

## A Bulk Micromachined Tunable Elliptic Lowpass Filter\*

MIAO Min<sup>1,2,\*</sup>, BU Jing-peng<sup>1,3</sup>, ZHAO Li-wei<sup>1,2</sup>

1. Information Microsystem Research Institute, & Information and Telecom Engineering Dept.

Beijing Information Technology Institute, Beijing 100101, China;

2. National Key Laboratory of Micro/Nano Fabrication Technology, Peking University, Beijing 100871, China;

3. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

**Abstract:** This paper presents the analysis, designing and microfabrication of a tunable elliptic filter tuned by adjusting the first transmission zero (FTZ). Analytical calculation indicates that the shift of FTZ can effectively move 3dB cutoff frequency, which can be implemented with a series of bulk-micromachined switches (binary varactor) distributed along the series resonance branch of the device. A micro-perturbation method is proposed to analyse theoretically the tuning method. A 7-order stepped tunable eclipse low-pass filter is designed with a cutoff frequency of 16 GHz. Full-wave FEA revealed a shift of about 1.5 GHz is achieved with the actuation of each MEMS switch and no other property variations are observed, which demonstrates the accuracy and effectiveness of the analytical method and proves that the filter design owns flexible tunability and excellent microwave performance. The bulk micromachining process and the initial results of the switch are also reported.

**Key words:** radio frequency micro electromechanical system (RF MEMS); tunable filter; elliptic filter; first transmission zero; frequency shift; bulk micromachining

EEACC:5240D

## 一种基于体硅工艺的微机械可调节椭圆低通滤波器\*

缪旻<sup>1,2,\*</sup>, 卜景鹏<sup>1,3</sup>, 赵立巍<sup>1,2</sup>

1. 北京信息工程学院信息微系统研究所, 信息与通信工程系, 北京 100101;

2. 北京大学微米/纳米加工技术国家级重点实验室, 北京 100871;

3. 中国科学院电子学研究所, 北京 100080

**摘 要:** 提出了一种椭圆低通可调滤波器的调谐方法, 即通过调节第一传输零点(FTZ)来改变 3 dB 截止频率  $T_c$ 。解析计算表明, 小范围内改变 FTZ 既可调节  $T_c$  和滚降速率, 又能保证通带和阻带的特性基本不变。作者提出 FTZ 的移动可由串联谐振支路处容性 MEMS 开关的分布加载来实现, 并基于微扰法求出器件中心谐振频率及特性的变化规律。本文相应设计了  $T_c$  为 16 GHz 的 7 阶步进式滤波器。高频有限元全波仿真表明, 每加载一个 MEMS 开关,  $T_c$  改变约 1.5 GHz, 损耗特性则几乎不变。这证明了理论分析方法有较高的准确性, 而且器件设计具有数字化调节能力和较出色的微波性能。这种方法也可用于高通和带通滤波器。论文还介绍了器件的体硅微加工流程及 MEMS 开关的初步加工结果。

**关键词:** 射频微机电系统; 可调谐滤波器; 椭圆低通滤波器; 第一传输零点; 频率移动; 体硅微机械加工工艺

中图分类号: TN015

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)03-0486-04

近年来, 各种新型移动通信、无线接入和雷达技术的迅猛发展, 对收发机系统中的微波滤波器提出了新

基金项目: 国家自然科学基金资助(60501007); 北京市科技新星计划资助(2006A44); 北京市教委科技发展计划项目资助(KM200610772003); 北京市委组织部北京市优秀人才培养资助个人项目资助(20061D0500700168)

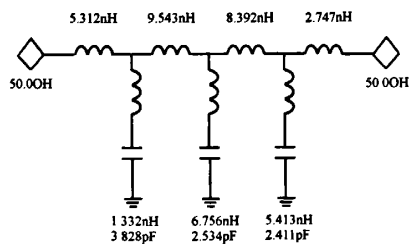
收稿日期: 2007-09-30 修改日期: 2008-01-07

的要求<sup>[1-2]</sup>,于是可在系统控制下根据电磁环境状况和应用需求对微波特性进行实时、灵活调节的单片集成可调滤波器开始崭露头角<sup>[2-4]</sup>。由于收发机系统日趋小型化、智能化,单个滤波器不仅应该结构紧凑,而且还需要实现多种滤波效果。随着 RF MEMS 技术的日益成熟,微机械可调节滤波器以其高度的紧凑性、灵活性以及优良的微波性能而受到人们的关注。目前此类滤波器一般采用 Butterworth 和 Chebyshev 带通架构,利用表面微机械工艺制作,表现出灵活的调节特性和出色的微波性能。

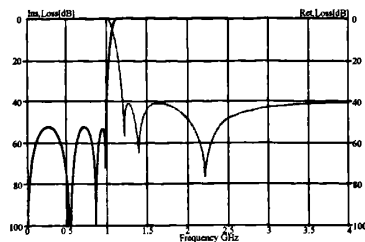
本文提出通过控制第一传输零点(FTZ)的位置来改变椭圆低通滤波器的截止频率  $T_c$  的调节方法。并提出通过在串联谐振支路分布加载容性 MEMS 开关(二值可变电容)的方式来移动传输零点。利用微扰法进行了特性的理论分析,得到了分别驱动各 MEMS 开关时器件中心谐振频率及特性的变化规律。作者设计出  $T_c$  为 16 GHz 的 7 阶步进式滤波器结构,并通过高频有限元全波仿真证明了理论分析方法以及器件设计的有效性。通过反复试验,形成了基于体硅的成套加工工艺,并加工出样品。

## 1 理论分析

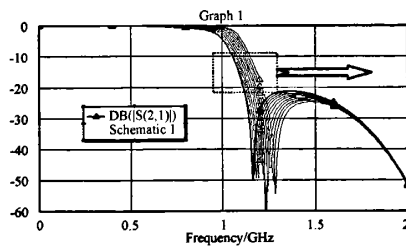
Butterworth 和 Chebyshev 滤波器为全极点型器件,衰减零点在无穷大频率处。椭圆滤波器由于引入有限传输零点,阻带衰减速率大大增加,可以近似认为 FTZ 直接决定了滤波器截止频率<sup>[5-6]</sup>。本文提出一种针对椭圆低通滤波结构的滤波特性调节方法,即通过调节 FTZ 来改变 3 dB 截止频率  $T_c$ 。解析计算表明,在小范围内改变 FTZ 位置既可调节滤波器截止频率和滚降速率,又能保证通带和阻带的性质基本不变。图 1(a)所示为一个 7 阶椭圆低通滤波器原型设计;用 Mathematica 软件计算出的频率响应如图 1(b)所示,可以看出三个传输零点的对应频率分别为 2.22 GHz, 1.22 GHz 和 1.39 GHz。改变 FTZ 所在支路的电容值会使串联谐振频率产生相应变化,该电容在原值基础上改变 -10% 到



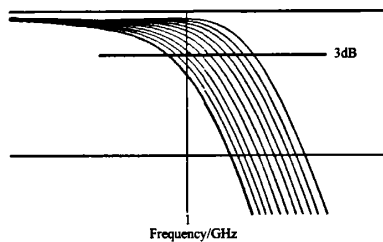
(a) 7 阶椭圆低通滤波器原型电路



(b) 低通原型滤波器的频率响应,可见其三个传输零点,其中第一传输零点为 1.22 GHz



(c) 第二支路(即第一传输零点所在的支路)电容改变 -10% 到 10% 其响应的变化,每次变化 2%



(d) 中频率响应的变化细节

图 1 7 阶椭圆低通可调滤波器电路的理论模型及其滤波特性的解析分析结果

10%(步进为 2%),其相应的响应的解析计算结果见图 1(c)和(d)。从中可看出,椭圆滤波器  $T_c$  和滚降速率直接受控于 FTZ,这表明,该谐振支路串联谐振频率的变化必然导致  $T_c$  的变化。在移动 FTZ 的同时相应移动第二传输零点,可以解决部分阻带衰减过低(衰减 < 20 dB)的问题。

作者提出,器件的串联谐振支路可为由多个基于体硅加工的、等间距分布的 MEMS 桥膜式开关电容所加载的共面波导(即分布式 MEMS 传输线, DMTL<sup>[2]</sup>)。通过有选择地驱动不同桥膜来改变支路电容值,使相应支路的串联谐振频率得到调节,就可以改变 FTZ 并实现滤波器截止频率的调节。在微波电路中,可利用 MEMS 开关实现电容加载。为便于实现采用如图 2(b)所示的 DMTL 加载方式,其等效电路如图 2(c)所示。利用微扰法进行的理论分析表明,谐振支路末端串联低阻传输线时,驱动若干个 MEMS 开关及 MIM 电容时,其谐振频率的

变化为

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = \frac{1}{2}\omega_0^2 \left( \frac{Z_0 C_{\text{MIM}}}{v_{p0}^2} + \frac{C_{\text{LOAD}}(l_1 - l_0) + l_1}{s C_i v_{p0}^2} \right) \Delta \quad (1)$$

式中,  $Z_0$  是共面波导特性阻抗,  $Z_c$  为低阻传输线的特性阻抗;  $C_{\text{LOAD}}$  是共面波导总等效加载电容;  $C_{\text{MIM}}$  为支路末端加载 MIM 电容;  $C_i$  是传输线单位长度的电容;  $s$  为 MEMS 加载桥模之间的间距;  $v_{p0}$  为各段传输线的相速;  $\Delta$  为 DMTL 增加或减少的长度,  $\Delta = ns$ ,  $n$  为驱动 MEMS 桥膜的个数, 其余参数见图 1(c)。这样可以计算由于 DMTL 加载部分长度的变化引起的谐振频率的变化, 也可以由所需的频率改变反过来估计驱动的 MEMS 开关的数目  $n = \Delta/s$ 。

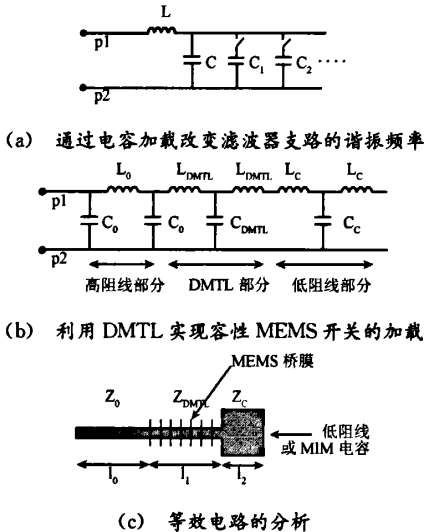
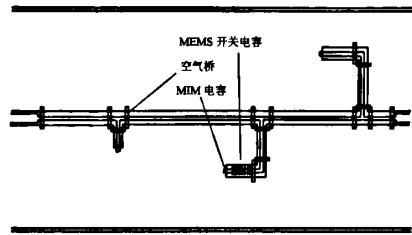


图 2 基于 DMTL 的滤波器滤波特性调节方法

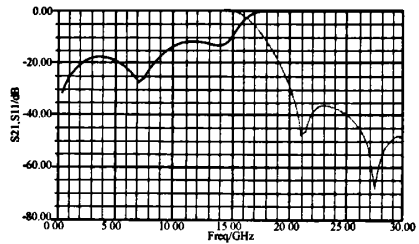
## 2 滤波器设计及其有限元全波仿真

基于上述分析结果, 本文提出了一种 7 阶可调椭圆低通滤波器设计, 其共面波导实现如图 3(a) 所示, 滤波器  $T_c$  为 16 GHz, 高阻传输线阻抗为  $90 \Omega$ ,  $G/W/G = 42.5/35/42.5 \mu\text{m}$ 。该滤波器 FTZ 为 21 GHz, 位于第二支路; 在其末端分布加载 MEMS 开关, 尺寸为  $10 \mu\text{m} \times 35 \mu\text{m}$ ; 介质层厚  $1 \mu\text{m}$ , 相对介电常数 7.6, 间距  $20 \mu\text{m}$ , 如图 3(c) 所示。未加载电容时滤波器响应如图 3(b) 所示, 其 FTZ 恰好为 21 GHz, 图 3(d) 示出了加载开关 1-5 时滤波器的响应的全波仿真结果, 可以看出, 器件具有可灵活地、数字化调节的特点。表 1 对由式 (1) 通过理论计算得到的频率变化以及全波仿真得到的频率变化[图 3(d)]进行了对比, 可见, 理论分析方法具有较高准确性, 可以用于有效地设计

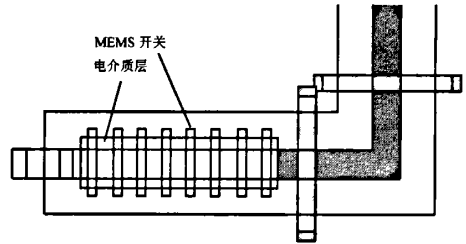
与估算器件的性能。



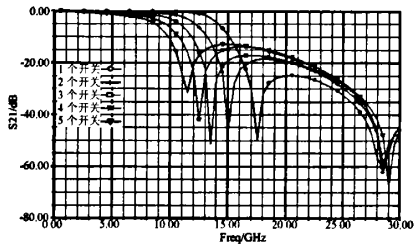
(a) 实际设计的椭圆滤波器结构



(b) 未加载 MEMS 开关时滤波器的响应特性



(c) MEMS 加载开关结构细节



(d) 分别加载 1-5 个开关后滤波器的响应

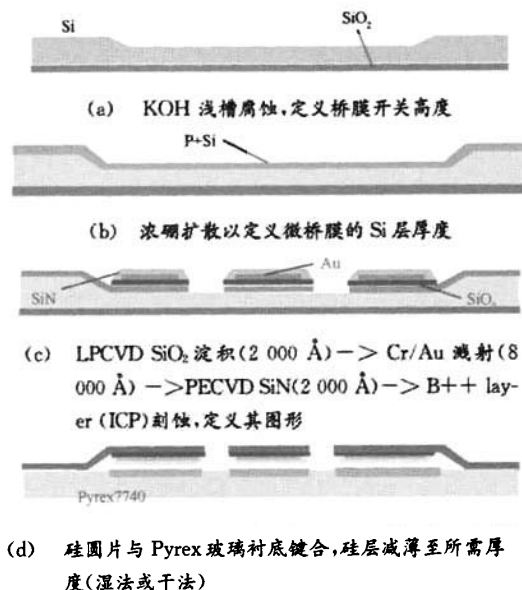
图 3 基于体硅加工的微机械开关的 7 阶可调椭圆低通滤波器设计及其滤波特性的全波分析结果

表 1 加载容性开关后第一传输零点的变化情况

加载开关个数	0	1	2	3	4	5
理论/GHz	21	17.1	15.1	13.8	12.9	12.2
仿真/GHz	21	17.5	15	13.5	12.5	11.5

## 3 MEMS 开关的工艺设计

作者在多次单项试验基础上设计出基于体硅工艺的微加工程序, 该流程及流片得到的初步结果如图 4 所示, 在此基础上可以较为容易地制作出所设计的微机械可调谐滤波器。



(e) MEMS 开关的初步工艺结果

图4 MEMS 桥膜开关的体硅工艺加工工艺流程及开关流片结果

## 4 结论

本文提出一种针对椭圆型低通滤波结构的滤波

特性调节方法,即通过调节 FTZ 来改变 3 dB 截止频率  $T_c$ ,并通过解析分析进行了验证。本文提出 FTZ 的移动可由串联谐振支路处 MEMS 开关分布加载来实现,并利用微扰法进行了理论分析,得到了分别驱动各 MEMS 开关时器件中心谐振频率及特性的变化规律。本文设计了一种  $T_c$  为 16 GHz 的 7 阶步进式滤波器。高频有限元全波仿真表明,无开关驱动时,该滤波器 FTZ 为 21 GHz,每加载一个 MEMS 开关,  $T_c$  改变约 1.5 GHz,损耗特性则几乎不变。这表明,理论分析方法具有较高的准确性,而且这种设计具有灵活的、数字化的调节能力和较出色的微波性能。理论分析还指出这种方法可望用于高通滤波器和带通滤波器。论文还介绍了器件的体硅微加工流程,目前该流程已成功加工出 MEMS 开关样品。

## 参考文献:

- [1] Lal Chand Godara, Handbook of Antennas in Wireless Communications [M], London, CRC Press, 2002.
- [2] Gabriel M. Rebeiz, RF MEMS Theory, Design, and Technology [M], USA: Wiley Interscience, 2003; 88-96.
- [3] Aline Jaimes-Vera, et al. Review on Microwave and Millimeter Filters Using MEMS Technology[C]// 17th Intl. Conf. on Electronics, Communications and Computers, 2007; 307-310.
- [4] Kamran Entesari et al. A Differential 4-bit 6.5-10-GHz RF MEMS Tunable Filter. [J], IEEE Trans. Microwave Theory Tech, March 2005, 53(3); 808-812.
- [5] Shen J, et al. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications [M]. USA: J WILEY & SONS, Inc., 2001.
- [6] Rainee N. Simons. Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems [M], USA: Wiley Interscience, 2001, 308-333.



缪 旻(1973-),男,副教授,博士,所长,2006 年入选北京市科技新星计划,目前研究方向为 RF MEMS、微惯性器件、微系统封装等, miaomin@ biti. edu. cn



卜景鹏(1981-),男,在读硕士研究生,研究方向为 RF MEMS、天线工程、图像处理等。

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题, 有资深工程师领衔主讲, 课程既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 设计原理和设计仿真实践相结合, 向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



### 微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频, 专家授课, 中文讲解, 直观易学; 既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

### 更多专业培训课程:

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>