

# 低电压驱动的硅基 Ka 波段级联式 MEMS 移相器

石艳玲, 卿 健, 李 炜, 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:** 通过在共平面波导上周期性地分布微机械电容, 外加电压驱动改变电容值, 可实现级联式 MEMS 移相器. 本文讨论了优化移相特性对共平面波导特性阻抗及下拉电压的要求, 通过工艺参数优化制备了高阻硅基上的 Ka 波段级联式 MEMS 移相器, 测试结果表明制备器件具有较低的驱动电压, 8V 时即产生明显的相移量, 在 36GHz 处 15V 驱动电压时相移量为 118°, 25V 时为 286°. 对微结构弹性膜的机械振动寿命测试表明, 13 级级联的 MEMS 移相器所有弹性膜同步振动的寿命为  $3 \times 10^6$  次. 为器件的实用化提供了重要保障.

**关键词:** 微机械移相器; 高阻硅; 驱动电压; 振动寿命

**中图分类号:** TN405 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12-1914-03

## MEMS Distributed Phase Shifter on High Resistivity Silicon with Low Pull Down Voltage

SHI Yanling, QING Jian, LI Wei, XIN Peisheng, ZHU Ziqiang, LAI Zongsheng

(Department of E. E., East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** The distributed phase shifters consist of a coplanar waveguide transmission line loaded periodically with MEMS capacitors, which provide variable phase shift through voltage control of the MEMS capacitors. In this paper, the requirements of the unloaded line impedance and pull down voltage for the phase shifter are discussed. To improve the performance in transmission loss, the varieties of the line section where the MEMS capacitor is loaded are analyzed and calculated. The Ka band distributed MEMS phase shifters are fabricated on the high resistivity silicon substrate by using optimum parameters. The measured results demonstrate a low actuation voltage, producing an obvious phase shift at 8V bias, and a pull down voltage never more than 25V. Here, a phase shift of 286° at 36 GHz is achieved. Lifetimes of  $3 \times 10^6$  cycles have been obtained for all elastic membranes as far as the phase shifter composed of 16 MEMS bridges is concerned. These offer an important guarantee for practical application of the devices.

**Key words:** MEMS phase shifter; high resistivity silicon; pull down voltage; lifetime

### 1 引言

10GHz 以上宽频带微波硅基器件主要应用于天基雷达、卫星通信等系统, 其中微波移相器有很多用途, 例如相控阵天线有多达几千个单元, 每一个单元都有一个独立的相移控制器. 射频/微波 MEMS 移相器一般采用微机械加工技术实现, 与传统的 PIN 管或 FET 移相器相比, 具有损耗小、驱动功率小 (LW 级) 且易于与信号处理电路集成的优势.

将 MEMS 技术应用于射频/微波移相的级联式结构<sup>[1]</sup>如图 1 所示, 设计思想基于在共平面波导上周期性的配置高电容比率的 MEMS 电容, 通过在线上加一个偏压, 可以改变分布式电容, 引起传输特性阻抗及相速的变化, 达到移相目的. MEMS 移相器的研究者众多, 工作频段可以从几个 GHz 直到数百 GHz, 密西根大学 Joseph S. Hauden 等人<sup>[2]</sup>在石英衬底上实现 2 位 Ka 波段分布式移相器, 其反射系数优于 -11.5dB,

平均插入损耗为 -1.5 dB, 在 37.7GHz 处可以得到 89°、180°和 270°的相移量, 下拉电压 20V, 响应时间 9ns, 这是目前在 Ka 波段获得最低损耗的移相器.

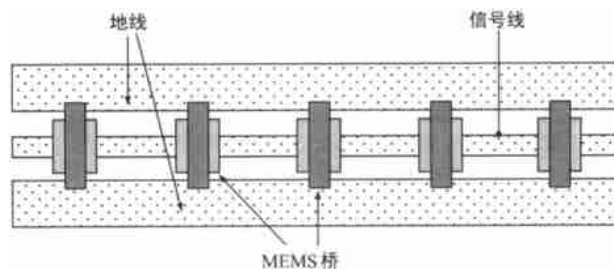


图 1 级联式 MEMS 移相器结构

本文在前期工作<sup>[3]</sup>的基础上, 分析了微波传输特性及移相特性对共平面波导特性阻抗的要求, 讨论了弹性膜材料选

收稿日期: 2003-02-20; 修回日期: 2003-06-03

基金项目: 国家 973 项目集成微光机电系统研究 (No. G1999033105); 国家自然科学基金 (No. 69876012); 国家杰出青年基金 (No. 69975409); 上海应用材料研究与发展基金 (No. 0103); 上海市重点学科项目 (No. 012261028)

取对获得低驱动电压和良好机械性能的重要性,并实现了性能良好的高阻硅基微机械移相器,并首次对 13 级级联微桥结构同步振动做了测试.

2 MEMS 移相器参数设计

2.1.1 传输线特性阻抗设计

假设 MEMS 移相器上分布一个 MEMS 桥只相当于并联一个电容  $C_b$ , 则有负载时共平面波导的特性阻抗和相速度应分别表示为:

$$Z_l = \frac{\sqrt{L_t}}{\sqrt{C_t + C_b/s}} \tag{1}$$

$$v_l = \frac{1}{L_t(C_t + C_b/s)} \tag{2}$$

式中  $L_t$ 、 $C_t$  是无负载传输线的分布电感和电容,  $s$  是 MEMS 桥周期性分布间距,  $C_b/s$  是传输线上 MEMS 分布电容的大小.

从上式可以看出,容性周期加载传输线的相速度、特性阻抗计算公式和普通传输线的计算公式一样,只是在单位长度的并联电容中加上了周期性微结构引入的 MEMS 等效电容,可以看成是一段每单位长度并联电容为  $C_t + C_b/s$  的光滑传输线.如式(1)所示,由于加载电容的引入,将导致传输线特性阻抗下降,使得阻抗失配,损耗增大.因此为了使得加载线阻抗接近 50 $\Omega$ ,版图设计时对加载有 MEMS 桥处的传输线部分结构参数进行了特殊考虑,将这些节点设计为较高阻抗(>60 $\Omega$ )的 CPW 传输线,如图 2 所示.

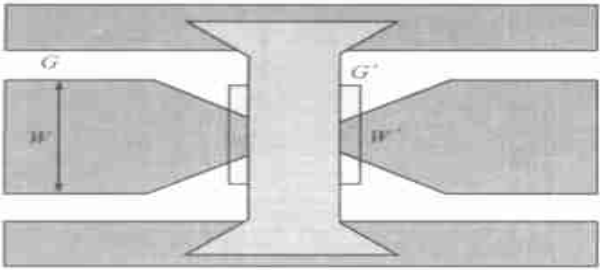


图2 加载 MEMS 桥处传输线结构的变化

这样,外加不同驱动电压时,较高阻抗的传输线部分加载上可变 MEMS 电容后,其特性阻抗下降,接近 50 $\Omega$ .同时,由于 CPW 信号线尺寸的缩小,也会引起 MEMS 电容的减小,从而减小了电容变化对传输线阻抗的影响,有利于减小反射损耗.基于此思想,在版图设计时中,将硅基 MEMS 移相器的传输线未加载及加载部分的结构参数设计值如表 1 所示.

表 1 MEMS 移相器特性阻抗的设计

	信号线宽度(Lm)	信号线与地线 间间距(Lm)	特性阻抗( $\Omega$ )
未加载部分	$W=100$	$G=66$	$Z_0=50$
加载部分	$W'=70$	$G'=81$	$Z_0=60$

2.1.2 下拉电压

通过求解 MEMS 桥的静电驱动力和弹性恢复力之间的力平衡方程,可得该微结构的下拉电压  $V_p^{[4]}$ .其中  $g_0$  为零偏置

时的桥高,  $W$  为桥的下电极宽度,  $w$  为上电极宽度,  $k$  为弹性膜的弹性系数.

$$V_p = \sqrt{\frac{8k}{27E_0 W w^3 g_0^3}} \tag{3}$$

表 2 中给出采用不同工艺参数得到的三种样品,可以看到厚度为 0.5 $\mu m$  的  $Al_{0.96}Si_{0.04}$  合金为弹性膜,3 $\mu m$  的厚胶做牺牲层的 C 组样品获得了最低的下拉电压,且微结构高度适中,相移特性较理想,外加偏置电压约 8V 时,样品 C 即有明显相移.

表 2 不同工艺参数的  $Al_{0.96}Si_{0.04}$  弹性膜结构的下拉电压

样品 A			样品 B			样品 C		
$g_0=3\mu m, t=1.5\mu m$			$g_0=1.5\mu m, t=0.7\mu m$			$g_0=3\mu m, t=0.5\mu m$		
k	$V_p(V)$	$V_p(V)$	k	$V_p(V)$	$V_p(V)$	k	$V_p(V)$	$V_p(V)$
(N/m)	理论值	测试值	(N/m)	理论值	测试值	(N/m)	理论值	测试值
74.1	105	110	22.2	34	36	2.72	22.6	25

3 制备工艺流程

实验中选择高阻硅( $>4000\Omega\cdot cm$ )为衬底材料,热氧化后蒸发/电镀 Ti/Au,厚度约 1.5 $\mu m$ ,然后 PECVD 淀积 SiN,涂厚胶作牺牲层,厚度为 3 $\mu m$ ,最后蒸发约 0.5 $\mu m$  的 AlSi 合金膜,形成 MEMS 移相器上电极.共平面波导长 7.56mm,上方周期性地加载有 13 个 MEMS 电容.实验获得的级联式 MEMS 移相器的 SEM 照片如图 3 所示.

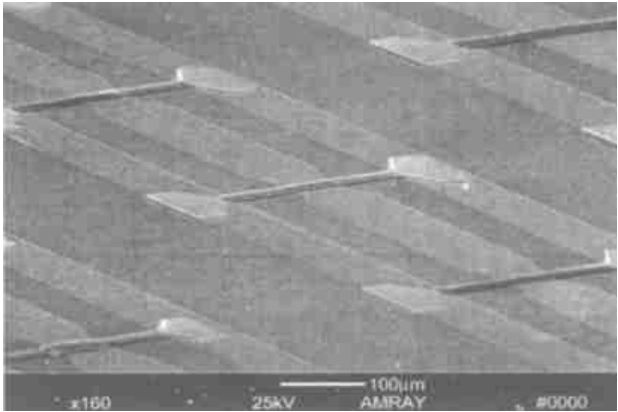


图 3 级联式 MEMS 移相器 SEM 照片

4 参数测试及分析

利用 HP8722D 矢量网络分析仪上从 1~40GHz 对样品 C 进行了散射参数测试,结果如图 4 所示,整个测试频段内  $S_{21}$  小于 3dB,  $S_{11}$  基本均大于 10dB,这些特性参数值使得硅基微波器件和电路的应用成为可能.由于周期性加载结构的引入导致  $S_{11}$  呈现出高低起伏变化,在图 4 中表现为高于 25GHz 有少数频点  $S_{11}$  值小于 10dB.

该 MEMS 移相器的工作频段设定为 Ka 波段,因此对上述样品 C 在 30~40GHz 频段处进行了详细的 S 参数测量,外加控制电压从 0V 变化到 30V,计算得到相移量的变化如图 5 所示.测试结果表明制备器件具有较低的驱动电压,8V 时即出

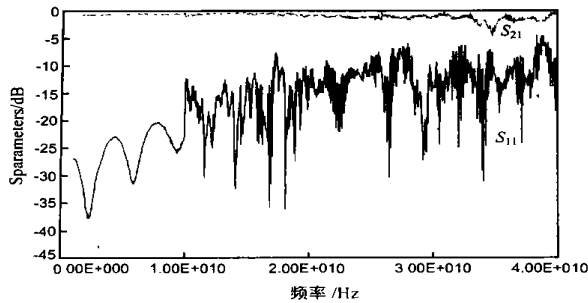


图4 MEMS 移相器的 S 参数测试值

现明显相移,随着电压增加,频率升高,相移量逐渐增大,在 36GHz 处 15V 驱动电压时相移量为 118°, 25V 时相移量为 28°, 而 30V 驱动时的相移曲线基本与 25V 偏压时重合,据此确定制备器件的下拉电压约为 25V。

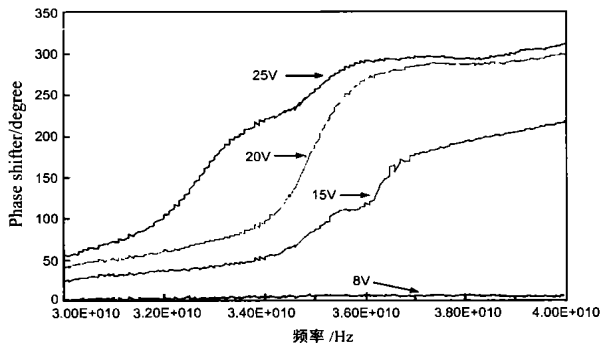


图5 不同驱动下 Ka 波段 MEMS 移相器的相移量

## 5 机械振动寿命实验

MEMS 结构不同,寿命也不同,一般报道值约在  $10^5$  次~ $318 \times 10^{10}$  次之间。

实验中也对制备样品 C 的微结构振动寿命进行了初步测试。外加驱动电压为 10V,信号频率为 4Hz,当样品振动  $3 \times 10^6$  次时,传输线上所有 13 个 MEMS 微结构仍保持振动的同步,但继续实验到振动次数增大到约  $3.1 \times 10^6$  次时,出现个别微结构振动的不同步,一直到信号驱动约  $7.0 \times 10^6$  次,整个移相器上所有微结构全部停止振动。据此,初步确定样品 C 的振动寿命为  $3.0 \times 10^6$  次。该数值与报道的单个 MEMS 开关寿命相接近,基本能够满足实际使用要求,表明选择厚度适当的 AlSi 合金膜不仅有利于获得较低的驱动电压,且能改善微结构机械特性。

## 6 结论

MEMS 移相器以其损耗低、驱动功率小且易于集成的特点受到人们的极大关注。本实验采用高阻硅做衬底,并对弹性膜材料、薄膜厚度及牺牲层厚度等工艺参数做优化,制备的 Ka 波段级联式 MEMS 移相器具有较低的驱动电压,同时 AlSi 合金弹性膜的选取有利于获得优越的机械寿命。因此多个级联式 MEMS 桥制备均匀性对提高器件综合性能至关重要。

## 参考文献:

- [1] Joseph S. Hayden et al. Low-loss cascaded MEMS distributed phase shifters [J]. IEEE Microwave Guided Wave Lett., 2000, 10(4): 142-144.
- [2] H2T Kim, JH Park, Y2K Park, Y Kwon. V2band low-loss and low-voltage distributed MEMS digital phase shifter using metal-air metal capacitors [A]. IEEE MTTS Digest [C]. Seattle, WA: IEEE, 2002. 341-344.
- [3] 石艳玲,朱自强,赖宗声,等.高阻硅基铝硅合金 MEMS 移相器 [J]. 半导体学报, 2002, 9: 972-975.
- [4] N Scott Barker, et al. Distributed MEMS true-time delay phase shifters and wideband switches [J]. IEEE Transactions on MTT, 1998, 46 (11): 1881-1889.
- [5] C Goldsmith, J Ehnke et al. Lifetime characterization of capacitive RF MEMS switches [A]. IEEE MTTS Digest [C]. Seattle, WA: IEEE, 2001. 227-230.

## 作者简介:



石艳玲 女, 1969 年 2 月出生于中国河北省, 博士, 华东师范大学信息学院副教授, 研究方向为射频硅基 MEMS 器件及电路, 集成电路工艺技术。  
Email: yishi@ee.ecnu.edu.cn



卿健 男, 1979 年 6 月出生于中国上海, 现为华东师范大学硕士研究生, 研究方向为 RF MEMS 器件及射频集成电路设计。

## 更正

2003 年 5 月《电子学报》第 9 期第 1367 页倒数第 3 行第 23 个字“哈 0”应改为“合 0”, 将此更正。