

# 射频系统中 MEMS 谐振器和滤波器

李应良, 潘 武

(重庆邮电学院 微光机电系统研究所, 重庆 400065)

**摘要:** 介绍了目前国内外射频系统中所涉及的静电梳状谐振器、自由梁谐振器、薄膜声体波谐振器、腔结构谐振器、平行谐振器结构 HF 带通滤波器、折叠梁 MF 滤波器、分布传输线可调滤波器等 MEMS 谐振、滤波器件。对这些器件的结构原理、制造方法以及性能指标作了分析。把这些器件的性能指标和目前射频系统中谐振器、滤波器的性能要求进行比较, 分析了这些器件的应用前景。最后, 对基于 MEMS 技术的射频谐振器、滤波器发展作出展望。

**关键词:** 微机械系统; 射频系统; 谐振器; 滤波器

**中图分类号:** TN713 **文献标识码:** A

## MEMS resonators and filters in RF systems

LI Ying-liang, PAN Wu

(*Institute of MOEMS, Chongqing University of Posts  
and Telecommunications, Chongqing 400065, China*)

**Abstract:** The development of MEMS resonators and filters of RF systems including capacitive-comb transduced micro-mechanical resonator, free-free beam micro-mechanical resonator, FBAR resonator, cavity resonator, HF micro-mechanical bandpass filter, MF micro-mechanical filter, and transmission lines for tunable filter, both at home and abroad is reviewed, and the structures, performance and fabrications of these components are analyzed. The applications of these components are forecast from the performance requirements for current RF systems, and the development trend of MEMS resonators and filters is discussed as well.

**Key words:** MEMS; RF systems; resonator; filter

## 1 引言

微机械系统 (MEMS: Micro-Electro-Mechanical Systems) 技术涉及到微机械学、微电子学、自动控制、物理、化学、生物学及其材料科学等多学科, 是一个全新的多学科交叉的研究领域。MEMS 相对于宏观微机电装置而言, 其尺寸微小, 最大不超过

1 cm, 甚至仅为几个  $\mu\text{m}$ , 其厚度更薄。硅类材料是 MEMS 制造的主要材料之一, 其电气性能优良, 强度、硬度和杨氏模量与铁相当, 密度与铝相似, 热传导率接近钨; 可采用与集成电路 (IC) 类似的生成技术进行大批量、低成本生产, 与传统“机械”制造技术相比, 其性价比得到大幅度提高。目前, 在通信领域中, MEMS 研究涉及两个方向: 一是 MOEMS (Optical MEMS), 二是

收稿日期: 2003-06-20; 修订日期: 2003-11-12.

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目 (No. D2002-26); 重庆邮电学院博士科研基金项目 (No. A2002-36)

RF (Radio Frequency) MEMS。其中, RF MEMS 可简单认为是 MEMS 在无线通信领域中的应用, 它是利用 MEMS 技术制作各种用于无线通信系统中的射频元件或系统, 包括各种有源和无源器件、射频收发系统、卫星定位系统以及雷达通信系统等, 如: 片上高  $Q$  值谐振器, 滤波器、微开关、微型天线以及电感、电容、超外差接收系统等<sup>[1-2]</sup>。

RF 系统提出小型化、轻量化、智能化、低功耗和低成本要求, 如目前的移动通信手机、英特网商务无线接入系统、蓝牙系统、全球定位系统等均是提出这些要求的典型<sup>[3]</sup>。近年来, 国内、国际上对 RF MEMS 作了一些研究, 取得了一些突破。在无线通信系统中使用 MEMS 射频元件具有可增加系统的工作频率带宽, 可不使用分离无源元件、互连损耗极其微小, 并和现有的 IC 工艺兼容, 适宜批量生产等优点。可以看出, RF MEMS 是满足上述器件或系统要求的新技术, 有望给无线通信系统带来新的变化。

## 2 MEMS 谐振器和滤波器研究的必要性

当今, 无线通信系统正向微型化、低功耗、高频率、高信噪比和多功能方向发展。表 1 列举了在不同无线通信系统中的频段范围。

表 1 不同无线通信系统中应用频率表

Tab. 1 Frequency of different wireless applications			
调幅与调频通信	蜂窝通信与个人通信	卫星通信与雷达通信	无线局域网, 汽车通信
88 ~ 108 MHz	0.8 ~ 2 GHz	~ 20 GHz	~ 70 GHz

从表 1 可以看出, 无线通信系统通信频带正逐渐向高频段发展, 而伴随无线系统工作频段的升高, 对 RF 器件 (或系统) 提出了更高的要求<sup>[4]</sup>: (1) 多功能性, 在同一片上包含多个发射和接收器件; (2) 低功耗; (3) 线性好, 即互调制失真小; (4) 频率选择灵活, 如可使用窄带滤波实现。微波和毫米波通信系统中的瓶颈之一是在匹配电路中缺乏高  $Q$  值 ( $\sim 1\,000$ ) 无源元件, 如电感器、电容器、谐振器、滤波器等。目前, 利用标准 IC 工艺加工出来的无源元件的  $Q$  值较低, 如片上螺旋电感器, 其  $Q$  值不到 10; 而片外螺旋电感器, 其  $Q$  值也只在 100 左右, 而谐振器、

滤波器的  $Q$  值要超过 1 000 很难。如何获取高  $Q$  值 ( $\sim 1\,000$ ) 谐振器、滤波器是当前微波/毫米波外差式收发器研究的热点之一, 解决办法之一是在系统中使用大量的 SAW (Surface-Acoustic-Wave) 器件, 但不易实现系统的微型化和低功耗<sup>[5]</sup>, 而使用 MEMS 技术, 可实现装置或系统的微型化<sup>[6]</sup>。

显然, 利用传统的设计和制造方法研制的射频器件很难适应无线系统的发展。人们一直在探索新技术来满足其发展要求, 其中 RF MEMS 技术最引人注目, 它具有很多特点: (1) 一般采用静电驱动, 器件功耗降低; (2) 利用与传统的 IC 工艺兼容的硅微机械加工技术, 可实现片上微机械元件 (开关、变容二极管、电感器); (3) 集成化, 可与相关处理电路集成, 形成片上无线通信系统, 从而降低系统尺寸; (4) 生产的批量化<sup>[7]</sup>, 在同一硅片上制造成百上千的 RF MEMS 器件, 可显著降低生产成本。

根据安捷伦公司保守预测, 目前的第三代移动通信系统 (3G: 3rd generation mobile phone) 中, 将会有超过 100 项的应用都可由 RF MEMS 技术提供, 其中有多项与 MEMS 谐振器、滤波器有关。作为射频系统中的重要组成部分, 谐振器和滤波器直接关系到整个射频系统的性能, 特别是在未来无线通信系统中对高  $Q$  值的谐振器、滤波器将需求更大。研究表明, 这些器件可以通过 RF MEMS 技术获得。

## 3 MEMS 谐振器和滤波器

### 3.1 微机械谐振器

在无线收发器中, 常规的谐振器  $Q$  值已达到 10 000 ~ 25 000<sup>[3]</sup>。采用 CMOS 工艺加工的微机械谐振器力图达到此性能, 但在低功耗、器件微型化等方面的优势远远超过常规谐振器。目前的微机械谐振器主要有静电梳状结构谐振器、自由梁谐振器和薄膜声体波谐振器、腔结构微机械谐振器 4 类。最近美国 Michigan 大学公布了一种新型的碟片谐振器, 其频率可达到 156 MHz,  $Q$  超过了 9 400, 但该器件存在偏置电压高和真空封装等问题, 离实际应用还有一段距离。

#### 3.1.1 静电梳状结构谐振器<sup>[8-9]</sup>

静电梳状结构由 Tang 等人于 1989 年提出,

其结构简单, 制造上能与集成电路工艺兼容, 可应用到微机械谐振器中, 图 1 为梳状结构微机械谐振器示意图。它主要由静电梳状电容器、可动电极、挠性支撑梁、固定端、接地面和固定电极构成。叉指电容的可动叉指与可动极板连成一体, 固定叉指与固定电极相连, 可动极板通过支撑梁与固定端相接。在梳状叉指间的静电力作用下, 可动极板发生位移, 使支撑梁发生形变; 若施加的是交变信号 (如  $V(t) = V_{dc} + V_{ac} \cos t$ ), 则可动极板在静电力与支撑梁的弹性力作用下产生振动, 当驱动电压的频率与活动梳状结构系统的固有频率一致时, 活动梳系统便发生谐振。在活动梳振动的同时, 梳齿间交叠部分的面积发生变化, 导致齿间的电容变化, 最后实现机电转换功能。在图中,  $V_{PI}$  为偏置电压,  $v_i$  为交流驱动电压, 固定和可动叉指分别被置于固定负电位和零电位。

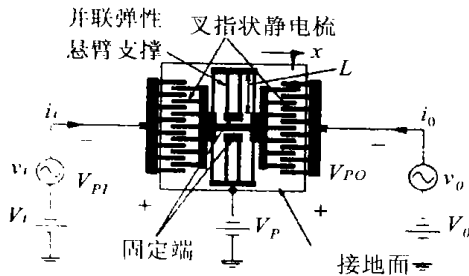


图 1 静电梳状结构谐振器结构

Fig. 1 Overhead view of a two-port, folded-beam and lateral comb-driven resonator

考虑到微机械装置和 CMOS 的集成, 该器件利用 MICS (Modular Integration of CMOS and Microstructures) 工艺制造。在约为 2.7 Pa 的真空条件下, 该谐振器的谐振频率为 100 kHz, 其  $Q$  值可达 51 000; 如果进一步提高真空度,  $Q$  值可超过 80 000, 从而可将该微机械谐振器用于高  $Q$  值、低频率振荡器中。

### 3. 1. 2 自由梁谐振器<sup>[10]</sup>

图 2 是一种沿侧面振动的自由梁 (FF: Free-Free Beam) 微机械谐振器, 它采用二阶模挠性支撑和优化的直流偏压抑制固定端 (anchor) 损耗, 从而可获得很大的  $Q$  值。测试表明, 在频率为 10.47 MHz 时, 其  $Q$  值超过 10 000。近期研究表明, VHF (Very High Frequency) 微机械自由梁谐振器的  $Q$  值超过了 3 000, 有望用于无线通信收

发器的带通滤波器和低相位噪声参考振荡器的高  $Q$  值振荡回路。

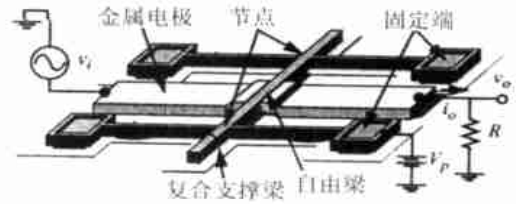


图 2 自由梁微机械谐振器结构示意图

Fig. 2 Lateral FF-beam micromechanical resonator and test circuit

如图 2 所示, 谐振器中的自由梁通过 4 根挠性支撑梁悬浮在金属电极之间。一侧的金属电极与自由梁之间通过电容变化激励, 通过检测另一侧电极与自由梁之间的振动感应而实现谐振器的谐振。在两支支撑梁的节点位置, 利用自由梁将它们结合起来构成一复合梁。在自由梁的基模频率, 复合梁以二阶模式谐振, 从而在复合梁和自由梁的节点位置获得一个高阻抗 (理论上是无限的即绝缘状态), 从而具有很小的能量损耗。实际的谐振器谐振频率是电刚度和无机电耦合时的理想自由梁谐振频率的函数。因此, 在一定耦合条件下, 谐振器可获得较高的  $Q$  值。

自由梁谐振器采用多晶硅表面微细加工技术、金属电镀和牺牲侧壁隔片 (sacrificial sidewall spacer) 工艺制造, 低损耗电极与谐振子之间的间隙不到 0.1  $\mu\text{m}$ 。该器件的谐振频率可达 10.47 MHz, 具有较高的  $Q$  值, 可用于无线通信系统的高  $Q$  值振荡器和滤波器中。

### 3. 1. 3 薄膜体声波谐振器

目前无线通信系统不断向高频段发展, 上面介绍的两类微机械谐振器, 其谐振频率都较低 (实际上, 可通过减小谐振子的尺寸来获取高频率, 但这给加工带来了很大的难度), 最高的不到 1 GHz。目前在高频段, 薄膜体声波谐振器 (FBAR: thin-film bulk acoustic resonators) 具有较大的发展潜力, 它可和射频系统前端滤波器集成, 实现射频系统的微型化, 其谐振频率可达 1.5~7.5 GHz。薄膜声体波谐振器 FBAR 是利用压电材料薄膜中激励的体声波 (而不是表面声波) 做成的谐振器, 图 3 (a) 就是一种典型薄膜体声波谐振器, 它由导体间的三明治式淀积的压电薄膜构成, 并置于另一薄膜上与基底作声学

隔离<sup>[11]</sup>，这样在 FBAR 的上下金属间夹有一层压电薄膜材料（例如氮化铝）。通过对图 3（a）所示结构进行一定的改进，可克服支撑薄膜的结构完整性问题。如图 3（b）所示，直接在固体基底上建造薄膜谐振器，其结构更加稳定<sup>[12]</sup>。目前已实现  $Q$  值超过 1 000 的 FBAR 与基于陶瓷的产品相比较，FBAR 在微型化方面占有绝对的优势。FBAR 特性已达到目前 CDMA（code division multiple access）和 PCS（personal communication services）陶瓷双工器的性能标准。2003 年安捷伦公司宣布该公司已经研制出基于 FBAR 的滤波器，该滤波器有望取代目前 CDMA 手机设计中采用的 SAW 器件，规格仅为 3 mm × 3 mm，在 1 850 ~ 1 910 MHz 发射波段上的最大插入损耗为 3.5 dB，在 1 930 ~ 1 990 MHz 接收波段上的最小衰减为 33 dB（典型衰减为 40 dB），工作温度范围是 - 30 ~ + 85 °C，已有 6 大 CDMA 手机制造商与安捷伦公司签约使用该项技术。

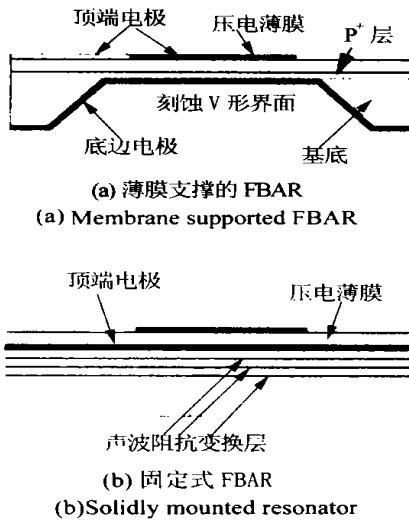


图 3 两种薄膜体声波谐振器的截面图

Fig. 3 Cross-sections of two thin-film bulk acoustic resonators

### 3. 1. 4 腔结构微机械谐振器<sup>[13]</sup>

腔结构微机械谐振器是另一种类型的谐振器件，主要是沿用介质谐振器的一些理论来研究，采用微细加工技术加工得到的。如将其应用在目前的微波/毫米波及其以上波段的无线通信系统中，可解决目前无线通信系统中很难得到的高  $Q$  值、高频率（几 GHz ~ 几十 GHz）低插损谐振器问题。

图 4 是一种基于腔结构的微机械谐振器，其谐振频率可达到 30 GHz，它采用的是一种微机械波导结构用体微细加工技术制造的，制造时充

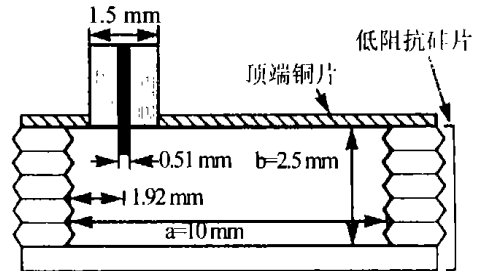


图 4 微机械硅腔结构谐振器 (30 GHz)

Fig. 4 Micromechanical silicon cavity resonator (30 GHz)

分考虑叠层晶片之间的空气间隙等因素的影响。对硅片作双面刻蚀，并将所用晶片层叠在一起，形成了一个横截面不变且深度较深的谐振腔。除了腔的上表面（铜）以外，所有晶片被键合之后，均要镀上金属，在顶端平板和腔之间，仅仅是临界键合（critical bond）。内腔壁金属化可减小晶片键合时产生的空气间隙的影响，从而获得高  $Q$  值谐振腔。谐振腔衬底可采用高性能毫米波基底材料（如 GaAs），有利于与高速电路集成。腔结构由 5 块低电阻率的硅晶片组成，每块 2 硅片厚度为 0.5 mm。在 KOH 溶液中对硅片作双面刻蚀。采用块规（gauge blocks）将 5 块晶片在垂向边缘对准。最后，使用硅酸钠粘剂将 5 块硅片和未蚀刻的腔底键合在一起。在电镀谐振腔之前，要先应用化学电镀在腔上镀上一层金作为第 1 种子层，然后在种子层上再电镀一层厚度约为 25 μm 的铜膜。该器件频率为 30 GHz 时，其  $Q$  值达到了 2 050。该谐振器可应用在 LMDS（local multipoint distribution systems）或 PCS（personal communication services）系统中的毫米波振荡器、低损耗滤波器和低相位噪声振荡中。

### 3. 2 微机械滤波器

滤波器在无线收发器中实现双工、镜像消除、寄生滤除和信道选择等功能<sup>[14]</sup>，目前主要使用 SAW 滤波器来实现这些功能。它较高的  $Q$  值，但它不能实现微型化，和整个射频系统集成较为困难。目前微机械滤波器有两端固支梁微机械滤波器、折叠梁微机械滤波器以及微带线微机械滤波器等几种类型。

### 3. 2. 1 HF (High Frequency) 微机械带通滤波器

在无线通信系统中的高频段, 使用微机械技术实现的带通滤波器具有高  $Q$  值、低功耗、可调频率和带宽, 利于和其他有源、无源器件集成等优点。图 5 就是一种 HF 微机械滤波器结构示意图<sup>[15]</sup>, 它由 2 个并行放置的 2 端固定支梁微机械谐振器组成, 形成一种平行结构。构成微机械滤波器的 2 个微机械谐振器的几何形状和谐振频率几乎相同, 导电条 (conductive strip) 位于微机械谐振器的中心区域的下方, 用作电容变换器电极 (capacitive transducer electrode)。微机械谐振器梁悬浮在距离基片  $0.1 \mu\text{m}$  处, 经过导电条把 2 个谐振器电性连接在一起, 而导电条同时也用作该装置的输出电极, 其设计可参考 Butterworth、Chebyshev 或 Bessel 滤波器设计规则。当它们的中心频率在  $14.5 \text{ MHz}$  附近时, 这几种滤波器的  $Q$  值为  $830 \sim 1\,600$ 。

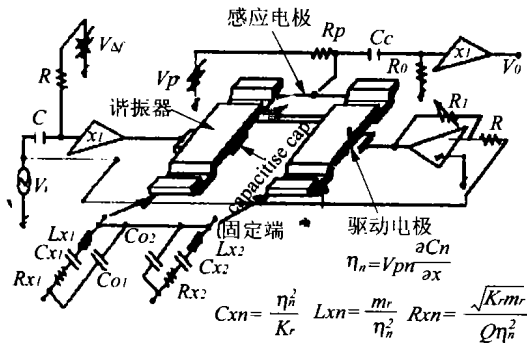


图 5 平行谐振器结构滤波器示意图  
Fig. 5 Schematic of parallel-resonator filter

该微机械滤波器采用掺  $\text{POCl}_3$ , 多晶硅表面微细加工技术制造。在整个设计过程要尽量减少寄生现象。对于所设计的 Butter Worth 滤波器, 用 HP4195A 网络分析器测试, 在压力约为  $3 \text{ Pa}$ ,  $V_p = 40 \text{ V}$ ,  $V = 2.63 \text{ V}$ ,  $V_i = 5 \text{ mV}$ ,  $R_Q = 10 \text{ k}$  的条件下, 测得其  $Q$  值为  $1\,000$ , 插入损耗为  $13 \text{ dB}$ , 衰减带抑制 (stop band rejection) 为  $24 \text{ dB}$ 。若采用 Chebyshev 滤波器或线性相位 Bessel 滤波器的话, 则会有约  $1 \text{ dB}$  纹波损耗, 约  $2.36 \text{ dB}$  的插入损耗。

### 3. 2. 2 折叠梁 (挠性梁) 微机械滤波器<sup>[16-17]</sup>

利用折叠梁谐振器可实现 MF (medium frequency) 滤波器, 其  $Q$  值可达到  $813$ , 衰减带抑制

超过  $64 \text{ dB}$ , 插入损耗为  $0.5 \text{ dB}$ , 可达到常规滤波器 (如石英晶振滤波器) 的水平, 而在微型化, 功耗等方面远远超过常规滤波器件。图 6 为折叠梁滤波器的结构图, 由 3 个静电梳状谐振器通过软的、挠曲型弹簧在其折叠桁架处机械耦合而成。输入信号、输出信号从构成滤波器的 2 端谐振器输入输出, 其中的电容梳状变换器可增强滤波器的线性, 另外可在这些谐振器 (如中间的谐振器) 上装配平行板电容变换器来调节其工作频率。

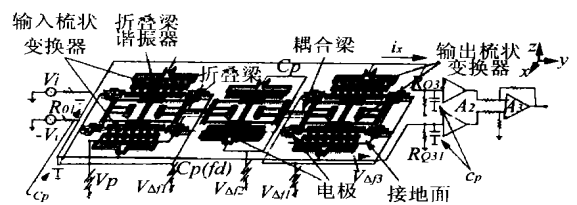


图 6 折叠梁微机械滤波器结构

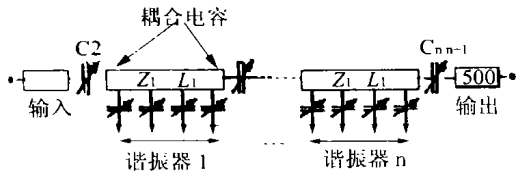
Fig. 6 Schematic of a folded-beam and three-resonator micromechanical filter

滤波器工作时, 直流偏置电压  $V_p$  加在可动的悬置结构上, 而不同的交流信号 ( $V_i$  和  $-V_i$ ) 通过控  $Q$  输入电阻  $R_{Q11}$  和  $R_{Q12}$  加在输入谐振器的 2 个相反的端口, 如图 6 所示。这样, 不同极性的输入信号对称地加在输入谐振器的两端, 在输入谐振器上就会产生推挽式的静电力, 因此当输入电压信号的频率处于微机械滤波器的通频带范围内时, 在静电力作用下, 将产生机械振动。振动能经过耦合弹簧输入到中间谐振器, 进而到达末端谐振器, 使得它们也开始振动, 从而输出谐振器就会在谐振器和各个电极之间产生直流偏置、时间变化的电容, 随着电容的变化, 将产生电流。最后, 得到的电流  $i_{31}$  和  $i_{32}$  直接输入到缓冲器  $A_1$  和  $A_2$  中。折叠梁微机械滤波器以掺杂多晶硅作为加工材料, 利用表面微细加工技术制造, 低速耦合。

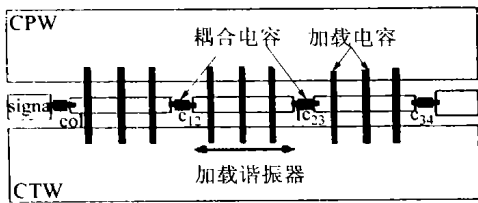
### 3. 2. 3 分布式 MEMS 传输线微机械滤波器<sup>[18]</sup>

采用 DTML (distributed MEMS transmission line) 可获得微机械滤波器, 此谐振器基于 DMIL 结构。其中 DMIL 是一种利用连续可变 MEMS 电容器周期加载的共面波导 (coplanar waveguide)。可调带通滤波器可在  $700 \mu\text{m}$  厚的玻璃上制造, 使用 3 个电容耦合 DMIL 段作为可变并联谐振器,

其滤波器结构如图 7 所示。DMTL 由一些可变 MEMS 电容周期加载、高阻抗 ( $> 50 \Omega$ ) 的传输线组成。图 7 (a) 为一基于 DMTL 的窄带带通滤波器, 可将它看作是一电容间隙耦合 (capacitive gap-coupled) 传输线滤波器, 每段传输线长度约为频带中心波长的一半, 耦合电容根据滤波器的带宽加以选择。图 7 (b) 显示的是一个带通可调滤波器, 它可采用容性耦合谐振器 (capacitively coupled resonators) 的通用设计方法设计。各个谐振器之间采用微机械电容 ( $C_{i-1,i}$ ) 耦合, 滤波器中心频率约为 20 GHz。此带通可调微机械滤波器可在一块厚度为 700  $\mu\text{m}$  的玻璃片上采用标准的 IC 工艺制造, 其尺寸为 8.3 mm  $\times$  1.1 mm。共面波导 (CPW) 为 1  $\mu\text{m}$  厚蒸镀金 (evaporated gold), 其中心信号线宽度为 150  $\mu\text{m}$ , 接地面之间距离为 300  $\mu\text{m}$ 。频率为 20 GHz 时, 该器件的插入损耗为 3.6 dB, 并且还有进一步的发展空间, 可应用于微波、毫米波段的无线通信系统 (如卫星通信, 雷达通信) 收发器中。



(a) 基于 DMTL 容性耦合可调滤波器结构图  
(a) Topology of capacitively coupled tunable filter based on DMTL resonators



(b) 基于共面波导可调滤波器结构  
(b) Layout of three section tunable filter in coplanar-waveguide form

图 7 可调滤波器结构

Fig. 7 Structure of tunable filter

### 4 MEMS 谐振器和滤波器展望

无线通信系统正朝着信息获取的实时化、集成化、微型化、智能化、低成本方向发展。RF MEMS 技术可使无线通信系统的射频部分具有集成、微型、灵活、实用、时间连续、信息传递快速, 成本低等特点。当前世界许多国家都在积极

研究利用 MEMS 技术实现射频系统中的各种有源、无源器件, 并将它们集成到一块芯片上 (或微系统), 完成信息获取、传输、处理和执行等功能。In-stat/MDR 公司预测, RF MEMS (主要是 RF MEMS 元器件以及无线 MEMS 传感器) 市场将从 2001 年的大约 100 万美元增长到 2006 年的 3.5 亿美元。目前, 供应商们还出售 RF MEMS 的知识产权, 使 MEMS 的知识产权与系统所需的每一个功能模块一道集成到系统级的 ASIC (专用集成电路) 中去<sup>[19]</sup>。

目前, MEMS 谐振器、滤波器的研究取得了一些突破, 特别是在无线通信的低频 (LF)、中频 (IF) 和 高频 (HF) 段中取得了一些应用。但要真正跟上无线通信的发展, RF MEMS 谐振器、滤波器技术还有很多问题有待探索 and 解决。

(1) MEMS 谐振器、滤波器相关材料的研究。目前使用的微机械材料总体上来说还是沿用 IC 材料, 但加工三维的谐振器、滤波器件时, 传统材料的性能 (如: 截止频率太低) 已不能满足。要解决这些问题, 需要研究新型材料 (如: 纳米材料)。

(2) 进一步研究微尺度下微机械元件和系统的相关物理规律 (如微尺度电磁场感应、热感应、力学效应), 弄清 MEMS 谐振器、滤波器的工作机理。

(3) 进一步作好 RF MEMS 计算机辅助设计工作。当前, 在微机械系统研究领域, CAD 工具的发展水平远远落后于前沿研究的步伐<sup>[20-21]</sup>。RF MEMS 技术应用在无线通信系统中, 它的 CAD 技术主要包括微机械技术仿真和无线通信理论技术仿真, 中间夹杂交叉学科仿真, 这就给器件 (系统) 仿真实现带来了困难, 需要多国家、多单位进行研究协作, 争取早日实现全部 RF MEMS 器件 (系统) 研制过程的计算机辅助设计, 从而缩短研发成本和开发周期。

(4) 微细加工技术研究。如何加工出复杂的 RF MEMS 器件 (如: 谐振器、滤波器), 工艺是实现无线射频微系统集成的关键。当前的微细加工技术主要沿用 IC 的一些工艺, 较难加工出复杂的三维结构且可重复性较差, 即使使用专门的微细加工技术工艺 (如: LIGA 技术) 也存在很多不足, 其中一点就是与 IC 的兼容性差。这就需要研究新的微细加工工艺以满足 RF MEMS 器件与 IC 兼容性且容易加工出复杂形状的微机械器件 (系

统)。

(5) MEMS 谐振器、滤波器的封装测试技术。随着 MEMS 器件的复杂化, 系统的微型化, 为了确保微细加工产品的质量, 要求各个微型器件之间的加工精度达到纳米级<sup>[22]</sup>, 这对 MEMS 谐振

器、滤波器的封装测试要求更高。传统的半导体工艺封装测试技术已不能满足要求, 需要探索新的封装测试技术, 以便处理好各个微小器件之间的信号干扰和机械影响等问题。

#### 参考文献:

- [1] 刘泽文, 刘理天. RF MEMS 器件面面观 [J]. 世界电子元器件, 2002, 1 (1): 23-25.  
LIU Z W, LIU L T. Introduction of RF MEMS devices [J]. *Global Electronics China*, 2002, 1 (1): 23-25. (in Chinese)
- [2] 潘武, 钟先信, 巫正中. 微机械微带贴片天线研究 [J]. 光学 精密工程, 2001, 9 (3): 304-310.  
PAN W, ZHONG X X, WU ZH ZH. Study of micromachined microstrip patch antenna [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9 (3): 304-310. (in Chinese)
- [3] 云振新. RF/微波无线系统中的 MEMS 技术 [J]. 微纳电子技术, 2002, (2): 6-12.  
YUN ZH X. MEMS technology in RF/microwave wireless systems [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2002 (2): 6-12. (in Chinese)
- [4] Yong- Kweon. RF MEMS and applications [J]. *Microwave Journal*, 2002, (3): 4-48.
- [5] NGUYEN C T C. Micromechanical components for miniaturized low-power communications [C]. *Proceedings, 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium RF MEMS Workshop Anaheim, California*, 1999, 18: 48-77.
- [6] HANE K. Silicon optical MEMS: optical components and sensors [J]. 光学 精密工程, 2002, 10 (6): 632-633.  
HANE K. Silicon optical MEMS: optical components and sensors [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2002, 10 (6): 632-633. (in Chinese)
- [7] 赵晓峰, 温殿忠. MEMS 研究与发展前景 [J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2002, 19 (1): 64-69.  
ZHAO X F, WEN D ZH. Research and prospects in future for MEMS [J]. *Journal of Natural Science of Heilongjian University*, 2002, 19 (1): 64-69. (in Chinese)
- [8] TANG W C, NGUYEN T H, HOWE R T. Laterally driven polysilicon resonant microstructures [J]. *Sensors and Actuators A*, 1989 (20): 25-32.
- [9] NGUYEN C T C. Micromechanical resonators for oscillators and filters [C], *Proceedings of 1995 IEEE International Ultrasonics Symposium*, Seattle, 1995, 7-10: 489-496.
- [10] TSU W T, CLARK J R, NGUYEN C T C. Q-optimized lateral free-free beam micromechanical resonators [C], *Digest of Technical Papers, the 11th Int. Conf. on Solid-State Sensors & Actuators (Transducers 01), Munich, Germany*, 2001, (6): 1110-1113.
- [11] 潘武, 钟先信, 巫正中. 无线通信系统中的微尺度射频元件 [J]. 光学 精密工程, 2001, 9 (4): 304-310.  
PAN W, ZHONG X X, WU ZH ZH. Microscale RF components in wireless communication system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9 (4): 304-310. (in Chinese)
- [12] NGUYEN C T C. Communications applications of microelectromechanical systems [C], *1998 Sensors Expo*, San Jose, CA, 1998, (5): 447-455.
- [13] STICKEL M, ELEFTHERIADES G V, KREMER P. A high-Q bulk micromachined silicon cavity resonator at Ka-band [C], *Electronics Letters* 29<sup>th</sup>, 2001, (3): 433-435.
- [14] GROEJ B, LARSON L E, 杨家玮, 等. CDMA 无线电设计 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002, (8): 130-133.  
GROEJ B, LARSON L E, YANG J W, et al. *CDMA mobile radio design* [M]. Beijing: Pbsts & Telecommunications Press, 2002, (8): 130-133. (in Chinese)
- [15] CLARK J R, WONG A C, NGUYEN C T C. Parallel-resonator HF micromechanical bandpass filters [C], *Digest of Technical Papers, 1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, Chicago, Illinois, 1997, (6): 1161-1164.
- [16] NGUYEN C T C. Microelectromechanical devices for wireless communications (invited) [C]. *Proceedings, 1998 IEEE International Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, Heidelberg, Germany, 1998, (1): 1-7.
- [17] NGUYEN C T C. Frequency-selective MEMS for miniaturized communication devices (invited) [C], *Proceedings, 1998 IEEE Aerospace Conference*, Snowmass, Colorado, 1998, 3 (1): 445-460.
- [18] LIU Y, BORGIOI A, NAGRA A S, et al. Distributed MEMS transmission lines for tunable filter applications [J], 2001 *John*

Wiley & Sons, Inc. *Int J RF and Microwave CAE*, 2001, (3): 254-260.

- [19] 吴群, 付佳辉. MEMS 射频与微波技术新进展 [J]. 电子器件, 2001, 24 (4): 319-325.  
WU Q, FU J H. Recent advances in MEMS technologies for RF and microwave applications [J]. *Journal of Electron Devices*, 2001, 24 (4): 319-325. (in Chinese)
- [20] 季国顺, 张永康. 微机械系统建模与仿真技术研究 [J]. 光学 精密工程, 2002, 10 (6): 626-631.  
JI G SH, ZHANG Y K. Study of the technology of modeling and simulation of MEMS [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10 (6): 626-631. (in Chinese)
- [21] 潘武, 钟先信, 刘积学. 微机电系统 (MEMS) 的仿真和模型分析 [J]. 光学 精密工程, 2003, 11 (1): 30-36.  
PAN W, ZHONG X X, LIU J X. Simulation and model analysis of MEMS [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 11 (1): 30-36. (in Chinese)
- [22] ZHAO H J. Heterodyne testing technique and its applications in micro-machining [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11 (1): 98-103.  
赵慧洁. 适合于微细加工的外差探测技术及应用 [J]. 光学 精密工程, 2003, 11 (1): 98-103. (in Chinese)

**作者简介:** 李应良 (1979-), 男, 贵州册亨人, 1999 年毕业于贵州工业大学应用电子技术专业, 获工学学士学位, 现为重庆邮电学院光电工程学院 2001 级研究生, 研究方向为 RF MEMS, MOEMS, 无线通信;  
潘武 (1966-), 男, 四川大英人, 1989 年 7 月毕业于重庆大学应用物理专业, 1995 年毕业于重庆大学光学仪器专业, 获工学硕士学位, 2001 年 6 月毕业于重庆大学精密仪器及机械专业, 获工学博士学位, 现为重庆邮电学院副教授, 主要研究方向为微光机电系统技术和光信息科学技术等, 已在国内外期刊和会议上发表论文 20 余篇。