

# 低损耗微波 MEMS 共平面波导 在低阻硅上的实现\*

石艳玲 忻佩胜 邵丽 游淑珍 朱自强 赖宗声

(华东师范大学电子科学技术系, 上海 200062)

**摘要:** 在低阻硅衬底上采用常规 CMOS 工艺和后处理微机械加工技术实现了微波 MEMS 共平面波导, 并与高阻硅基平面结构共平面波导特性进行了比较。采用混合相似剖分有限元方法设计了一组不同特性阻抗值的传输线, 并通过关键的混合腐蚀技术制备了  $50\Omega$  和  $120\Omega$  两种特性阻抗的传输线。由于腐蚀去除了信号线下方导致损耗的低阻硅衬底, 使得传输线插入损耗、散射特性等得以改善。实验中, 使用矢量网络分析仪分别在微机械加工前后对传输线进行了 1GHz 到 40GHz 频段的参数测试, 利用多线分析技术对测试结果进行了分析。结果表明在微结构悬浮后共平面波导的损耗特性有了大幅度的降低, 30GHz 处插入损耗约为  $7\text{dB/cm}$ , 较腐蚀前降低了  $10\text{dB/cm}$ 。

**关键词:** 共平面波导; 低阻硅衬底; 微机械加工技术; 插入损耗

**EEACC:** 2220; 2570

中图分类号: TN405

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)09-0994-05

## 1 引言

随着通信和集成电路所用频率的不断增大, 对低成本、微型化的微波元件有很大的需求, 在许多应用场合, 也需要其易于与模拟和数字电路集成。传输线是微波技术中最重要的基本元件之一, 其主要用途就是以最小的损耗将电磁能量从一处传输至另一处。此外还用于构成各种各样微波元件和器件, 如谐振电路、阻抗变换器、滤波器、定向耦合器等。

对传输线的基本要求是损耗低、传输功率大、工作频带宽、尺寸小和成本低。传输线的种类很多, 其导引的电磁波的波型也不同, 从微波传输带、传输条到波导的平面化已经证实了其设计上的灵活性, 而平面元件尺寸的大大减小使得采用传统精细加工技术生产变得十分昂贵和困难。

在微电子技术中, 硅片的加工工艺始终处于核心地位, 因此迫切希望能用硅片制作各种高性能的微波无源器件, 但常规 CMOS 工艺的硅衬底材料电阻率相对较低( $1\sim 10\Omega \cdot \text{cm}$ ), 直接在该衬底上制备

微波无源器件, 会由于电磁耦合作用在硅基片上产生感生电流, 导致电磁波在传输过程中损耗很大而无法得到高  $Q$  值的微波元件和电路。近年来随着微机械加工技术的迅速发展, 人们设想将该技术应用于微波领域, 制备悬浮于硅衬底的微机械微波传输线和其它无源器件<sup>[1~3]</sup>。这样一方面大幅度降低了传输损耗和寄生电容, 另一方面该技术又能够与常规的 CMOS 工艺兼容, 易于实现 CMOS 电路的单片集成和低成本生产, 具有广阔的应用前景。文献[1]采用 XeF 各向同性刻蚀工艺通过对传输线附近的半导体衬底材料进行微机械加工, 使其与周围媒体隔离, 在 1GHz 到 40GHz 频率范围内, 共平面波导插入损耗不超过  $4\text{dB/cm}$ , 但该刻蚀流程较难实现。文献[2]实现的 IOCPW 是利用微机械技术实现接地板间的空气桥连, 在  $25\sim 80\Omega$  宽阻范围内可以获得不到  $1\text{dB}$  的损耗, 但该结构对工艺要求也较高。

本文首先对 MEMS 共平面波导的结构参数进行了数值分析, 采用标准 CMOS 工艺和后处理的混合刻蚀工艺加工微波传输线, 通过矢量网络分析仪对传输线悬浮前后分别进行了  $S$  参数测量, 并将该

\* 国家“973”计划(No. G1999033105)、国家杰出青年基金(批准号: 69975409)及上海应用材料研究与发展基金(No. 0103)资助项目

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

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。

2002-11-08 收到, 2003-01-23 定稿

分析结果与高阻硅衬底上实现的平面结构共平面波导特性进行了比较。

## 2 特性阻抗分析

目前, 基本能够通过有限元方法求解常规(大尺寸)微波传输线的特性阻抗、损耗等问题, 是微波传输线静态特性的主要的分析方法, 但不能适用于毫米级不规则传输线。文献[4]在相似剖分有限元技术的基础上, 参照微机械微波共平面波导几何结构的特点, 提出了采用混合相似剖分技术对 MEMS 共平面波导特性阻抗进行分析。该方法首先对不规则不均匀区域进行大的粗分, 尽量使其中的部分粗分单元区域均匀规则, 然后对这些规则的区域进行按层的相似剖分, 对不规则的粗分区域进行常规的有限元剖分, 重新推导了一组新的递推公式。该方法在研究不规则结构传输线特性阻抗等一类只与能量值有关的问题时特别适用。在验证了方法的前提下, 对可能影响 MEMS 共平面波导特性阻抗的结构参数进行详细分析。

图 1 为微机械微波共平面波导的结构剖面图。它是通过混合腐蚀工艺将 $\langle 100 \rangle$ 晶向硅衬底腐蚀出一 V 形空腔, 从而形成悬浮的 G-S-G 结构共平面波导。图 1 中  $a$ 、 $b$  分别表示地线和信号线的宽度,  $s$  表示两者之间的间距,  $L$  则表示整个结构的宽度, 以上几个参数由版图设计决定; 而  $V_w$  表示形成的 V 形空腔开口的大小, 它主要决定于混合腐蚀工艺中各向同性腐蚀的时间, 并且经各向异性腐蚀(KOH、TMAH、EDP 等)后, 暴露出 $\langle 111 \rangle$ 晶面, 因此形成腐蚀面角度总是  $54.7^\circ$ 。可见图 1 静电问题的求解空间是非均匀和不规则的。

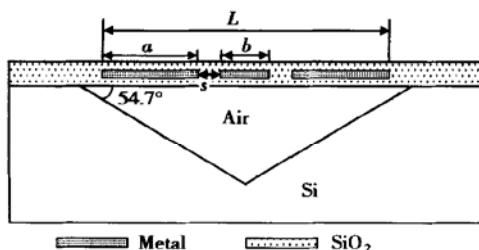


图 1 微波 MEMS 共平面波导结构剖面图

Fig. 1 Layout of the microwave MEMS coplanar waveguide

在上述混合相似剖分有限元分析中选取硅为衬

底, 介质层为  $\text{SiO}_2$ , 变化 MEMS 共平面波导的结构参数  $a$ 、 $b$ 、 $s$  和  $V_w$  并进行大量计算, 表 1 中给出一组特性阻抗值 MEMS 共平面波导的结构参数分析值。结果表明: 在所有参数中, 信号线宽度和信号线与地线之间的间距对特性阻抗的影响最大, 其它参数的影响较小, 并且传输线在悬浮前后特性阻抗值有较大变化。这为毫米级长度传输线的设计与制备提供了理论依据。

表 1 MEMS 共平面波导特性阻抗的结构参数分析值

Table 1 Structural parameters of MEMS coplanar waveguides

$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	$s/\mu\text{m}$	刻蚀前 $Z_c/\Omega$	刻蚀后 $Z_c/\Omega$
50	28.4	0.8	30.18	35.64
50	24	3	40.47	49.65
50	30	10	57.78	76.03
50	20	15	83.63	120.55

## 3 样品制备

首先根据上述结构参数分析值, 进行常用的  $50\Omega$  和  $120\Omega$  共平面波导的版图设计, 然后采用 CMOS 工艺和后处理的混合腐蚀技术, 制备了上述 MEMS 共平面波导, 具体工艺流程为: 选取 $\langle 100 \rangle$ 晶向硅衬底, p 型, 电阻率为  $20\Omega \cdot \text{cm}$ , 在该衬底上热生长约  $1\mu\text{m}$  的  $\text{SiO}_2$ , 作为绝缘层和结构支撑层。然后溅射一层金属 Cr/Au, 并将 Cr/Au 刻蚀成 G-S-G 结构的传输线形状。由于溅射金属膜层较薄(约  $100\text{nm}$ ), 产生较大的直流阻抗, 因此通常采用电镀工艺将膜层增厚至  $1\sim 2\mu\text{m}$ 。再次淀积  $\text{SiO}_2$ , 并刻蚀第二层  $\text{SiO}_2$ , 形成引线孔。腐蚀去除图 1(a) 中信号线与地线之间的两层  $\text{SiO}_2$ , 暴露出 Si 衬底。采用混合腐蚀工艺(各向同性+各向异性腐蚀)形成图中所示的 V 形空腔。这样所需的传输线就基本完成了。

在上述流程中, 关键的是最后的混合腐蚀工艺, 一般分为两步:

第一步, 采用各向同性  $\text{SF}_6$  刻蚀, 时间为  $10\sim 15\text{min}$ ;

第二步, 将硅片置于各向异性腐蚀液 TMAH 中进行腐蚀, 形成最终所需的 V 型空腔, 即图 1(a) 所示的倒金字塔结构, 由于各向异性腐蚀在 $\langle 111 \rangle$ 面截止, 故空腔的开口角度固定为  $54.7^\circ$ 。TMAH 刻蚀时

间应足够长, 以得到完全的空腔结构, 保证传输线和衬底之间有良好的电磁隔离, 且空腔中的介电常数基本为 1, 保证传输线工作在 TEM 模式。

采用混合腐蚀工艺形成微机械传输线的主要目的是去除结构下方的硅, 减小电磁耦合作用。由表 1 参数可以看到, 对  $120\Omega$  传输线, 间距  $s$  数值较大, 足以开设适当大小的腐蚀孔, 因此上述表面微机械加工处理得以实现, 并且该传输线的  $V_w$  相对较小,

结构也较稳定。对  $50\Omega$  传输线, 间距  $s$  仅为  $3\mu\text{m}$ , 无法在信号线和地线之间开腐蚀孔, 只能将腐蚀孔放置在地线的两侧, 这样该传输线结构中 V 形空腔的宽度  $V_w$  将大于传输线总宽度  $L$ , 对正面刻蚀要求较高, 实际制备中成品率极低, 因此对  $50\Omega$  样品的制备, 改用背面体硅加工技术去除硅。而图 2 给出实际制备得到的  $50\Omega$  和  $120\Omega$  传输线的 SEM 照片。

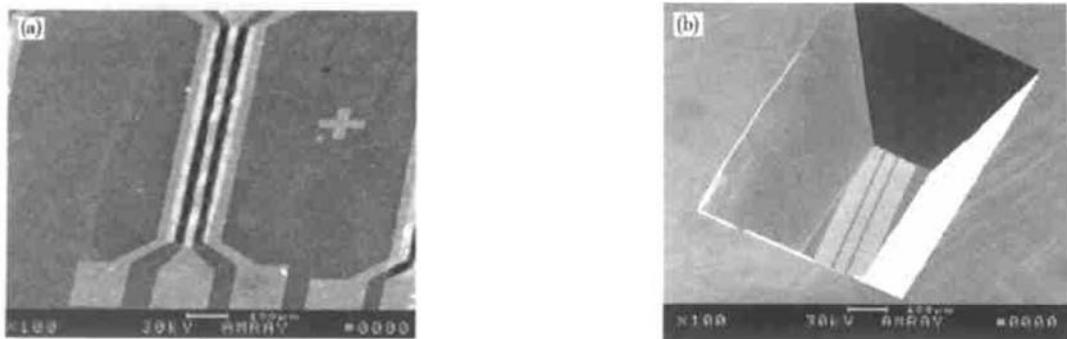


图 2 MEMS 共平面波导的 SEM 照片 (a) 特性阻抗  $120\Omega$ ; (b) 特性阻抗  $50\Omega$

Fig. 2 SEM photographs of MEMS coplanar waveguides (a) Characteristic impedance  $120\Omega$ ; (b) Characteristic impedance  $50\Omega$

## 4 参数测试与分析

精确测量微机械微波传输线的参数对于它的应用来说是非常重要的。通常, 微机械微波传输线的测量是用网络分析仪和嵌入技术进行, 得到相关散射参数。理论上, 从散射参数的测量可以计算得出各个频率上传输线的单位长度传播常数和有效介电常数。在测量方面, 因为传输线的尺寸相对于测试信号的波长非常小, 所以由探针放置引起的寄生效应都必须仔细地描述以便将它们对测量的影响降到最小。在具体分析过程中, 根据多线分析<sup>[5,6]</sup>的基本原理, 编制了相应的程序对测得的散射参数进行分析, 该方法能有效消除探针或校正不良等引入的误差。

多线方法从对两种长度的传输线无需校正的散射参数, 组成传输线级联矩阵<sup>[5]</sup>

$$\mathbf{M}^i = \frac{1}{S_{21i}} \begin{vmatrix} (S_{12i}S_{21i} - S_{11i}S_{22i}) & S_{11i} \\ -S_{22i} & 1 \end{vmatrix} \quad (1)$$

和

$$\mathbf{M}^{\bar{i}} = \mathbf{M}^i [\mathbf{M}^i]^{-1} \quad (2)$$

解出上面矩阵  $\mathbf{M}^{\bar{i}}$  的两个特征值  $\lambda_M^i$  和  $\lambda_M^{\bar{i}}$ , 就可以

求出传播常数  $v^{[5]}$ :

$$v = \frac{\ln \left[ \frac{1}{2} \left| \lambda_M^i + \frac{1}{\lambda_M^{\bar{i}}} \right| \right]}{l_i - l_j} \quad (3)$$

测试时使用了 HP8510B 自动网络分析仪, 测试频率为  $1\sim 40\text{GHz}$ , 并且在传输线悬浮前后分别进行了一整套测量。首先从测量得到的散射参数计算传播常数  $v$ , 然后利用下式计算出传输线的有效介电常数  $\epsilon_{\text{eff}}$ 。

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{-v^2 c^2}{\omega^2} = \frac{1}{2} (\epsilon_r + 1) \quad (4)$$

式中  $\epsilon_r$  是传输线下方介电材料的相对介电常数。

微机械结构释放前, 根据硅的相对介电常数  $\epsilon_r = 11.9$ , 可以计算得到  $\epsilon_{\text{eff}} \approx 6$ , 微结构悬空后, 传输线下面形成一个 V 形槽, 并且充满了空气。忽略  $\text{SiO}_2$  钝化层不计, 将得到  $\epsilon_r \approx 1$  和  $\epsilon_{\text{eff}} \approx 1$ 。图 3 给出利用多线方法分析得到的微结构释放前后有效介电常数的实部和虚部, 图 3(a) 中高频端的结果与上述分析相符合, 证明了多线方法的正确性。由于传输线非常短, 所以有效介电常数的虚部约为 0。

进一步分析特性阻抗为  $120\Omega$  的 MEMS 共平

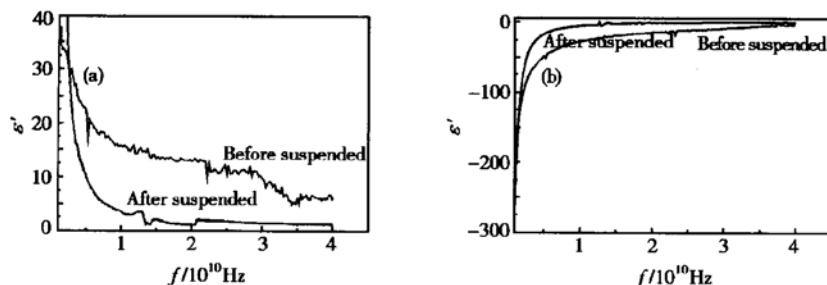
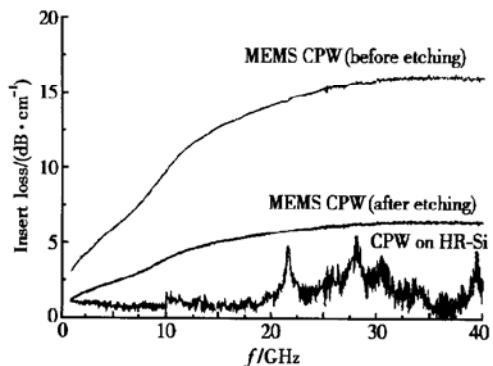


图 3 MEMS 共平面波导的有效介电常数 (a) 实部; (b) 虚部

Fig. 3 Effective dielectric constant of the MEMS coplanar waveguide

面波导悬浮前后的传输损耗, 并与直接制备于高阻硅衬底( $\rho = 4000 \Omega \cdot \text{cm}$ )上的平面结构共平面波导相比较, 结果如图 4 所示。特性阻抗为  $50\Omega$  的传输特性与之相似。

图 4 MEMS 共平面波导( $Z_c = 120\Omega$ )的插入损耗Fig. 4 Insert loss of the MEMS coplanar waveguide ( $Z_c = 120\Omega$ ) on LR-Si and HR-Si

## 5 测试结果讨论

对共平面传输线而言, 电磁场主要集中在信号线与地线之间的区域, 通过微机械加工技术去除该区域的导电硅衬底后, 传输线的电容量减少, 导致在衬底中的寄生电流更小, 使得传输线的损耗更低和寄生电容更小, 这可由图 4 的实验测试结果得到证实。利用多线分析技术对传输线插入损耗和有效介电常数的测量分析表明: 微机械共平面波导在悬浮后性能有了很大的提高, 传输线在  $10\text{GHz}$  处, 插入损耗减少了约  $6\text{dB}$ , 在  $30\text{GHz}$  处则减少了约  $10\text{dB}$ , 在被测的整个频率范围内损耗不超过  $7.5\text{dB/cm}$ 。同时也应该注意到, 腐蚀前后传输线下方的结构发生了变化, 即原硅衬底由于微加工产生了一 V 形空腔, 其相对介电常数从 11.9 变为 1, 这导致了传输

线特性阻抗的变化, 该变化已通过对结构的有效介电常数的测量得到了证实。

从图 4 的测试曲线还可以看到, 尽管微结构悬浮后, 传输线的损耗特性有了极大的改善, 但仍大于高阻硅上传输线的损耗值, 这可能是由于在线检测时, 测试探针仍压在传输线两端的低阻区域, 造成了损耗值的增大。

## 6 结论

本文描述了微波 MEMS 共平面波导的设计、制备及特性分析, 该波导在制备时采用了混合腐蚀工艺, 形成了悬浮的结构, 这样使得传输线与周围的媒介隔离, 改善了损耗特性。其制备工艺与 CMOS 技术兼容, 未来可用于实现微波无源器件与信号处理电路的集成。

**致谢** 感谢中国科学院上海微系统与信息技术研究所程知群先生、陈思琴女士、孙晓玮女士和张丹小姐在本课题研究过程中给予的热情支持和帮助。

## 参考文献

- [1] Milanovic V, Gaitan M, Bowen E D, et al. Micromachined microwave transmission lines in CMOS technology. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1997, 45(5): 630
- [2] Kwon Y, Kim H T, et al. Low-loss micromachined inverted overlay CPW lines with wide impedance ranges and inherent air-bridge connection capability. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2001, 11(2): 59
- [3] Jeong In-Ho, Kwon Young-Se. Monolithic implementation of coaxial line on silicon substrate. *IEEE Microw Guided Wave Lett*, 2000, 10(10): 406
- [4] Shi Yanling, Yu Dandan, et al. Analysis of the characteristic

- impedance of micromachined microwave transmission lines with FEM. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(12): 38 [石艳玲, 于丹丹, 等. 微机械微波共平面波导特性阻抗有限元法分析. *电子学报*, 2000, 28(12): 38]
- [5] Janezic M D, Jargon A. Complex permittivity determination from propagation constant measurements. *IEEE Microw Guided Wave Lett*, 1999, 9(2): 76
- [6] Marks R B, Williams D F. Characteristic impedance determination using propagation constant measurement. *IEEE Microw Guided Wave Lett*, 1991, 1(6): 141

## Low Loss Microwave MEMS Coplanar Waveguides on Low Resistivity Silicon<sup>\*</sup>

Shi Yanling, Xin Peisheng, Shao Li, You Shuzhen, Zhu Ziqiang and Lai Zongsheng

*(Department of Electronic Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200062, China)*

**Abstract:** Microwave transmission lines are designed and fabricated by the CMOS technology on Si substrates with low and high resistivities. First, the characteristic impedance of the microwave coplanar waveguides (CPW) is analyzed with a new similarity method in FEM. The characteristic impedance of MEMS waveguide is calculated and the change with its different dimensions is analyzed. Then the samples with characteristic impedances of  $120\Omega$  and  $50\Omega$  are fabricated through the micromachining. Measurements are performed at frequencies from 1 to 40GHz. The insert loss of transmission line shows a great improvement after the structures are suspended. At 30GHz, the insert loss is about  $7\text{dB/cm}$ , reduces by more than  $10\text{dB/cm}$  compared with that of the structures without suspended.

**Key words:** coplanar waveguide; low-resistivity silicon (LR-Si) substrate; MEMS; insert loss

**EEACC:** 2220; 2570

**Article ID:** 0253-4177(2003)09-0994-05

---

\* Project supported by National Key Fundamental Research Project (No. G1999033105), National Natural Science Foundation of China (No. 69975409), and R&D Foundation for Materials of Shanghai (No. 0103)

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

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

Received 8 November 2002, revised manuscript received 23 January 2003

©2003 The Chinese Institute of Electronics