

Ka Band Silicon Based MEMS Filter *

ZHANG Yong^{1*}, YU Yuan-wei^{1,2}, JIA Shi-xing¹, ZHU Jian^{1,2}, CHEN Chen^{1,2}

(1. Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China;
2. National Key Lab. of Monolithic Integrated Circuits and Modules, Nanjing 210016, China)

Abstract : Filter is a kind of important component in microwave and millimeter wave circuits and systems. A novel kind of filter is introduced. It is based on the substrate integrated waveguide (SIW) and MEMS technique. Induced coupling plasma (ICP) deep etching is done to get vertical via-holes in the high resistivity silicon substrate. Measured results of a fabricated MEMS resonator which is the core component of the SIW filter show a high Q of 180 and a small error of 2 % of the resonating frequency. To design a Ka band filter, theoretical calculation and experiment design method are used and described. The frequency of the filter is 30.3 GHz; the insertion loss is 1.5 dB; and the band width is 5 %. The final size of the chip is 10.0 mm × 2.8 mm × 0.4 mm.

Key words : MEMS Filter; Coupling; SIW; Ka Band

EEACC : 2575; 1270D; 1350F

Ka 波段硅基 MEMS 滤波器 *

张 勇^{1*}, 郁元卫^{1,2}, 贾世星¹, 朱 健^{1,2}, 陈 辰^{1,2}

(1. 南京电子器件研究所, 南京 210016; 2. 单片集成电路与模块国家级重点实验室, 南京 210016)

摘 要 : 滤波器是微波毫米波电路中的一个重要部件, 本文介绍了采用基片集成波导技术和 ICP 深刻蚀微机械通孔阵列的硅基 MEMS 滤波器。设计制作了 MEMS 滤波器的核心部件谐振器, 测试结果显示该谐振器无载 Q 值大于 180, 频率误差控制在 2 % 以内。以此为基础采用理论计算与实验设计相结合的方法设计了一个 Ka 波段硅基 MEMS 滤波器。滤波器中心频率为 30.3 GHz, 插入损耗 1.5 dB, 相对带宽 5 %。芯片尺寸为 10.0 mm × 2.8 mm × 0.4 mm。

关键词 : MEMS 滤波器; 耦合; 基片集成波导; Ka 波段

中图分类号 : TN603.5; TN629.1

文献标识码 : A

文章编号 : 1004-1699(2008)02-0325-04

传统的微波毫米波滤波器设计和制作技术, 如利用传统金属波导或利用微带线的滤波器实现技术, 不是体积庞大、不易集成就是很难达到所要求的技术指标。SIW (Substrate integrated Waveguide) 技术^[1-2] 可以将非平面波导元件和平面传输线电路集成在同一衬底上, 与传统波导类元件相比, 还具有尺寸小、重量轻等优点, 是目前微波毫米波领域的研究热点。用 SIW 技术与硅微机械技术的结合, 实现单片式硅基 MEMS 滤波器, 是实现 RF 系统小型化、集成化的技术途径。

本文应用硅微机械技术, 采用 ICP 深刻蚀^[3] 微

机械通孔阵列形成硅基衬底集成波导从而构成滤波器谐振腔, 输入输出采用 CPW (共面波导) 结构。应用腔体耦合理论, 设计了一种 MEMS 毫米波滤波器。结果显示该滤波器具有良好的性能。设计的滤波器具有体积小、插损小、易于加工和集成等特点。

1 理论分析与设计

1.1 SIW 谐振器

MEMS 谐振腔是滤波器的核心单元, 首先对谐振器进行分析设计。设计谐振腔为矩形波导谐振腔, 如图(1)所示, 根据公式(1)^[4] 计算滤波器谐振频

基金项目: 单片集成电路与模块国家级重点实验室基金资助(9140C1405020607)

收稿日期: 2007-09-30 修改日期: 2008-01-08

率。其中, W 为谐振腔宽, L 谐振腔长, c 为光速, ϵ_r 为介质的相对介电常数。

$$F_{R(TE101)} = \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{1}{W}\right)^2 + \left(\frac{1}{L}\right)^2} \quad (1)$$

通过实际制作测试谐振器无载 Q 值大于 180, 频率误差在 2% 以内。图(2)所示为谐振器实物图。

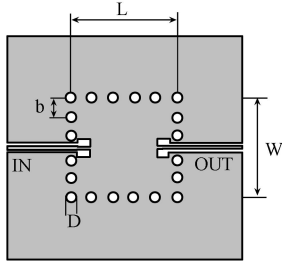


图1 SIW 谐振腔结构图

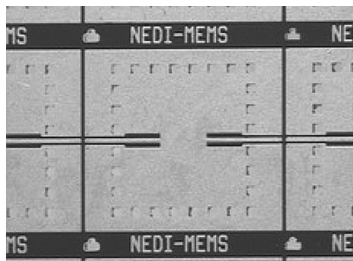


图2 SIW 谐振腔实物图

1.2 理论计算

首先根据矩形波导单模传输条件^[5], 见公式(2), 设计矩形波导的宽度与厚度。

$$\lambda_0/2 < w < \lambda_0, h < \lambda_0/2 \quad (2)$$

式中, λ_0 为工作波长, w 和 h 分别为波导腔的宽度与厚度。然后根据公式(3) 计算滤波器的节数^[6]。

$$N_f \geq \frac{\ln(2a)}{\cosh^{-1}\left(\frac{1}{a}\right)} \quad (3)$$

其中, a 为带宽参数, n 为通带波纹, k_1 和 k_a 为选择性因数。本文中, 计算得到所需滤波器节数为五节。选用 0.2 dB 波纹契比雪夫型低通原形。由公式(4)~公式(7) 计算滤波器各物理参数^[7], 详细结果及各参数说明见表 1。

通过理论计算得出滤波器尺寸后, 并不能直接进行设计与制作, 由于各寄生参数的存在, 使得理论计算结果一般与实际结果相差较远。所以必须以理论计算结果为基本参数, 结合采用计算机辅助设计对滤波器进行三维电磁场模拟, 得到实际可信的结果。而一般此过程, 可采用实验设计方法。

表1 滤波器理论设计结果

滤波器端点	0	1	2	3	4	5	6
低通原形值	1	1.3394	1.337	2.116	1.337	1.3394	1
阻抗变换器阻抗 ($K_{i,i+1}$)	0.406	0.165	0.130	0.130	0.165	0.406	-
各并联电抗 $J_{i,i+1}$	0.487	0.170	0.132	0.132	0.170	0.487	-
谐振器电长度 X_i (rad)	2.59	2.85	2.88	2.85	2.59	-	-
谐振器物理长度 L_i (mm)	1.746	1.919	1.942	1.919	1.746	-	-

$$\frac{k_{01}}{Z_0} = \sqrt{\frac{w}{2g_0g_1w_1}}, \frac{k_{i,i+1}}{Z_0} \Big|_{j=1 \dots n-1} = \frac{w}{2w_1} \frac{1}{\sqrt{g_jg_{j+1}}},$$

$$\frac{k_{n,n+1}}{Z_0} = \sqrt{\frac{w}{2g_ng_{n+1}w_1}} \quad (4)$$

$$w = \frac{e_1 - e_2}{g_0}, g_n = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{e_1}{2a}\right)^2}}, g^0 = \frac{e_1 + e_2}{2} \quad (5)$$

$$J_{i,i+1} = k_{i,i+1} / (1 - k_{i,i+1}^2), i = 0, 1, \dots, n-1$$

$$1 / (2(\arctan(2J_{i,i+1}) + 2\arctan(2J_{i+1,i+2}))) \quad (6)$$

$$L_i = g_n^{-1} / (2) \quad (7)$$

1.3 实验方法设计

定义滤波器外部品质因数理论计算公式:

$$Q_e = \frac{f_0}{f} g_0 g_1 \quad (8)$$

f_0 是滤波器中心频率, f 是滤波器带宽, g_1 是原型

值(可查)。根据滤波器性能要求可知计算 Q_e 的各参数。从而得到所需的理论 Q_e 值。接下来再通过实验来得到实际 Q_e 值, 实际 Q_e 值与输入耦合节、第一谐振节以及它们之间的耦合有关。调整耦合槽线、输入节结构的尺寸, 得到不同的 Q_e 值, 当其理论与计算值符合时即达到要求^[8]。

通过实验得到 Q_e 值得方法为: 先测出滤波器 S_{11} 参数在中心频率点附近产生 180 度相移时的带宽, 定义为 f_{01} , 再根据公式计算得到:

$$Q_e = \frac{f_{01}}{f_0} \quad (9)$$

接下来需要设计中间各谐振节的尺寸, 它与中间耦合系数密切相关。中间节耦合系数理论计算公式为:

$$K_{ij} = \frac{f}{f_0} \frac{1}{\sqrt{g_i g_j}} \quad (10)$$

而实际中间节的耦合系数可通过奇偶模激励的方式得到:

$$K_{ij} = \frac{f_{even}^2 - f_{odd}^2}{f_{even}^2 + f_{odd}^2} \quad (11)$$

f_{odd} 和 f_{even} 分别为奇模和偶模激励下可测得的中间耦合谐振节的谐振频率。通过改变各耦合节的尺寸得到不同的耦合系数。当其理论与理论计算值相符合时即达到设计要求。

我们在厚度为 400 μm ,介电常数为 11.9,正切损耗小于 0.005 的高阻硅衬底上设计得到的滤波器版图如图 3 所示,第 1、5 节腔的尺寸为 2.11 mm \times 2.46 mm;第 2、4 节腔的尺寸为 2.07 mm \times 2.46 mm;第 3 节腔的尺寸为 2.09 mm \times 2.46 mm。与理论计算结果相比,中间各节的尺寸误差比较小,但输入输出端口的两节尺寸与理论计算值相差较大。分析原因,由于外部品质因素的要求,输入输出端的耦合孔图形必须具有一定的大小,本文中为 0.46 mm \times 0.55 mm。而耦合孔造成了本节谐振器频率的漂移,所以必须调整设计,进行优化,使得中心频率与外部品质因素都达到要求。这样,最终的结果是,第一、第二节的波导腔尺寸将有所变化。本文采用的是 ADS 中的版图电磁场仿真软件,滤波器设计性能如图 4 所示。中心频率为 30.3 GHz,插入损耗 1.5 dB,相对带宽 5%,带边 1 GHz 处的带外抑制为 35.3 dB,带内驻波小于 1.5。

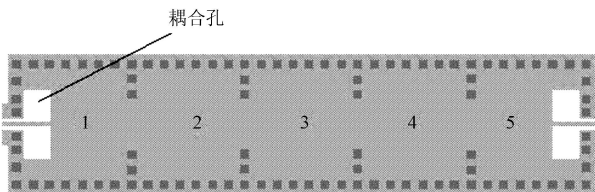


图 3 Ka 波段 SIW 滤波器

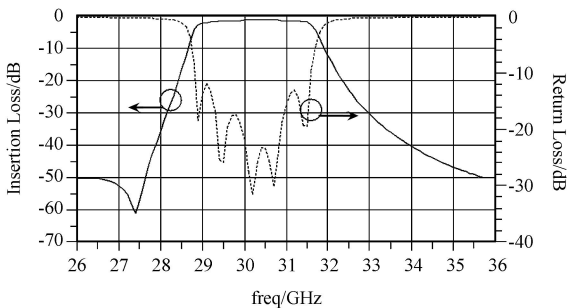


图 4 Ka 波段 SIW 滤波器设计性能

2 工艺制作

实际制作中,毫米波段小型化滤波器对于尺寸的要求极为严格,尤其是对于通孔,必须保证侧壁垂

直,孔径大小准确,否则会严重影响滤波器性能,本文采用微机械精密加工工艺,首先在高阻硅衬底材料上热氧化一层 SiO_2 膜,光刻出通孔窗口,蒸发金属铝,刻出通孔窗口,使用 ICP 深硅刻蚀工艺,控制工艺参数,使孔径、孔深、垂度、孔边缘粗糙度都达到一定要求^[9]。然后去除铝掩蔽层,溅射、电镀一层金作为微波信号传输线,金层厚度在 3 μm 左右。接着磨片减薄衬底,至 400 $\mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ 。此时肉眼可看到通孔。最后进行背面溅射、电镀,使背面金属通过通孔与衬底正面金属形成 3 维互连。完成 MEMS 滤波器的工艺制作。最后划片,得滤波器芯片,尺寸为 10.0 mm \times 2.8 mm \times 0.4 mm。

3 结论

本文介绍了硅基集成波导型(SIW)MEMS 滤波器的技术路径。分析研究了该滤波器的核心部件 SIW 谐振器。针对毫米波段的应用,通过理论计算,得到了滤波器的物理尺寸,给出了计算公式。应用窄带滤波器耦合理论,进行实验设计,给出了详细的设计过程,最终设计的滤波器中心频率为 30.3 GHz,插损小于 1.5 dB。结果显示该滤波器具有体积小、插损小、易于加工和集成等特点。

参考文献:

- [1] Deslandes D and Wu K. Integrated Microstrip and Rectangular Waveguide in Planar Form[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters. 2001; 11(2):68-70.
- [2] D. Deslandes and K. Wu, Integrated Transition of coplanar to Rectangular Waveguides[C]// IEEE MTT Symposium digest. Phoenix 2001, 2:619-622.
- [3] Zhu J, Yu Y, Lin L, et al, Micromachined Silicon Via-holes and Interdigital Bandpass Filters[C]// Symposium on Design, Test, Integration and Package of MEMS/ MOEMS (DTIP 2005), Montreux, Switzerland, 2005:86-89.
- [4] J. R Bray and L. Roy, Resonant Frequencies of Post-Wall Waveguide Cavities[J]. Proc. Inst. Elect. Eng. Oct. 2003, 150(10):365-368.
- [5] 范寿康,卢春兰,李平辉编著.微波技术与微波电路[M].北京:机械工业出版社,2003.6:24-25.
- [6] 甘本祯,吴万春编.现代微波滤波器的结构与设计中(上)[M].北京:科学出版社,1973.5.
- [7] G.L. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, Microwave Filters, Impedance Matching Networks, and Coupling Structures [M]. New York: Artech House,1980: 615-620.
- [8] Lung-Hwa Hsueh, Tunable Microstrip Bandpass Filters With Two Transmission Zeros[J]. IEEE Tans. Microwave Theory

Tech, 2003(51): 520-524.

[9] J. K. Bhardwaj and H. Ashraf, Advanced Silicon Etching Using High Density Plasmas[C]// Proc. SPIE Micromachining

and Microfabrication Process Technology, 1995(2639): 224-233.



张勇(1981-),男,助工,从事 MEMS 设计与工艺研究, mems @ nedi. cn, zhang_y_2007 @126. com



郁元卫(1970-),男,高级工程师,从事 MEMS 器件与电路研究。



朱健(1962-),女,博士,研究员,南京电子器件研究所微米纳米研究开发中心主任。主要从事 MEMS 及微波器件与电路研究工作,中国微米纳米协会理事,已发表论文 30 余篇,已受理和已获得 9 项国家专利。



陈辰(1976-),男,南京大学博士研究生,工程师,从事 MMIC 和 MEMS 研究。

www.cnki.net