺牲层采用聚酰亚胺实现,厚度为  $1.5\ \mu\text{m}$ ,其后形成 MEMS 相移器的铝硅合金上电极,厚度为  $0.7\ \mu\text{m}$ ,如表 1 中样品 B 所示,制备样品的 SEM 照片如图 3 所示.

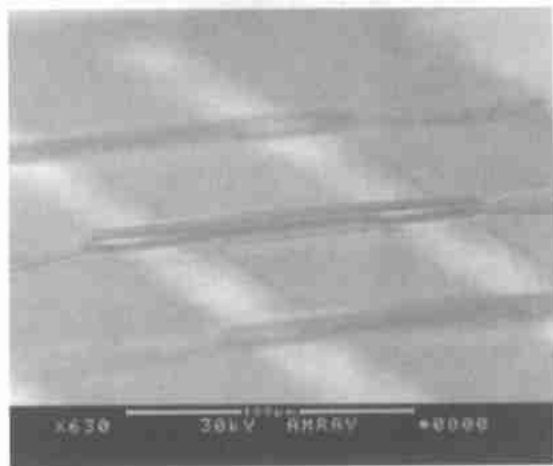


图 3 MEMS 相移器微桥结构的 SEM 照片

Fig. 3 SEM image of MEMS phase shifter

在 HP8722D 矢量网络分析仪上对样品 B 进行了散射参数测试.图 4 给出了整个测试频段的  $S$  参数值.可以看到在整个频段范围  $S_{21}$  均小于  $3\ \text{dB}$ ,这表明硅衬底的电阻率大于  $4000\ \Omega\cdot\text{cm}$  时衬底材料的介质损耗较低阻硅大幅度降低,该特性为硅单片微波集成电路的发展提供了广阔的空间,而反射系数  $S_{11}$  则基本均大于  $10\ \text{dB}$ .

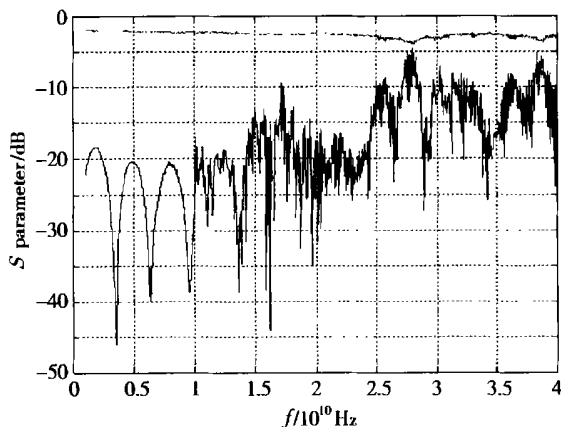


图 4 MEMS 相移器的  $S$  参数测试结果

Fig. 4  $S$  parameters of MEMS phase shifter

外加控制电压为  $25\ \text{V}$  时,样品 B 的相移量随频率变化的测量结果如图 5 所示.可以看到,测量中的  $30\sim 40\ \text{GHz}$  高频段,相移量较明显,约大于  $25^\circ$ ;这与公式(1)中的变化关系相吻合.而小于  $25\ \text{GHz}$  时,相移量只有  $5^\circ$  左右.为进一步了解控制电压变化对相移量的影响,在测试时分别对  $15\ \text{V}$  和  $25\ \text{V}$  控制电压下的样品进行了测试,图 6 给出测量结果,从图中可见,两种电压下的相移量之差约为  $10^\circ$ .

对样品 A, 实现相移的控制电压较高 ( $> 100\text{V}$ ), 受测试设备(矢量网络分析仪)的限制, 没有进行  $S$  参数的测试和分析.

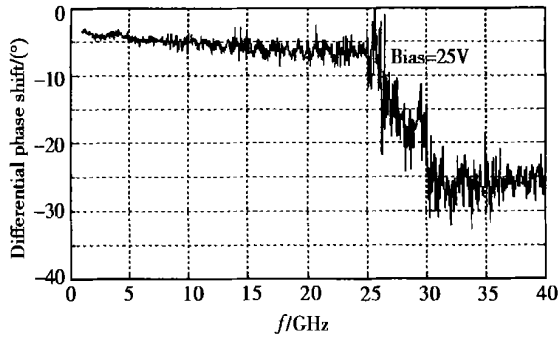


图 5 MEMS 相移器的相移量与测试频率的关系

Fig. 5 Variation of phase shift with frequency

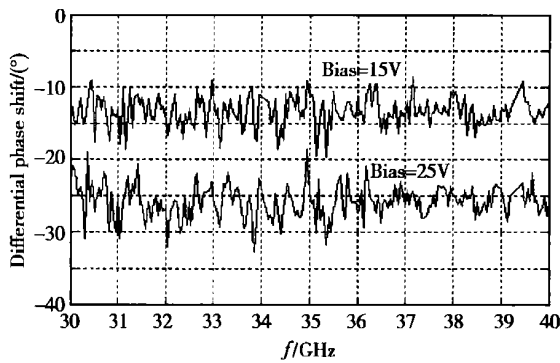


图 6 MEMS 相移器的相移量与外加电压的关系

Fig. 6 Variation of phase shift with the pull-down voltage

硅弹性膜 MEMS 相移器, 微机械电容的设计和下拉电压的调整是考虑的重点, 由于采用了轻质量的  $\text{Al}_{0.96}\text{Si}_{0.04}$  合金膜获得了较好的薄膜弹性度和较低下拉电压的特性. 高阻硅衬底的使用使得插入损耗在整个频段  $1\sim 40\text{GHz}$  均小于  $3\text{dB}$ , 该特性参数值也使得硅基微波器件和电路的应用成为可能. 由于设计版图时, 设计的分布式微机械桥结构数量较少, 获得的相移量总体较小. 因此进一步减小小传输线的插入损耗, 降低下拉电压并提高相移量成为下一步研究的重点.

## 参考文献

- [ 1 ] Borgioli A, et al. Low-loss distributed MEMS phase shifter. IEEE Microwave Guided Wave Lett, 2000, 10( 1 ): 7
- [ 2 ] Hayden J S, et al. Low-loss cascaded MEMS distributed X-Band phase shifters. IEEE Microwave Guided Wave Lett, 2000, 10: 142
- [ 3 ] Wu Yunhong, et al.  $\text{SiO}_2$  interface layer effects on microwave loss of high-resistivity CPW line. IEEE Microwave Guided Wave Lett, 1999, 9( 1 ): 10
- [ 4 ] Gamble H S, et al. Low-loss CPW line on surface stabilized high-resistivity silicon. IEEE Microwave Guided Wave Lett, 1999, 9( 10 ): 395
- [ 5 ] Nguyen C T, et al. Micromachined devices for wireless communications. Proc IEEE, 1998, 86: 1756
- [ 6 ] Scott B N et al. Distributed MEMS true-time delay phase shifters and wide-band switches. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1998, 46( 11 ): 1881

## 4 结论

本文主要分析、制备并测试了基于高阻硅的铝

# MEMS Phase Shifter with AlSi Alloy Membrane on High-Resistivity Silicon<sup>\*</sup>

Shi Yanling, Qing Jian, Xin Peisheng, Zhu Ziqiang and Lai Zongsheng

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

**Abstract:** The design and fabrication of low-loss distributed MEMS phase shifter are presented. The principle for this phase shifter is that the phase velocity can be varied by mean of snapping down the membrane of MEMS loading capacitors of the transmission line. Its MEMS capacitors and control voltage are discussed in detail. Several different membranes are used as the membranes and  $\text{Al}_{0.96}\text{Si}_{0.04}$  alloy shows the best performance with pulling-down voltage of the MEMS phase shifter no more than 40V. There is a phase shift when the control voltage is only 10V. With the phase shifter fabricated on the high-resistivity silicon ( $\rho > 4000 \Omega \cdot \text{cm}$ ), the insert loss is very low, no more than 3dB from 1GHz to 40GHz. The phase shift will be more than 25° at 25V.

**Key words:** MEMS phase shifter; AlSi alloy membrane; high-resistivity silicon (HR-Si); pull-down voltage

**EEACC:** 2220; 2570

**Article ID:** 0253-4177(2002)09-0972-05

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National 973 Project (Grant No. G1999033105), National Natural Science Foundation of China (Nos. 69876012, 69975409), Shanghai AM Foundation, and Shanghai Key Subject

Shi Yanling female, was born in 1969, PhD candidate. Her research interests include MEMS technology, designing and analysis of semiconductor devices.

Qing Jian male, was born in 1978, master candidate. His research interests include MEMS technology and designing of microwave system.

Xin Peisheng male, was born in 1957. His research interests include MEMS technology and devices fabrications.

Received 12 December 2001, revised manuscript received 21 March 2002

©2002 The Chinese Institute of Electronics

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>