

[文章编号] 1007-7405(2005)02-0114-07

· 综 述 ·

# RF-MEMS 器件及其关键工艺技术

陈华君<sup>1,2</sup>, 郭东辉<sup>1</sup>

(1. 厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005 2. 厦门睿智微电子科技有限公司, 福建 厦门 361005)

[摘要] 综合介绍目前无线通讯产品中使用的各种类型 RF-MEMS 器件, 统一说明 RF-MEMS 器件的基本工作原理, 并分析 RF-MEMS 器件加工的关键工艺技术及设计制作时应注意的问题。

[关键词] 射频器件; 微电子机械系统; RF-MEMS; 工艺技术

[中图分类号] TN 61

[文献标识码] A

## 0 引言

在无线通讯系统的传统射频电路中, 元器件的体积较大, 无法实现单片集成设计与系统小型化, 且随着系统工作频率不断提升的要求, 各电路元件的损耗也随之变大. 近年来, 微电子机械系统 (MEMS) 加工技术已日益成熟, 它可以为无线通讯系统向低功耗、更高频和小型化方向发展提供良好的解决方案. 目前, 采用 MEMS 加工技术可以批量加工出尺寸在微米到毫米的射频 (RF) 器件或器件阵列, 这些射频器件或器件阵列通常称为 RF-MEMS. RF-MEMS 不仅在体积上小于传统射频器件, 易于单片集成, 且其性能也优于传统射频器件, 如 MEMS 开关具有比 FET 和 P-N 二极管更低的插损和功耗<sup>[1]</sup>. 此外, RF-MEMS 还可以实现器件多功能配置, 如可重构天线<sup>[2-4]</sup>. 因此, RF-MEMS 近年来已成为全世界范围内的研究新热点.

## 1 RF-MEMS 器件类型

目前比较成熟的 RF-MEMS 器件主要有:

射频开关、可变电容、微型电感、谐振器、移相器、天线等.

### 1.1 射频开关

基于 MEMS 工艺的射频开关有很多种, 从电路结构上看, 可分为串联形式和并联形式的开关; 从机械结构上看, 可分为悬臂型 (图 1 所示) 和空气桥型的开关 (图 2 所示); 从接入方式上看, 可分为电阻式 (金属-金属) 和电容式 (金属-绝缘体-金属) 的开关. 不管是什么类型的射频开关, 目前大家关心的主要是以下 3

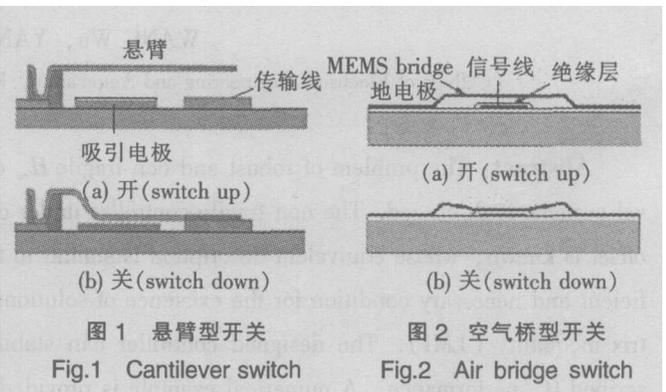


图 1 悬臂型开关

Fig.1 Cantilever switch

图 2 空气桥型开关

Fig.2 Air bridge switch

[收稿日期] 2004-11-01

[基金项目] 福建省自然科学基金项目 (A0410007)

[作者简介] 陈华君 (1977-), 男, 博士生, 从事 MEMS 天线研究. 通讯联系人: 郭东辉 (1967-), 男, 教授, 博导, E-mail: dhgu@xmu.edu.cn

个方面的性能:

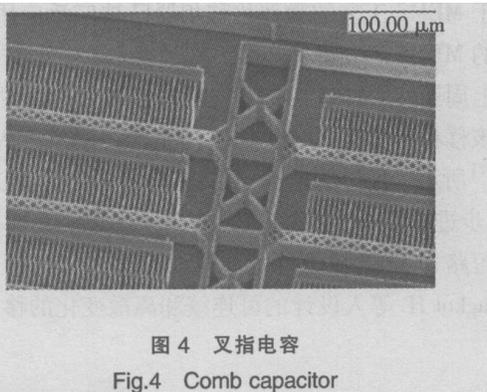
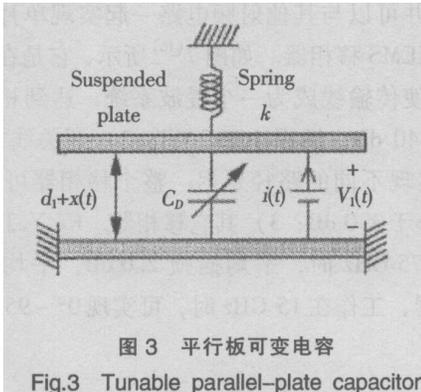
1) 在更高的频率上实现低插入损耗和高隔离度. 如 Rizk 等人所研制出的 T 型 MEMS 开关在 80~110 GHz 频率范围内具有 -20 dB 的隔离度和  $(0.25 \pm 0.1)$  dB 的插损; 他们研制出的另一种  $\pi$  型 MEMS 开关在 75~110 GHz 频率范围内的隔离度为 -30~-40 dB, 在 90 GHz 时的插损为  $(0.4 \pm 0.1)$  dB<sup>[5]</sup>.

2) 低激励电压. 一般电容式薄膜开关设计的驱动电压 (20~80 V) 对于许多应用来说是太高了. 最近 Pacheco 等人设计了一种只需 9 V 电压的静电驱动开关<sup>[11]</sup>, 但它的响应时间较长. 为了缩短响应时间, 提高开关速度, 文献 [6] 提出了双脉冲波形电压驱动的 MEMS 开关.

3) 单刀多掷. 在当今的无线通讯系统中通常需要开关矩阵, 单刀多掷开关可以简化大尺寸开关矩阵的集成问题. 如 Daneshmand 等人提出的一个集成 SP3T MEMS 开关<sup>[7]</sup>, 它的 3 个悬臂梁的窄宽度顶端位于 1 个共面传输线上.

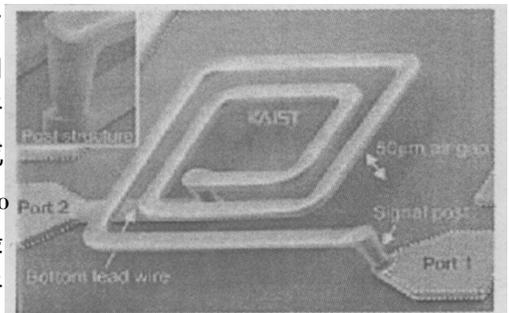
### 1.2 可变电容

基于 MEMS 的可变电容具有 Q 值高、损耗小、调节范围宽等优点, 可以用来替代片外电感或片外压控变容二极管实现射频电路如压控振荡器 (VCO)、调谐滤波器等单片集成. 当前主要有平行板结构和叉指结构这两种类型的 MEMS 可变电容. 其中, 平行板结构可变电容如图 3 所示<sup>[8]</sup>, 它是通过外加电压来调节在微机械弹簧悬浮面上的电极与衬底电极间的垂直距离, 以实现电容大小的调节, 其可变范围为 50%; 而叉指结构的可变电容是通过改变梳状交错程度来调节电容的有效面积, 如 Larson L. E. 等人于 1991 年就提出这种结构的 MEMS 可变电容, 它是利用一个静电滑动电机驱动梳状结构运动, 以改变叉指梳状电极的重叠面积, 其叉指重叠距离变化范围为 150~375  $\mu\text{m}$  时, 其电容值变化范围是 35~100 pF.<sup>[9]</sup> 最近, Bowick 等人研制出来的 MEMS 可变电容如图 4 所示, 其电容值最大约为 12 pF, 具有大于 8.4:1 的调节范围, 驱动电压范围为 3~30 V, 在 700 MHz 以内其 Q 值大于 10Q, 在 2.25 GHz 以内其 Q 值仍大于 30<sup>[10]</sup>.



### 1.3 微型电感

电感最重要的性能指标是 Q 值. 目前的集成电路芯片工艺是在硅衬底上将电感制作成平面螺旋形的微型电感, 由于衬底介质存在损耗问题, 因此, 无法实现高 Q 值. 基于 MEMS 工艺的高 Q 值电感是采用体微加工去除部分衬底或表面微加工去除牺牲层, 使电感悬浮于衬底上, 如 Jun-Bo Yoon 等人设计的电感 (图 5 所示), 它在 6 GHz 时 Q 值的最大值为 7Q, 1 GHz 时电感量为 1.38 nH, 自谐振频率高于 20 GHz<sup>[11]</sup>.



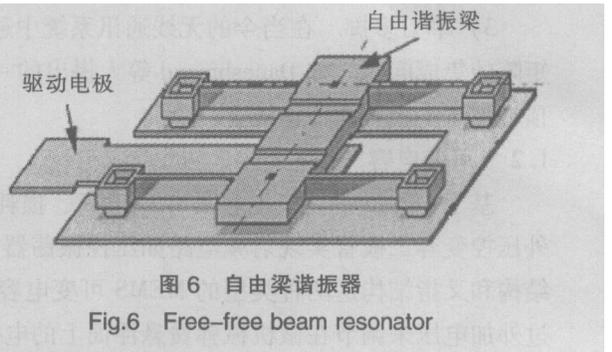
同样, 基于 MEMS 的微型电感还可以设计成可调的.

它通常是利用线圈之间距离不同导致磁耦合系数和互感变化的原理, 通过机械位移来控制线圈之间的距离就可以实现对电感值的调节. 如 Tassetti C. M. 等人设计的可调电感的最高变化比率达到 50%, 在驱动电压调节范围 (0~ 150 V) 内, 电感值为 0.65 ~ 1 nH. [12]

### 1.4 谐振器

MEMS谐振器具有低功耗、小型化等优点, 可以代替传统谐振器应用于无线通讯系统中. 从工作方式上看, MEMS谐振器主要分为机械振动和非机械振动两种.

1) 利用机械振动制作的谐振器主要有: 静电梳状谐振器、固定梁谐振器、自由梁谐振器和碟片结构谐振器, 其主要特点是高 Q 值. 静电梳状谐振器结构简单, 可用 CMOS 工艺制造, 但工作频率比较低. 固定梁谐振器具有较高的谐振频率, 但 Q 值不够高. 自由梁谐振器可以进一步提高 Q 值, 如 Kun Wang 等人研制的自由梁谐振器 (如图 6), 其谐振频率可达 90 MHz, Q 值高于 8400 [13] 而由 Clark J. R. 等人提出的碟片结构谐振器的谐振频率更高, 可达 156 MHz, Q 值达到 9400 [14]



2) 非机械振动方式的谐振器主要有谐振腔结构和体声波谐振器, 其主要特点是可以获得 GHz 数量级的工作频率. 谐振腔结构微谐振器主要是利用微波谐振腔和介质谐振器的一些理论来设计的, 如文献 [15] 给出的该类型谐振器的工作频率为 30 GHz, Q 值 > 960. 体声波谐振器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, 其谐振频率可达 1.5 ~ 7.5 GHz

### 1.5 移相器

基于 MEMS 工艺的微型化移相器已被广泛应用, 并可以与其他射频电路一起实现单片集成. 目前出现的 MEMS 移相器有以下几种类型: 1) 分布式 MEMS 移相器. 如图 7 [16] 所示, 它是在共面波导传输线上周期性的加载具有高电容比率的 MEMS 桥, 使传输线成为一个慢波系统, 达到相位延迟的目的. 该移相器可在 0~ 60 GHz 内工作, 隔离度大于 40 dB, 插损小于 2 dB; 2) 开关线式移相器. 如图 8 [17] 所示, 通过 MEMS 开关选择不同的通路来实现不同的路径延迟. 整个移相器可实现 0° ~ 337.5° 步进 22.5° 的相移, 工作在 34 GHz 时, 插损小于 3.0 dB; 3) 其它移相器. Ko Y. J 等人利用开路 / 短路短截线制作的移相器工作在 10.7 ~ 12.75 GHz 时, 平均插损 2.0 dB, 平均相位误差 2°. [18] Sagko I. H. 等人设计的可连续和离散变化的移相器, 工作在 15 GHz 时, 可实现 0° ~ 95° 的连续相移. [19]

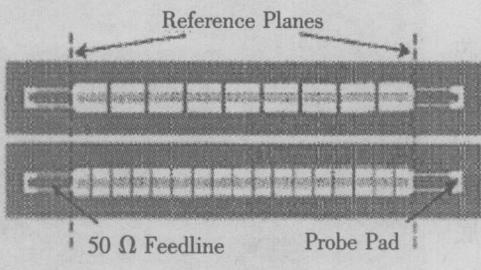


图 7 分布式 MEMS 移相器

Fig.7 Distributed MEMS phase shifter

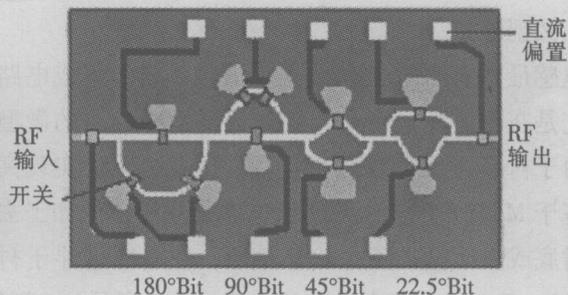


图 8 开关线式移相器

Fig.8 Switched delay line phase shifter

### 1.6 天线

随着射频系统的工作频率向毫米波方向不断发展, 基于 MEMS 的天线技术已经倍受人们的关注. 目前基于 MEMS 的天线主要有两种: 基于 MEMS 器件的可重构天线和基于异质衬底材料的微带天线.

基于 MEMS 器件的可重构天线可以实现频率可重构和方向图可重构两种功能. 例如 Kiriazi J 等人设计的双频段偶极天线<sup>[2]</sup>和 Weedon W. H. 等人制作的微带贴片天线 (3 × 3) (如图 9 所示)<sup>[3]</sup>, 是通过控制 MEMS 开关的通断来调节天线的有效辐射面积, 以获得频率的可重构. 而 Jung-Chih Chiao 等人则是使用 SDA (Scratch-Drive Actuator) 来制作天线臂可动的 V 字形天线, 实现方向图的可重构.<sup>[4]</sup>

通常天线是做成在低介电常数衬底上, 采用 MEMS 微加工技术就可以将微带天线制作在高介电常数衬底上. 目前主要有以下 3 种做法 (如图 10 所示): a) 将矩形贴片作在悬于空气腔的薄膜上<sup>[20]</sup>; b) 去除部分硅基片<sup>[21]</sup>; c) 在基底上制作光子带隙结构. 这些做法的目的都是为了抑制沿基底传播的表面波, 以提高天线的性能.

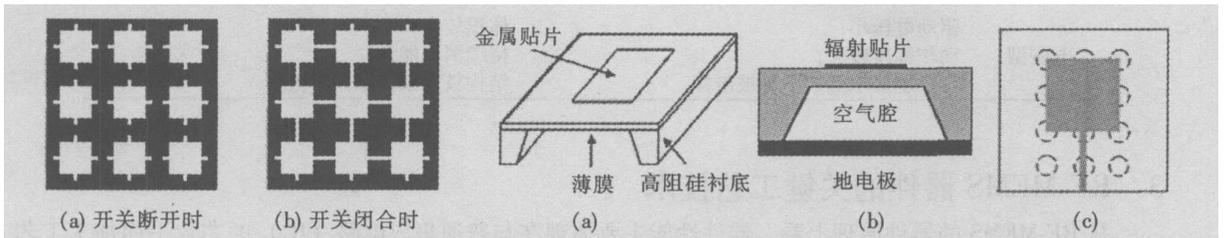


图 9 MEMS 开关可重构天线结构示意图  
Fig.9 MEMS-switched reconfigurable antenna

图 10 3 种制作在高介电常数衬底上的微带贴片天线  
Fig.10 Three types of microstrip patch antenna designed on high dielectric constant substrate

## 2 RF-MEMS工作原理

从上面各种类型 RF-MEMS 器件的结构上看, 要实现器件参数的可控性或微调功能, 最基本的工作原理是可控制的微操作机械运动, 即通过能将其他能量转换成机械能的微操作器实现的. 根据机械驱动的能量提供方式不同, 微操作器一般可分为静电型、电磁型、压电型、热膨胀型等几种类型. 而在射频电路中, 通常要求快速的激励驱动, 因此, RF-MEMS 器件一般都是采用静电型或是电磁型的微操作器.

静电驱动和电磁驱动的原理如图 11、12 所示.

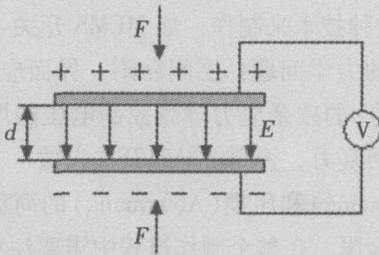


图 11 静电驱动原理图  
Fig.11 Electrostatic drive

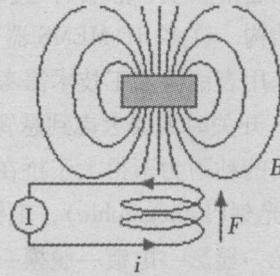


图 12 电磁驱动原理图  
Fig.12 Electromagnetic drive

静电驱动 (如图 11 所示) 是利用异性电荷之间的库仑引力作用来实现机械运动的. 当在两个平行极板上施加电压时, 正、负电荷会分别聚集在两个极板上, 极板间的电场强度为  $E$ . 这时两个极板之间就会产生静电引力  $F$ , 从而改变电极之间的距离  $d$ . 静电操作器的驱动力取决于施加的电压、电

极间距和面积, 而与电极厚度和体积无关。

电磁驱动 (如图 12 所示) 是利用带电导线在磁场中产生运动来工作的。它需要两个主要的部件: 磁铁和线圈。导体线圈处于磁铁产生的磁感应强度  $B$  的磁场中, 当在线圈中通入电流  $i$  时, 线圈将受到电磁力  $F$  的作用而运动。如果固定线圈, 则磁铁受力运动。电磁操作器的驱动力取决于施加的电流、线圈尺寸和磁铁的磁感应强度。表 1 列出了两种驱动方式各自的优缺点, 设计时可根据特点选择合适的驱动方式。

表 1 静电驱动与电磁驱动的优缺点比较

Tab 1 Comparison between electrostatic drive and electromagnetic drive

驱动方式	优 点	缺 点
静电型	体积小; 消耗能量极少; 结构简单, 制作容易, 易于集成。	驱动电压高; 动作幅度小; 对环境要求较高, 有电击穿的危险。
电磁型	驱动电压小; 动作幅度较大; 对环境要求低, 不易被击穿。	体积较大; 持续消耗能量; 结构较复杂, 制作有难度。

### 3 RF-MEMS 器件的关键工艺技术

从 RF-MEMS 的器件原理上看, 器件性能主要体现在与普通集成电路 (IC) 的芯片平面加工工艺不同, 对 RF-MEMS 器件的加工需要有三维体加工的微机械工艺加工技术。能实现三维体加工的微机械工艺加工技术目前主要有: 硅体微加工、表面微加工和 LIGA 工艺等。

目前硅体微加工主要是采用腐蚀技术来实现的, 通常是用干法腐蚀和湿法腐蚀两种技术。根据硅在各个晶向上是否具有相同的腐蚀速率, 还可分各向同性腐蚀和各向异性腐蚀。在进行湿法各向异性腐蚀时, 需要注意腐蚀后的侧壁并不垂直于底面, 如前面提到的在微带天线衬底上刻蚀出的空腔 (如图 10-b)。这是因为在各向异性腐蚀中, 腐蚀液对硅单晶 (111) 的晶面腐蚀速率远比其他表面低, 并且侧面 (111) 晶面与底面 (100) 晶面存在  $54.74^\circ$  的夹角, 故随着腐蚀深度的增加底面会逐渐减小, 其减小量与腐蚀深度有关。而腐蚀深度的严格控制可由自停止腐蚀技术来实现。另外, 硅在各向异性腐蚀时还会发生凸角腐蚀现象, 使原来设计的图形发生变化, 故必须进行凸角补偿。

表面微加工主要靠在基底上逐层添加材料来构造微结构。表面微加工是把 MEMS 的“机械”部分制作沉积于牺牲层薄膜上, 然后有选择地将牺牲层腐蚀掉, 使结构薄膜局部与硅体部分分离, 呈现可运动的表面微结构。许多 RF-MEMS 器件都是采用这种技术来制作, 如 MEMS 开关、可变电容、电感、谐振器等。采用表面微加工技术需考虑 3 个重要的力学问题: 层间粘附、界面应力、静态阻力。例如在设计 MEMS 开关时需要考虑到悬臂 (或薄膜桥) 的残余应力导致控制电压的增大; 当桥被拉下时, 桥与电极间的粘附力不得大于桥在该状态时的回复力, 否则将导致开关失效。

LIGA 是德语光刻 (Lithographie)、电镀 (Galvanoförmung) 和压模 (Abförmung) 的简称。它主要有以下几个步骤: 曝光 显影 电镀 脱模 填充 去除金属。在整个制作过程中需要注意的一点是所使用的衬底必须是导体或是涂有导电材料的绝缘体, 这是为了完成流程中的第三步电镀。LIGA 工艺与其他微细加工方法相比, 具有如下优点: 可实现大深宽比结构; 材料广泛, 可以是金属、陶瓷、聚合物、导磁体等; 可制作高精度复杂图形; 易于大批量生产。LIGA 工艺的不足之处是不适合制作多层结构, 故无法制造可动微结构。如果要制作出可动微结构器件, 则需采用引入牺牲层技术后的 SLIGA 工艺。

可见, 对于复杂结构的 RF-MEMS 器件, 往往采用单一的 MEMS 工艺是无法实现的, 必须考虑不

同 MEMS 工艺的组合进行设计. 就象集成电路平面工艺一样, 不同工艺层的版图设计可以在同一芯片上加工出各种不同功能的半导体器件.

#### 4 结束语

总的来说, 在 RF-MEMS 器件设计时, 首先需要考虑 MEMS 工艺的可行性. 当某种单一 MEMS 工艺无法实现器件设计的功能时, 通常是修改器件结构设计来保证 RF-MEMS 器件能够用其它 MEMS 工艺或 MEMS 组合工艺加工出来. 然后, 再根据前面介绍的相关工作原理和器件的功能需求来进行整体结构仿真设计, 这样可以尽可能地避免制作出的系统失效, 同时也避免了返工、设计周期拉长等情况的发生.

近年来, 由于小型化无线通讯技术产品如手机等需求量的迅速增长, 产品开发人员一直在追求那种在微型化、低功耗、低价位等性能上优异的 RF-MEMS 器件. 尽管目前市场上已有一些高性能的 RF-MEMS 器件推出, 但大部分 RF-MEMS 器件还是处于实验室研究阶段, 需要不断的改进设计才能实现实用化. 不过, 可以相信随着 MEMS 工艺技术的发展, 在不久的将来会有越来越多的 RF-MEMS 器件形成商业化产品.

#### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] Pacheco S P, Katehi L P B, Nguyen C T- C. Design of low actuation voltage RF MEMS switch [EB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/6946/18662/00860921.pdf?tp=&number=86092&isnumber=18662>, 2004-09-01.
- [ 2 ] Kiriazis J, Ghali H, Ragaie H, et al. Reconfigurable dual-band dipole antenna on silicon using series MEMS switches [EB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8636/27372/01217482.pdf?tp=&number=121748&isnumber=27372>, 2004-09-01.
- [ 3 ] Weedon W H, Payne W J, Rebeiz G M. MEMS-switched reconfigurable antennas [EB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7598/20721/00960181.pdf?tp=&number=96018&isnumber=20721>, 2004-09-01.
- [ 4 ] Jung-Chih Chiao, Yitun Fu, Iao Mak Chin, et al. MEMS reconfigurable Vee antenna [EB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/6330/16934/00780242.pdf?tp=&number=780242&isnumber=16934>, 2004-09-01.
- [ 5 ] Rizk J, Guan-Leng Tan, Muldavin J B, et al. High isolation W-band MEMS switches [J]. *Microwave and Wireless Components Letters*, IEEE, 2001, 11: 10-12.
- [ 6 ] Goldsmith C, Elmke J, Makzewski A, et al. Lifetime characterization of capacitive RF MEMS switches [EB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7643/20869/00966876.pdf?tp=&number=966876&isnumber=20869>, 2004-09-01.
- [ 7 ] Daneshmand M, Mansour R R. Fabrication and modeling of an SP3T RF MEMS switch [EB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8636/27372/01217479.pdf?tp=&number=1217479&isnumber=27372>, 2004-09-01.
- [ 8 ] Dec A, Suyan A K. Micromachined electromechanically tunable capacitors and their applications to RFIC's [J]. *Microwave Theory and Techniques*, IEEE Transactions on, 1998, 46: 2587-2596.
- [ 9 ] Larson L E, Hackett R H, Melendes M A, et al. Micromachined microwave actuator (MMA) technology-a new tuning approach for microwave integrated circuits [EB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org/iel2/567/3923/00148080.pdf?tp=&number=148080&isnumber=3923>, 2004-09-01.
- [ 10 ] Bowrick R L, Stupar P A, DeNatale J F, et al. Variable MEMS capacitors implemented into RF filter systems [J]. *Microwave Theory and Techniques*, IEEE Transactions on, 2003, 51: 315-319.
- [ 11 ] Jur-Bo Yoon, Yun-Seok Choi, Byeong-Il Kim, et al. CMOS-compatible surface-micromachined suspended-spiral inductors for multi-GHz silicon RFICs [J]. *Electron Device Letters*, IEEE, 2002, 23: 591-593.
- [ 12 ] Tasseti C M, Lissorgues G, Gilles J P. Tunable RF MEMS microinductors for future communication systems [EB/OL].

- OL]. [http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8799/27883/0124491&pdf\\_toplevel=&number=124491&number=27883](http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8799/27883/0124491&pdf_toplevel=&number=124491&number=27883), 2004-09-01.
- [13] Kun Wang, Ark-Chew Wong, Nguyen C T - C. VHF free-free beam high-Q micromechanical resonators [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 9: 347-360.
- [14] Clark JR, Wan-Thai-Hsu, Nguyen C T - C. High-Q VHF micromechanical contour mode disk resonators [EB/OL]. [http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7241/19535/00904363.pdf\\_toplevel=&number=90436&number=19535](http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7241/19535/00904363.pdf_toplevel=&number=90436&number=19535), 2004-09-01.
- [15] Stickle M, Eleftheriades G V, Kram er P. High-Q bulk micromachined silicon cavity resonator at Ka band [J]. *Electronics Letters*, 2001, 37: 433-435.
- [16] Barker S, Rebeiz G M. Distributed MEMS true time delay phase shifters and wideband switches [J]. *Microwave Theory and Techniques - IEEE Transactions on*, 1998, 46: 1881-1890.
- [17] Pilans B, Eshelman S, Malczewski A, et al. Ka band RF MEMS phase shifters [J]. *Microwave and Guided Wave Letters - IEEE*, 1999, 9: 520-522.
- [18] Ko Y J, Park J Y, Bu J U. Integrated 3-bit RF MEMS phase shifter with constant phase shift for active phased array antennas in satellite broadcasting systems [EB/OL]. [http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8626/27359/01217133.pdf\\_toplevel=&number=121713&number=27359](http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8626/27359/01217133.pdf_toplevel=&number=121713&number=27359), 2004-09-01.
- [19] Sagkol H, Topalli K, Unlu M, et al. A monolithic phased array with RF MEMS technology [EB/OL]. [http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7931/21884/01017094.pdf\\_toplevel=&number=1027094&number=21884](http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7931/21884/01017094.pdf_toplevel=&number=1027094&number=21884), 2004-09-01.
- [20] AbdelAziz M, Ghalib H, Ragaie H, et al. Design implementation and measurement of 26.6 GHz patch antenna using MEMS technology [EB/OL]. [http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8636/27372/01217481.pdf\\_toplevel=&number=1217481&number=27372](http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8636/27372/01217481.pdf_toplevel=&number=1217481&number=27372), 2004-09-01.
- [21] 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): 247-251.

## RF-MEMS Devices and Its Key Technology

CHEN Huar-jun<sup>1,2</sup>, GUO Dong-hui<sup>1</sup>

(1 School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

2 Rich RF Microelectronics Ltd, Xiamen 361005, China)

**Abstract** As the wireless communication products is now going on the way of low power dissipation, higher frequency and miniaturization, microelectromechanical system (MEMS) technology becomes one of the key technologies to develop the radio frequency (RF) devices. This paper is to summarize the various types of RF-MEMS devices which had been used in the wireless communication systems, and detail on the main principle of these RF-MEMS devices. In order to show the keynotes in the design of RF-MEMS devices, some of important RF-MEMS processes are also introduced and their shortages are presented.

**Key words** RF devices, microelectromechanical system, RF-MEMS, technology

(责任编辑 朱雪莲)