

文章编号: 1672-2892(2011)03-0384-04

## 交直流隔离的分布式 MEMS 移相器设计

贾小慧<sup>1,2</sup>, 高杨<sup>2\*</sup>, 郑英彬<sup>2</sup>, 柏鹭<sup>1</sup>

(1.西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010; 2.中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 设计了一种五位分布式微电子机械系统(MEMS)移相器, 通过分析对比传统分布式 MEMS 移相器加载直流偏置的两种方式, 提出了一种新的直流偏置的加载方式, 能解决传统方式带来的交直流干扰和引线繁杂问题, 同时工艺容易实现。采用 ADS 软件对移相器进行级联仿真, 优化了微波性能参数, 仿真得出移相器在 35 GHz 时移相精确度小于 3°, 移相器的插入损耗小于 0.5 dB, 回波损耗大于 23 dB。给出了五位分布式 MEMS 移相器的工艺流程, 同时验证了所设计加载直流偏置方式工艺简单的优势。

**关键词:** 微电子机械系统; 分布式移相器; 工艺; 直流偏置

**中图分类号:** TN623; TN304

**文献标识码:** A

## Design for an AC-DC isolated distributed MEMS phase shifter

JIA Xiao-hui<sup>1,2</sup>, GAO Yang<sup>2\*</sup>, ZHENG Ying-bin<sup>2</sup>, BAI Lu<sup>1</sup>

(1.School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China;

2.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

**Abstract:** A 5-bit distributed Micro Electro Mechanical System(MEMS) phase shifter is designed. Based on the analysis of two different loading DC bias ways of traditional distributed MEMS phase shifter, a new loading DC bias method is put forward to resolve the problems in traditional way. The new method with simple process can separate AC and DC and avoid the complexity of wiring. Phase shifter's microwave performance parameters are obtained and optimized through software ADS. Simulation results show that the phase shifter's phase error is less than 3°, the insertion loss less than 0.5 dB, and the return loss more than 23 dB at 35 GHz. The performance has met the requirements. The process flow of five-bit distributed MEMS phase shifter is introduced, the advantages of simple process for the new loading DC bias method is verified.

**Key words:** Micro Electro Mechanical System; distributed MEMS phase shifter; process; DC bias

近年来, MEMS 移相器在卫星通信和导航、雷达探测领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。与传统的铁氧体移相器、PIN 管和 FET 移相器相比, 具有插损小、功耗低、体积小、成本低和易于集成的优势。分布式 MEMS 传输线(Distributed MEMS Transmission Line, DMTL)移相器具有宽带、容易加工的特点, 成为 RF MEMS 领域研究热点。直流偏置是 DMTL 移相器的重要组成部分, 对工艺和性能都有很大影响。传统上有 2 种设计方法, 一是将偏置电压直接加载到共面波导的信号线上, 交直流共用一个电极<sup>[2]</sup>, 位与位之间使用隔直电容<sup>[3]</sup>; 二是在 MEMS 桥底电极两边使用 2 个单独的驱动电极, 需要先断开共面波导的地线引出直流偏置线, 然后通过空气桥将断开的地线连接<sup>[4]</sup>。这 2 种方式会分别带来交直流干扰和偏置引线繁杂的问题, 后一种方式对共面波导(Coplanar Waveguide, CPW)的特征阻抗也有影响。本文介绍了一种新型的直流偏置线的设计方法, 在解决交直流隔离的同时工艺实现容易, 并且给出了工艺流程。通过结构设计和 ADS 仿真优化, 设计出的移相器表现出良好的微波性能。

### 1 工作原理

DMTL 移相器基本工作原理是在共面波导传输线上周期加载 MEMS 金属桥, 通过在 MEMS 桥和传输线之间

收稿日期: 2010-09-14; 修回日期: 2010-11-07

基金项目: 中国工程物理研究院科技发展基金重点课题资助(2008A0403016, 2010A0302013)

\* 通信作者: 高杨 email: gaoyang@caep.ac.cn

施加电压来改变 MEMS 桥的高度,使 MEMS 桥与传输线之间的电容以及传输信号的传播常数发生变化,从而可以改变入射波相移<sup>[5]</sup>。典型的 DMTL 移相器如图 1 所示。通过在底部电极沉积氮化硅绝缘介质层,可以提高移相器单位长度的相移量。

## 2 结构设计

结构设计除了考虑各部分的参数和偏置线的设计,还要考虑位与位的布局。直流偏置是分布式 MEMS 移相器的重要部分,直接影响最后的移相性能。

### 2.1 总体结构设计

五位 DMTL 移相器结构如图 2 所示,由 5 个基本相移位级联构成,分别是:11.25°位、22.5°位、45°位、90°位和 180°位。五位移相器以 11.25°为步进,最终可实现 32 个相移态。考虑到 11.25°位使用频率最高,设计在中间的位置。

选择高阻硅做衬底,介电常数为 11.9,厚为  $h=500\ \mu\text{m}$ 。根据移相器的性能指标要求,经过理论计算,初步选取金属桥之间的周期间距  $s=781\ \mu\text{m}$ ,CPW 传输线信号线宽  $W=143\ \mu\text{m}$ ,间距  $G=80\ \mu\text{m}$ 。MEMS 金属桥的宽度为  $w=30\ \mu\text{m}$ ,高度  $h=2\ \mu\text{m}$ , $t=1\ \mu\text{m}$ 。

### 2.2 直流偏置结构设计

分布式移相器每一位使用高阻线加入偏置电压单独偏置,为了解决传统方式带来的交直流隔离和引线繁杂问题,采用一种新的偏置线设计方法,其结构示意图如图 2 所示,剖视图如图 3 所示。首先在 CPW 传输线的地线上生长一层氮化硅绝缘介质层,隔离偏置线和地线。偏置线设计在绝缘介质层之上,与桥的锚点相连接。当偏置线上加载直流偏置电压,微桥下拉,从而实现移相器的移相。这种方式直接在地线上生长绝缘层后,刻蚀出偏置线即可,引线方便,加工工艺容易实现。

图 3 中 DMTL 移相器示意图(a)和(b)都代表了这种新的设计方式,在工艺实现时有区别。图 3(a)中锚点和偏置线是左右接触,工艺实现时两者没有先后顺序。图 3(b)中偏置线和锚点上下接触,加工时先刻蚀偏置线,然后加工锚点。具体哪种接触方式粘性更好,对桥梁性能是否有影响,有待加工后通过测试去验证。

## 3 微波性能分析

### 3.1 电磁仿真模型

为了得出移相器的微波性能参数,需要研究移相器的等效电路<sup>[6]</sup>。分布式移相器是通过周期加载金属桥构成,桥的结构一致,所以以单个微桥为对象分析。

单个微桥的等效电路如图 4 所示。单个微桥结构可以看作一个并联电容式开关,电路模型由 2 部分组成:一是传输线模型,二是桥的集总 CLR 模型。在 CLR 模型中,电容值随着开关状态的不同(up 和 down 态)而不同,传输线部分长度为  $(w/2)+s$ , $s$  为微桥的周期间距。up 态下首先在 HFSS 里仿真测出  $S_{11}$  参数,然后用测出的  $S_{11}$  参数值来拟合 up 态下的电容,电感和电阻值可以忽略。down 态时将 CLR 模型与 HFSS 仿真出的  $S_{21}$  数据拟合,得出

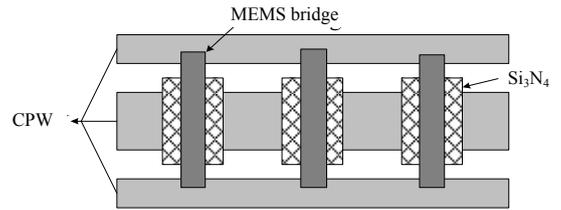


Fig.1 Typical structure diagram of DMTL phase shifter  
图 1 典型分布式 MEMS 传输线移相器结构图

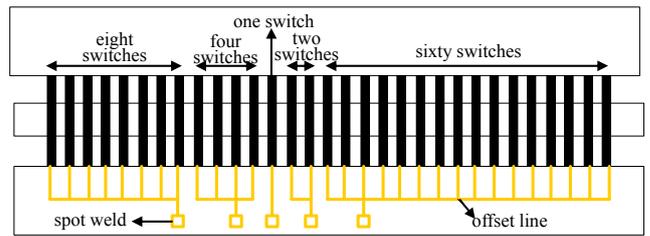


Fig.2 Structure diagram of 5-bit DMTL phase shifter  
图 2 五位 DMTL 移相器的结构示意图

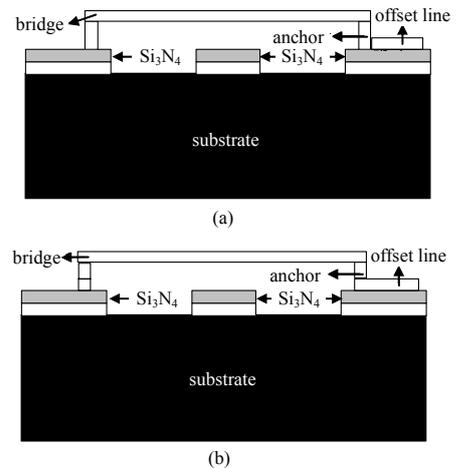


Fig.3 Structure diagram of DMTL phase shifter  
图 3 DMTL 移相器示意图

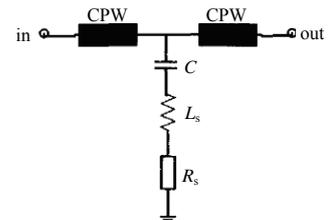


Fig.4 Equivalent circuit model of single micro-bridge  
图 4 单个微桥的等效电路模型

电感值和电容值, down 态下 MEMS 梁的串联电阻能很好地从 LC 谐振频率附近的  $S$  参数提取。最后得出电容值分别为  $C_u=10.8$  fF,  $C_d=45.8$  fF, 电感  $L=51$  pH,  $R=0.07$   $\Omega$ 。

### 3.2 仿真结果与讨论

采用 ADS 仿真, 首先根据单个微桥的电路模型和拟合 CLR 参数得出 5 个基本移相位的电路, 仿真得出 5 个基本移相位的  $S$  参数和相移。如果微波参数没有达到移相器的性能指标, 需对电路参数作调整后再仿真分析, 然后对 5 个位级联仿真, 得出 32 个相移状态的微波参数。级联后仿真得出的微波参数会有变化, 并不是理想的叠加, 需要调整优化电路参数, 对传输线多次取值分析, 得出最优结果。经过优化, 移相器结构参数为: 金属桥之间的周期间距  $s=322$   $\mu\text{m}$ , CPW 传输线信号线宽  $W=140$   $\mu\text{m}$ , 间距  $G=100$   $\mu\text{m}$ 。MEMS 金属桥的宽度为  $w=30$   $\mu\text{m}$ , 高度  $h=1.7$   $\mu\text{m}$ ,  $t=1$   $\mu\text{m}$ 。

图 5 是仿真得出的五位 DMTL 移相器的主要性能参数。从仿真结果可看出: 在 45 GHz 以下, 移相器的插入损耗均小于 0.5 dB, 回波损耗大于 23 dB; 移相器在 34 GHz~38 GHz 的相移保持了很好的线性, 相移误差在中心频率 35 GHz 处为  $-2^\circ\sim+3^\circ$ 。

## 4 工艺设计

工艺设计时应考虑到每一层的对称、平整性以及表面微加工工艺的特点, 层数不宜过多。分布式 MEMS 移相器加工工艺最关键的问题是制备可动的 MEMS 微桥结构, 整个结构是由 CPW 传输线上的 32 个微桥级联构成的。为实现微桥结构, 以 500  $\mu\text{m}$  厚的高阻硅作为衬底材料, 采用表面微机械加工技术加工<sup>[7]</sup>。这里只给出 MEMS 移相器 1 个单元结构的工艺流程图, 如图 6 所示。

1) 清洗硅片表面, 去除各种无机杂质和有机物等污渍, 防止器件电性能受到影响, 可提高器件可靠性、稳定性和成品率<sup>[8]</sup>。如图 6(a)所示。

2) 生长  $\text{SiO}_2$  氧化层。采用等离子增强的化学蒸发沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)工艺在高阻硅衬底上生长 1 层 1  $\mu\text{m}$  厚的  $\text{SiO}_2$  缓冲层(如图 6(b)), 目的是降低衬底损耗和寄生电容, 同时也为了防止在接下来工艺中淀积的金属层脱落, 从而达到弥补衬底材料和金属层之间的热膨胀系数不匹配。

3) 传输线的形成。首先溅射 Cr/Au。在  $\text{SiO}_2$  层上溅射一层 1  $\mu\text{m}$  厚的 Cr/Au 金属层(如图 6(c))。先光刻出传输线的图形; 再采用 Au 腐蚀液腐蚀 Au; 采用 Cr 腐蚀液腐蚀 Cr; 最后去胶形成传输线的图形(如图 6(d))<sup>[9]</sup>。

4) 制备氮化硅绝缘介质层。采用 PECVD 工艺淀积 0.2  $\mu\text{m}$  厚的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  电介质层(如图 6(e)), 并采用反应离子刻蚀(Reactive Ion Etching, RIE)工艺刻蚀  $\text{Si}_3\text{N}_4$  电介质层, 形成在 MEMS 桥正下方的信号线上和地上覆盖有  $\text{Si}_3\text{N}_4$  电介质层结构(如图 6(f))。

5) 制备偏置线。首先在氮化硅层上溅射金属 Cu, 如图 6(g)所示, 光刻出偏置线的图形, 然后腐蚀金属 Cu 形成偏置线的图形, 如图 6(h)所示。

6) 旋涂厚度为 1.7  $\mu\text{m}$  的聚酰亚胺牺牲层, 并采用平面化技术使牺牲层表面光洁平整(如图 6(i)所示)。

7) 制备 MEMS 桥锚区。在牺牲层上刻蚀出锚点的图形(如图 6(j)), 然后电镀金属 Al 作为锚点, 见图 6(k)。

8) 制备 MEMS 桥。在牺牲层上蒸渡 1  $\mu\text{m}$  厚的铝硅合金层(如图 6(l)), 光刻出桥的图形, 湿法刻蚀 Au 形成 MEMS 桥结构(如图 6(m))。

9) 释放牺牲层。采用等离子体释放牺牲层, 使用气体为  $\text{O}_2$ 。释放牺牲层后, 铝硅合金膜悬空, 结构成型(如图 6(n))。

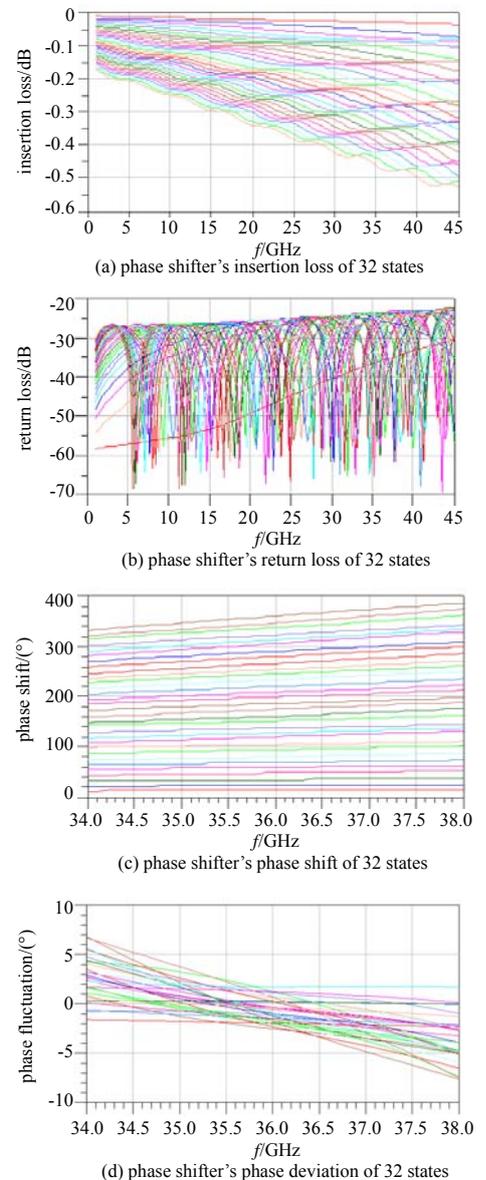


Fig.5 Simulation results for main performance of 5-bit DMTL phase shifter

图 5 五位移相器主要性能参数仿真结果

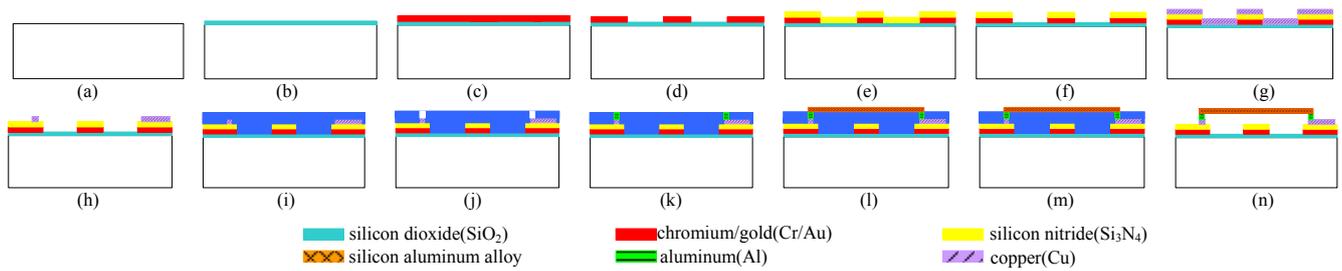


Fig.6 Process of single structure of DMTL phase shifter

图6 DMTL 移相器单元结构加工工艺

从上面的加工工艺中可以看到,偏置线采用新的设计方式,仅通过工艺步骤 5)即可完成,并且工艺也容易实现,进一步验证了新方式的优势和可行性。

## 5 结论

设计了一个五位分布式 MEMS 移相器,提出了一种新型的直流偏置的加载方式,能解决传统偏置线设计带来的交直流隔离和引线繁杂的问题,对其工艺实现的 2 种方式进行了讨论。分析了 ADS 设计模型和仿真优化的方法,仿真得出五位移相器 32 态相移位的插损小于 0.5 dB,回波损耗大于 23 dB,相移精确度小于 3°。最后给出了移相器的工艺流程,下一步可直接加工、测试。

### 参考文献:

- [1] Rebeiz G M. RF MEMS Theory, Design, and Technology[M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003:218-246.
- [2] Varadan K Vijay, Vinoy K J, Jose K A. RF MEMS and Their Application[M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003:40-78.
- [3] Liu Y, Borgioli A, Nagra A S, et al. K-band 3-bit low-loss distributed MEMS phase shifter[J]. IEEE Microwave Guided Wave Lett. 2000, 10(10):415-417.
- [4] 蔡洁, 廖小平, 朱健. X 波段交直流分离的 MEMS 开关的设计与研究[J]. 维纳电子技术, 2005, 42(8):369-373. (CAI Jie, LIAO Xiaoping, ZHU Jian. Design and analysis of a DC and AC separated MEMS switch for X band application[J]. Micronanoelectronic Technology, 2005, 42(8):369-373.)
- [5] 石艳玲, 卿健, 李炜, 等. 低电压驱动的硅基 Ka 波段级联式 MEMS 移相器[J]. 电子学报, 2003, 31(12):1914-1916. (SHI Y L, QIN Q, LI Y, et al. MEMS distributed phase shifter on high resistivity silicon with low pull-down voltage[J]. Chinese Journal of Electronics, 2003, 31(12):1914-1916.)
- [6] 谢兴军, 单红, 苏伟. 低激励电压微波 MEMS 开关的理论分析和仿真[J]. 信息与电子工程, 2003, 1(4):281-283. (XIE X Q, SHAN H, SHU W. Theoretical analysis and simulation of low actuation voltage microwave MEMS switch[J]. Information and Electronic Engineering, 2003, 1(4):281-283.)
- [7] Elwenspoek M, Jansen H. 硅微机械加工技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2004:126-133. (Elwenspoek M, Jansen H. Silicon Micromachining[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2004:126-133.)
- [8] 刘佳, 高杨, 白竹川, 等. 低驱动电压 K 波电容耦合式 RF MEMS 开关的设计[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(9):75-77, 81. (LIU J, GAO Y, BAI Z C, et al. Design of low threshold voltage K-band capacitive RF MEMS switch[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2008, 27(9):75-77, 81.)
- [9] Sami Franssila. 微加工导论[M]. 北京:电子工业出版社, 2005:127-140. (Sami Franssila. Introduction to microfabrication[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005:127-140.)

### 作者简介:



贾小慧(1984-),女,四川广安人,在读硕士研究生,主要研究方向为微电子机械系统. email: xiaoxiaolovechen@163.com.

高杨(1972-),男,四川绵阳人,博士,研究员,主要研究方向为微电子机械系统。

郑英彬(1974-),男,河南南阳人,硕士,助理研究员,主要研究方向为微电子机械系统。

柏鹭(1985-),女,四川达州人,在读硕士研究生,主要研究方向为微电子机械系统。