

无线通信系统中的微尺度射频元件

潘武, 钟先信, 巫正中
(重庆大学微系统研究中心, 重庆 400044)

摘要: 射频元件微型化是微型无线通信系统发展的关键所在。本文从微机械开关、微机械谐振器、微机械滤波器、微机械天线、微机械电感及电容等多方面, 介绍微尺度射频元件的研究和应用现状, 并对其发展前景作了展望。

关键词: 无线通信; 微机械开关; 微机械谐振器; 微机械滤波器; 微机械电感; 微机械电容; 微机械天线

中图分类号: TN925 **文献标识码:** A

1 引言

射频-微机电系统(RF-MEMS)可简单认为是应用于射频(Radio Frequency)领域的MEMS器件及系统, 它是微机电系统技术在无线通信领域的重要应用。

移动电话在微型化、高功率效率和系统集成方面的要求非常迫切。移动电话要求在体积上要更小、功能要更多, 而在价格上也要满足其指标。从移动电话的发展来看, 它沿着单频带→双频带→多频带的方向发展, 所需要的射频元件的数量也将更多。例如目前全球正在积极开发的第三代移动电话, 它应包括第二代移动电话标准的备用系统, 做到对GSM(Global System for Mobile Communications, 全球数字移动电话系统)和CDMA(Code Division Multiple Access, 码分多址)的兼容, 另外像GPS(Global Position System, 全球定位系统)接收器、惯性传感器、生物统计识别(如人体指纹识别)等其他附加功能, 都将增加系统射频元件数量、功率消耗和价格等指标。移动电话的飞速发展需要更大胆的系统概念更新。当可靠性和适用温度范围问题得以解决时, 移动电话的体积和能耗就已成为优先考虑的问题。在第三、四代移动通信系统以及蓝牙(Bluetooth)技术开发中, 射频硅技术是非常重要的技术。由于MEMS技术在系统及器件尺寸微型化、降低能耗等多方面的优点, 也使RF-MEMS在新一代无线通信系统的开发中扮演着重要的角色。

本文将就目前国内外RF-MEMS器件研究及其在无线通信中的应用作一综述, 并对其发展进行展望。

2 RF-MEMS器件研究的必要性

在典型的超外差无线收发器的系统^[1]中的低噪声放大器(LNA)、固态功率放大器(SSPA)以及锁相环电路(PLL)、混频器和低频数字电路已经能够用集成电路技术微型化。SSPA(有时是LNA)常采用复合半导体技术(如砷化镓)实现。这些元件自身已是一块芯片, 常用硅双极性和互补金属氧化物半导体(CMOS)技术实现的。但这还不能很好地降低整个超外差收发器的尺寸, 因为超外差收发器不仅包含有集成晶体管电路, 而且还包含有其他众多的无源元件。

大多数的无线通信系统需要许多通信信道, 这些信道必须具有小带宽。小带宽的要求导致对信道选择用滤波器件的极大限制, 作频率变换用的本地振荡器必须相当稳定(无噪声)。振荡器的频率必须不受温度变化和器件老化以及如噪声或振动等导致位相和频率瞬时波动的任何现象的影响。描述振荡器稳定性的最重要的一个参数是振荡电路的 Q 值。只有当振荡回路 Q 值超过一确定的阈值时, 振荡频率的长周期、短周期稳定性才能得到保证。振荡回路 Q 值越高, 位相漂移对振荡器的影响越小。高 Q 值对降低振荡器的位相噪声起着很大的作用。

振荡回路的 Q 值对具有小的百分比带宽、小形状因子和低插入损耗的选择性 IF 和 RF 滤波器的实现有非常大的影响, RF 和 IF 滤波器需要高 Q 值振荡回路。在超外差接收机中, 信道选择主要是 IF 滤波器完成, 滤波器选择信道越多, 要求达到一定插入损耗的谐振器的 Q 值越高。用于 IF 滤波的 0.3% 带宽滤波器, 其需要的高选择性只能在 Q 值大于 5000 的情况下实现。另一方面, RF 预选或镜像抑制滤波器只要求 3% 带宽, 而且用 Q 在 500 ~ 1000 的谐振器就能实现。

目前, 绝大多数蜂窝移动电话和无绳电话要求的高选择性和稳定性只能通过使用诸如分离电感器、分离可调电容器(如变容管)、SAW 以及石英晶体谐振器等高 Q 值元件达到, 而所有这些器件是在电路板上和集成电路元件相连。用传统的 IC 技术来制造这些器件达不到所需要的性能, 得

不到所要求的 Q 值, 这就是实际的蜂窝或无绳电话都包含大量的分离无源器件、SAW 和晶体元件的原因。

MEMS 带来的好处包括低价格、高性能、更小的体积和重量以及提高可靠性等。利用与 IC 兼容的硅微机械技术制造的电感器、电容器、开关和滤波器等射频器件可以实现与相关集成信号处理电路的集成, 由这些器件构成压控振荡器(VCOs)、锁相环(PLL)以及其他 RF 器件, 将提供更高的功能性, 而且在系统的价格、体积和重量上得以降低, 为实现片上(on-chip)通信系统创造条件。可以认为采用微机电系统(MEMS)技术开发这些高 Q 器件是无线通信系统微型化的一个重要途径。表 1 列出了几种 RF-MEMS 器件及其应用。

Table 1 MEMS devices, applications and MEMS specific advantages

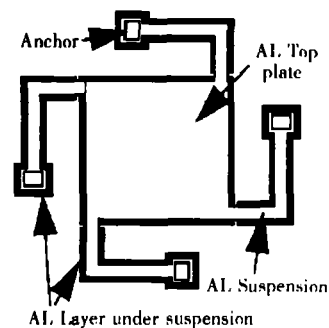
Devices	Applications	MEMS advantages
RF - switches (electrostatic)	Band-switches, Duplexer-switches, Bypass-switches	no static power consumption, low loss and signal distortion
Micromechanical resonators	Duplexer-filters, RX&TX-band filters, GPS-filters, VCOs	Small size, RF-system-on-chip capability
High- Q inductors	Matching components, Baluns, VCOs	Improved Q -value for on-chip inductors
Tunable capacitors	VCOs, Tunable filters	Improved Q -value and tuning range: for on-chip varactors

3 RF-MEMS 器件

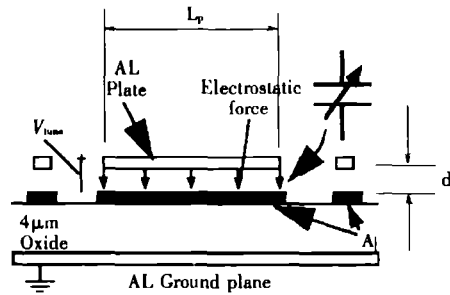
3.1 电压调谐高 Q 值电容器

目前, 用于产生本振信号的合成器中的压控振荡器(VCO)是由芯片外的电感器(Q 值至少为 30)和电压调谐变容二极管电容器(Q 值至少为 40)组合而成。要求偏离典型载波(如欧洲 GSM) 10kHz 时, 位相噪声达到 $-100\text{dB}/\text{Hz}$ 。而利用常规 IC 技术实现器件微型化还是无法达到这种指标。如制造的片上螺旋电感^[2]或绕线电感^[3]得到的 LC VCO 位相噪声指标为 $-85\text{dB}/\text{Hz}$ 。问题主要出在可调电容器上, 用片上二极管替代片外变容二极管而出现过大的串联电阻, 结果使其 Q 值严重降低。最近, 微机械、可移动金属片构成的电压可调电容器被认为是片上电容器研究上的一大实质性进展。图 1 为电压可调微机械电容器^[1]

的示意图, 这个电容器由通过柔性挠曲悬置于底部铝片上的铝电容片构成, 两块铝片的间距可通过静电驱动加以改变。此原型电容器具有在 5.5 V 偏压范围上大约 16% 的调谐范围, 电容值大约 2.2pF, 结构参数为 $L_p = 200\mu\text{m}$, $d = 1.5\mu\text{m}$, Q 值为 62($f = 1\text{GHz}$), 相当于片外变容二极管。



(a)

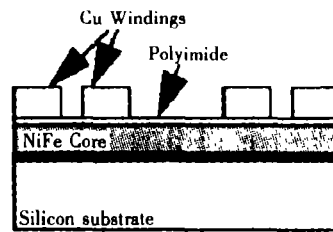


(b)

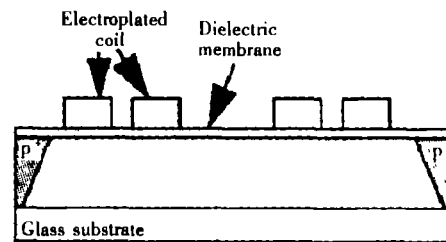
Fig. 1 (a) Overhead and (b) cross-sectional schematics of a voltage-tunable micromechanical capacitor

3.2 微机械高 Q 值电感器

要获得适当 Q 值(至少对 VCO 的 Q 值)的谐振器回路,同样也需要高 Q 的电感器。利用常规 IC 技术,获得的螺旋电感器的 Q 值都不高^[2]。即使用绕线作电感,在许多应用中也达不到所需的 Q 值^[3]。利用微机械技术来提高片上电感器性能的方法有两种:1) 电感线圈中加入磁心以增强耦合;2) 为去除有耗基底,在后侧刻蚀的技术获得的悬置薄膜上制造电感。图 2(a)中的电感器利用平面金属螺旋线下方的 NiFe 芯以提高磁通量,电感为 $2.7\mu\text{H}$, Q 值为 6.6 ($f = 4\text{MHz}$), 此电感器的参数为 $W_{\text{wind}} = 50\mu\text{m}$, $H_{\text{wind}} = 10\mu\text{m}$, $2 \times 10\text{mm}^2$ 面积内螺旋线为 10 匝。图 2(b)为绝缘基底平台(或薄膜)上制造的微型螺旋电感器,总电感量为 115nH , Q 值为 22(275MHz)用类似的技术制造的微波/毫米波电感器达到 1.2nH 的电感,具有 70GHz 的自谐振频率(移去基底的情况)和 22GHz 的谐振频率(不移去基底的情况)所希望的 Q 值为 $60 \sim 80$ (40GHz)。但图 2 中的电感器仍不适合在一些通信系统应用。原因出在这两种结构都存在寄生自谐振问题,从而限制其频率范围。当电感值较小(如小于 10nH)时,自谐振通常影响小;而所需电感值超过 20nH 时,自谐振影响变得显著。对于图 2(a)及其类似结构,在确定的频率范围,磁心才有作用,而超过这一频率范围时,它的磁导率下降到一个无效值。这方面的研究仍在继续。



(a) Spiral inductor over an NiFe core

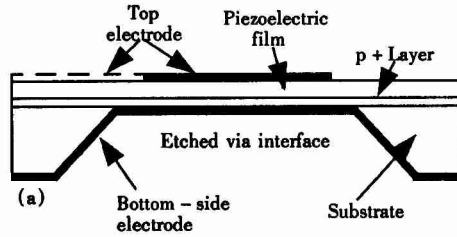


(b) Spiral inductor over an isolating platform

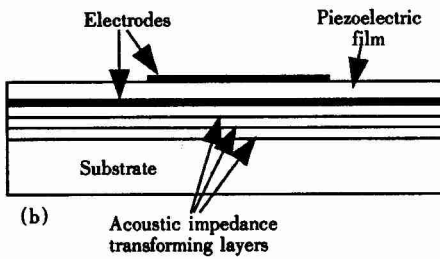
Fig. 2 Advanced integrated inductors utilizing micromachining processes.

3.3 薄膜体声波谐振器

目前用上述片上可调电容器和片上电感器谐振器替代振动机械谐振器(如石英晶体)是不可能的,因为用于参考振荡器和信道选择滤波器的石英晶体谐振器、SAW 可实现高的 Q 值(达几千)。最初,人们的研究集中在开发薄膜技术,生产微型化的振动机械谐振器。图 3 为薄膜体声波谐振器、压电谐振器,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。由氮化铝压电薄膜构成的谐振器可取得 1000 以上的 Q 值,谐振频率为 $1.5\text{GHz} \sim 7.5\text{GHz}$, 尺寸小于 $400\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$ 。当然还需要对工艺和微调技术的改进,并解决支撑薄膜的结构完整性问题^[4]。直接在固体基底上建造薄膜谐振器(图 4(b)),可解决结构稳定问题。薄膜体声波谐振器也存在微调和谐调不方便的问题;由这些谐振器构成的滤波器对 UHF 和 S 波段频率范围应用较合适,而在更低的频率波段,它们就显得过厚、笨重。



(a) A membrane supported FBAR resonator



(b) A solidly mounted resonator

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

3.4 微机械谐振器和滤波器

在低频段,利用兼容 IC 的微机械加工工艺可实现挠曲型微机械谐振器。而且工作频率从低频(LF)到甚高频(VHF)。用表面微机械多晶硅构成的 LF 挠曲型谐振器在真空中测出大于 80000 的 Q 值^[5]。利用单晶硅材料所作的谐振器,在 70MHz(VHF)时 Q 值达到 20000。除了高 Q 值和宽的可用频率范围外,微机械谐振器在设计上也是相当灵活的,具有几个诱人的特征:压控频率可调性^[6]和可转换性;微调的可控制性;结构及其材料选择的灵活性;驱动类型的多样性(静电、压电以及磁致伸缩等)。

这些良好的特性有利于较复杂振荡器和滤波器的实现。特别是,由多个谐振器组成的微机械滤波器(滤波器之间通过挠曲机械弹簧耦合)具有可和一些最好的高 Q 滤波器相比拟的性能特征^[7]。图 4(a)给出了 HF(高频)双谐振器的滤波器,由两个相同的、通过挠曲型耦合梁耦合的两端固定支架(clamped-clamped beam)微机械谐振器构成。谐振器被激励在垂直于基底的方向振动,利用直流偏压 V_p 和施加输入电极的交流电压 v_i 驱动。通过耦合梁耦合谐振器间的能量,创造一

个具有两个振动模式的耦合双谐振器系统,这两种振动模式定义了滤波器的通带。滤波器的中心频率由两相同的谐振器的谐振频率决定。可利用机电模拟,导出微机械滤波器的类似 LC 梯型结构的等效电路图,有利于微机械滤波器的计算机辅助设计、综合。

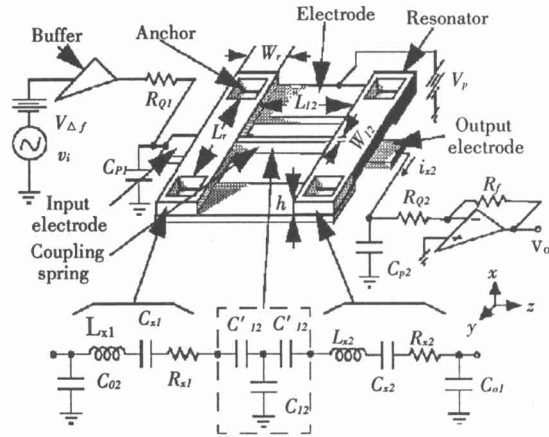


Fig.4 Perspective view schematic of the two-resonator micromechanical filter, along with the preferred bias, excitation, and sensing circuitry, and the equivalent circuit for the filter.

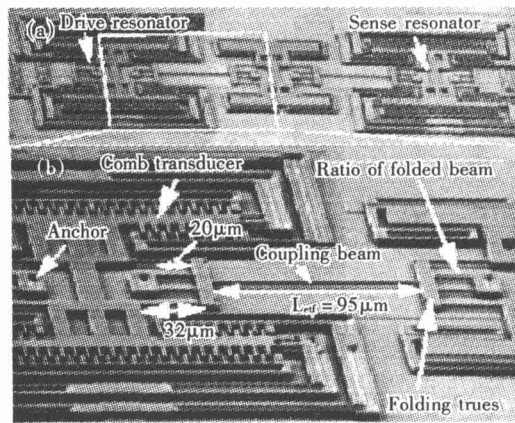


Fig.5 SEM's of a surface-micromachined, medium-frequency, three-resonator micromechanical filter with measured transmission spectrum

对于 IF(中频)、LF(低频)微机械谐振器及滤波器可通过梳状变换器、折叠梁结构来实现,主要利用了梳状结构的较大等效质量和折叠梁较小的

弹簧常数,得到较低的谐振频率。如图 5 所示。另外利用此技术可制作出与 CMOS 电路集成的低频高 Q 振荡器,获得高 Q 振荡器工作所需的位相噪声性能。但是,它们也显示出一个 $1/f$ 噪声导致的、与非线性幅度扰动有关的位相噪声。微机械谐振器器件也有它的缺点,其中较麻烦的是要获得高 Q 值,需要真空 $-10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 的温度系数(没有石英好)和涉及极限动态范围和功率使用容量的不确定性。要获得性能优化的微机械谐振器振荡器还需要作许多努力。

3.5 用于 K 及其以上波段的微机械滤波器

对于工作在 K 波段及以上波段的收发器来说,预选滤波器或镜像抑制滤波器(带宽为 1% ~ 8%)是用微波/毫米波元件构成的。由于位于天线之后、放大器之前,前端滤波器应具有高 Q 、低损耗特性。

为了解决这一问题,人们研究用单片传输线谐振器来实现所需的滤波器。Si/GaAs 基底上的传输线谐振器,由于其基底材料的高介电常数($\epsilon_r = 12 \sim 13$)而使传输线承受较大的辐射损耗和欧姆损耗,把 Si/GaAs 基底上的平面谐振器的 Q 值限制在 $40 \sim 60$ ($f = 30\text{GHz} \sim 60\text{GHz}$),这是低损耗滤波器所不能接受的。一种解决办法是将平面滤波器集成在特氟隆(Teflon)或石英基底上(介电常数为 $2.2 \sim 4$),可获得 $200 \sim 300$ 的 Q 值($f = 30\text{GHz} \sim 60\text{GHz}$),但又存在与 Si/GaAs 集成电路不兼容的问题。提高 Si/GaAs 基底上谐振器的 Q 值另一种办法是将谐振器集成在一介质薄膜上(厚度为 $1\mu\text{m} \sim 1.5\mu\text{m}$),并将谐振器封在高为 $100\mu\text{m} \sim 500\mu\text{m}$ 的微屏蔽腔内^[8]。利用标准微机械加工工艺的氮化硅薄膜的淀积、硅片的后向刻蚀、通孔刻蚀并用 Au 填充、多硅片的键合以形成微型组件。这种谐振器比其 Si/GaAs 上的谐振器宽,欧姆损耗大大降低。测得 $1/4$ 波长谐振器($W = 700\mu\text{m}$, $h = 200\mu\text{m}$)的 Q 值在 600 左右($f = 60\text{GHz}$),为 Si/GaAs 基底谐振器的 10 倍以及波导谐振器的 $1/4 \sim 1/3$ 。

微机械的另一应用是三维腔的制造,用于 $10\text{GHz} \sim 60\text{GHz}$ 频率的微型组合波导元件。在硅片上刻蚀出高度减小的谐振波导腔,通过缝过渡或连接线馈电,得到 500 ($f = 10\text{GHz}$) 和 1100 ($f = 30\text{GHz}$) 左右的 Q 值^[9]。微机械传输线便于实现微封装,滤波器(或腔内的任何元件)都被完全

屏蔽,从而没有任何射频信号耦合到外界。最终有望在同一块芯片上集成毫米波发射机和接收机。

3.6 微机械开关

微机械开关可用于天线选择或多频带通信系统中的滤波器通路选择以及工作在 Ka 以上波段的高频系统中的相位阵列天线的展开。绝大部分微机械开关都是通过静电驱动工作的。

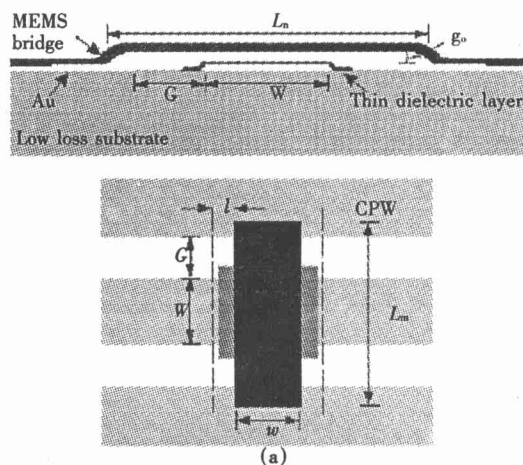


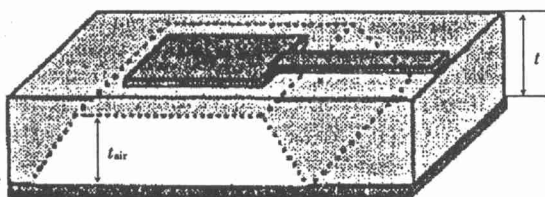
Fig. 6 MEMS shunt capacitive switch over a CPW shown in cross section in up position and top view

图 6 为一个 MEMS 并联电容型 RF 开关的截面图和俯视图^[10-11]。利用了一个空气桥(air-bridge)结构,金属薄膜桥被悬置于共面波导上方 $3\mu\text{m} \sim 4\mu\text{m}$ 。开关的顶部和底部极板通过蒸发或镀铝或金制成。对于微波/毫米波开关,真实的金属-金属接触没有必要;相反地,极板-极板电容的阶跃变化就可实现开关功能。氮化物薄膜(厚为 $0.1\mu\text{m}$ 左右)被淀积在共面波导中心导体上,当开关处于接通状态位置(桥处于上面,呈低电容)时,插入损耗约为 0.1dB ($f = 10\text{GHz}$),并随频率变化线性增加(0.6dB , $f = 60\text{GHz}$)。当开关处于断开状态位置(桥处于下面,呈高电容),开关的隔离度与桥的面积成正比,为 $-20\text{dB} \sim -40\text{dB}$ ($f = 20\text{GHz}, 40\text{GHz}$ 或 60GHz)。这种微机械开关通常在“接通状态”插入损耗和“断开状态”隔离度方面,优于由 PIN 二极管或 GaAs 场效应管(FET)构成的开关。绝大多数微机械开关速度($4\mu\text{s} \sim 20\mu\text{s}$)比 PIN 或 FET 二极管开关速度($1\text{ns} \sim 40\text{ns}$)慢,而且也需要较高的驱动电压(微机械开关: $20\text{V} \sim 60\text{V}$; PIN 或 FET 二极管开关: $3\text{V} \sim 5\text{V}$)。其低失真特性使得微机械开关特别适合于低功率

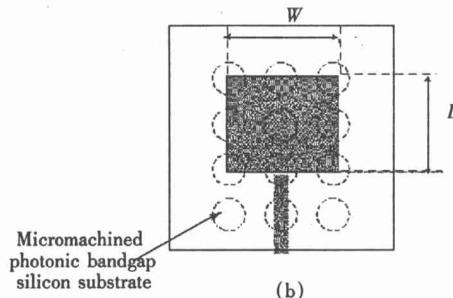
RF/微波/毫米波通信系统;非常低的插入损耗和近乎零的功率消耗使其适用于有源天线应用(相控阵列,功率混合等)。

3.7 微机械天线

天线性能依赖于介质材料的选择以及馈电网络的选择。在选择介电常数大的材料作基片时,还存在表面波激励问题,导致效率及方向图劣化。解决表面波激励问题的办法有:①圆形贴片结构,适当选择贴片半径来抑制被激励的表面波;②通过用一薄膜或利用微机械加工技术在基底上形成密集的周期性相间孔结构(即光子带隙结构),在其上悬置矩形贴片;③选择性刻蚀,在天线底部形成一个腔,消除表面波的激励。基于微细加工技术的各向异性深刻蚀工艺可以在诸如硅、GaAs 和 InP 的高介电常数基片上研制高性能的微带贴片天线^[12-13]。在硅基片的导体贴片下方刻蚀一个空腔,形成硅材料和空气构成的等厚度或不等厚度的混合结构,天线集成在基底上等效低介电常数区域,而电路作在相同基底的高介电常数区域,使得天线的带宽、效率和辐射图得到提高和改善。实现微机械贴片天线与 Si 或 GaAs 集成电路的集成。硅微机械贴片天线如图 7 所示,刻蚀掉贴片下面的部分硅材料,提高了天线带宽和辐射效率。这种新颖的微带天线工作在较高的频段(10GHz ~ 20GHz),是一种高频的宽带微带天线,可望工作在更高的频段,如亚毫米波段,应用于雷达和短程无线通信系统。



(a) Substrate with air-cavity



(b) Photonic bandgap substrate

Fig.7 Micromachined patch antennas

4 展 望

固定电容器、可变电容器、高 Q 电感器、RF 开关和滤波器等昂贵的片外无源 RF 器件,是系统微型化的一大障碍。MEMS 器件具有低价格、高性能、更小的体积和重量以及高可靠性等优点,为获得高质量的片上 RF 无源器件创造了条件。对无线通信系统的小体积和低重量、高频率以及多功能性等方面的要求,增加了对 RF 前端高集成度的需求。利用 MEMS 可以制造片上电感器、电容器、开关、谐振器和滤波器。而由它们构成的压控振荡器(VCOs)、锁相环(PLL)以及其他 RF 器件,有望提高器件常数、功能性和 IC 兼容性。将天线直接设计在硅片或其他半导体基片上,通过掺杂控制,进而设计出各种射频电路和中频电路,包括各种控制和存储单元,甚至实现单片收发系统。

RF - MEMS 器件存在与目前应用中的大量超小组件竞争。要能够取代传统器件,需要在 RF 器件性能和价格上具有强的竞争力。RF - MEMS 的发展还处在起步阶段,需要人们在微尺度 RF 器件的基础理论、原理、仿真及计算机辅助设计和先进制造工艺、封装技术等许多方面进行不懈努力,同时相信 RF - MEMS 器件将广泛应用在包括移动电话、无线个人通信、无线局域网(WLAN)、蓝牙技术、卫星通信和汽车电子等许多无线通信领域中。

参考文献:

- [1] Nguyen C T C. Micromachined devices for wireless communications[J]. SPIE, 1998, 86(8): 1756 – 1767.
- [2] Nguyen N M. A 1.8GHz Monolithic LC voltage-controlled oscillator[J]. IEEE J. Solid-state Circuits, 1992, 27(8): 444 – 450.
- [3] Craninecx J, Steyaert M S J. A 1.8GHz CMOS low-phase-noise voltage controlled oscillator with prescaler[J]. IEEE J. Solid-state Circuits, 1995, 30(12): 1474 – 1482.
- [4] Lakin K M, Kline G R, McCarron K T. Development of miniature filters for wireless applications[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 1995, 43(12): 2933 – 2939.
- [5] Nguyen C T C. Micromechanical components for miniaturized low-power communications[A], Proceedings, 1999 IEEE MTT – S International Microwave Symposium RF MEMS Workshop[C]. Anaheim, California, 1999: 48 – 77.
- [6] Howe R T, Muller R S. Resonant microbridge vapor sensor[J]. IEEE Trans. Electron. Devices, 1986, 33(4): 499 – 506.
- [7] Nguyen C T C. High-Q micromechanical oscillators and filters for communications[A]. Proceedings of the 1997 IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C]. Hong Kong, 1997: 2825 – 2828.
- [8] Weller T M, Katehi L P, Rebeiz G M. A 250GHz microshield bandpass filter[J]. IEEE Microwave Guided Wave Lett. 1995, 15(5): 153 – 155.
- [9] Brown A R, Rebeiz G M. Micromachined micropackaged filter banks[J]. IEEE Microwave Guided Wave Lett. 1998, 8(3): 158-160.
- [10] Muldavin J B, Rebeiz G M. High-isolation CPW MEMS shunt switches-part 1: modeling[J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Tech, 2000, 48(6): 1045 – 1052.
- [11] Muldavin J B, Rebeiz G M. High-isolation CPW MEMS shunt switches-part 2: design[J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Tech, 2000, 48(6): 1053 – 1056.
- [12] 潘武, 钟先信, 巫正中. 微带天线的宽带化、微型化研究及微机械天线[J]. 微米/纳米科学技术, 2000, 5(1): 150 – 155.
- [13] 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.

Microscale RF components in wireless communication system

PAN Wu, ZHONG Xian-Xin, WU Zheng-Zhong

(*Microsystem Research Center of Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

Abstract: Miniaturization of RF components is a key technology in developing miniaturized wireless communication system. The paper introduces the study and applications of microscale RF components, including micromechanical inductors, micromechanical capacitors, micromechanical resonators, micromechanical filters, micromechanical switches and micromechanical antennas. Finally, the development of RF – MEMS is prospected.

Key words: wireless communications; micromechanical switches; micromechanical resonators; micromechanical filters; micromechanical inductors; micromechanical capacitors; micromechanical antennas

作者简介:潘武(1966-),男,四川省大英县人,1989年7月毕业于重庆大学应用物理系应用物理专业,1995年4月毕业于重庆大学光学仪器专业,获工学硕士学位。现为重庆大学微系统中心博士生,主要从事微光机电系统技术等方面研究工作。已在国内外期刊及会议上发表论文多篇。