



## 典型 MEMS 和可穿戴传感技术的新发展

赵正平<sup>1,2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司, 北京 100846; 2. 专用集成电路重点实验室, 石家庄 050051)

**摘要:** MEMS 技术经过 20 多年的发展已进入移动网络时代的发展阶段。从该发展阶段的典型 MEMS 器件入手, 能够从多种 MEMS 器件的发展中提取出 MEMS 发展技术路线。介绍了包含 MEMS 加速度计、MEMS 陀螺仪、MEMS 惯性测量单元 (IMU)、MEMS 麦克风和 RF MEMS 等新发展阶段的典型 MEMS 器件近两年的新进展, 同时介绍了在设计、工艺、新原理、新材料和新电路结构等方面新的进步或创新, 并评估了 MEMS 技术发展的趋势。同时也对 MEMS 的集成创新, 即可穿戴传感技术的近期发展, 按照其获取信息的分类 (活动、生理和环境) 进行了综述。

**关键词:** MEMS 加速度计; MEMS 陀螺仪; 惯性测量单元 (IMU); RF MEMS; 可穿戴传感; MEMS 麦克风

**中图分类号:** TH703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4776 (2015) 01-0001-13

## New Developments of the Typical MEMS and Wearable Sensor Technologies

Zhao Zhengping<sup>1,2</sup>

(1. China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100846, China;  
2. Science and Technology on ASIC Laboratory, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** MEMS technology has entered a development stage of the mobile internet era after the development more than 20 years. According to the typical MEMS devices of the development stage, the technology road mapping of MEMS development can be derived from a variety of MEMS devices. The new progresses of typical MEMS devices at new development stage in nearly two years are introduced, such as MEMS accelerometers, MEMS gyroscopes, MEMS inertial measurement units (IMUs), MEMS microphones and RF MEMS. Meanwhile, the new progress or innovation in design, process, new principle, new material and new circuit structure and so on are introduced, and the development trend of the MEMS technology is assessed. At the same time, according to the classification of accessed information (activity, physiology and environment), the MEMS integrated innovation is summarized, i.e. the recent development of the wearable sensor technology.

**Key words:** MEMS accelerometer; MEMS gyroscope; inertial measurement unit (IMU); RF MEMS; wearable sensor; MEMS microphone

**DOI:** 10.13250/j.cnki.wndz.2015.01.001 **EEACC:** 2575

收稿日期: 2014-10-10

E-mail: zhaozp973@163.com

## 0 引言

自 20 世纪 80 年代后期 MEMS 的创新以来, 经过 20 多年的发展, MEMS 已成为半导体工业中快速发展的重要部分; 2006 和 2007 年, 由于视频游戏和移动电话领域的应用创新, 给 MEMS 产业带来快速增长, 智能手机和平板电脑中的运动传感器的年增长率高达 30%, MEMS 进入移动网络发展的新阶段。由于惯性 MEMS, MEMS 麦克风和 RF MEMS 等器件的进展最能反映 MEMS 移动网络发展新阶段的特点, 这些 MEMS 器件成为了该新发展阶段的风向标, 在国际半导体发展路线图 (ITRS) 的 MEMS 报告中把这些 MEMS 器件作为 MEMS 移动网络发展新阶段的典型器件<sup>[1]</sup>, 以研究具有多样性特点的 MEMS 技术的发展路线。移动网络带动了智能手机的发展, 为适应医疗和健康消费市场的需求, 现代的手机已经可以提供大量健康信息, 如加速度计可以跟踪活动和睡眠; 当用户触摸手机时, 内置光学传感器可用于传感心率; 手机中的相机可以用于检查食物中的卡路里含量或基于面部表情识别以鉴别情绪。移动手机的宽频谱可用于开发和分析这些数据, 并以可理解的、可操作的方式把它交给消费者。但并不是每一个健康参数都可以通过手机来衡量; 且由于手机的固有不足, 如经常存在缺乏连续记录和不精确的数据解释的情况。为克服手机的这一不足, 可穿戴技术应运而生; 将 MEMS 和专用集成电路集成并微形化以成为可穿戴传感器, 它们被戴在身体上允许用户不断跟踪健康参数, 并可识别对常规分布的偏离。他们的位置通常是已知的, 因而允许更精确和可靠的数据解释。可穿戴技术是 MEMS 技术集成发展的新亮点, 引起业界的高度关注。

## 1 典型 MEMS 技术的新发展

### 1.1 MEMS 加速度计

20 世纪 70 年代末体 Si 微机械工艺和压阻效应的结合实现了 MEMS 加速计的商品化, 80 年代后期 Si 表面微机械工艺和电容传感技术的结合推动了 MEMS 加速计在汽车工业中的首次商品化应用, 90 年代后期体 Si 和 Si 表面微机械混合工艺制备的

MEMS 加速度计和角速度传感器的电子稳定程序 (ESP) 系统代替了宏机械的 ESP 系统, 并投入量产。进入 21 世纪第一个 10 年的中期, MEMS 加速度计和应用软件相结合, 突破了超低功耗、超小体积、低成本和可大量生产的模拟以及数字输出的三轴加速度计的关键技术, 进入了消费手持产品市场, 开创了 MEMS 技术移动网络发展新阶段。由于导航应用等更高精度的要求, 以及和 MEMS 陀螺等其他传感器集成和微形化的发展, 近两年来 MEMS 加速度计技术继续向更高性能、与 CMOS 标准工艺结合以及低成本的方向发展, 在设计、工艺和新原理等方面有新的进步和创新, 如纳米间隙、三轴摇摆式结构、黄金电镀质量块/CMOS-MEMS 加速度阵列、纯 SiO<sub>2</sub> 质量块/全差动传感机制以及边缘场结构和类晶格新结构等。

为适应惯性导航平台的应用, 下一代 MEMS 加速度计必须与其他类型传感器包括陀螺仪、谐振器和磁力计设计共存一个单个模块中; 模块中的低气压对谐振结构的陀螺仪具有低噪声、高灵敏度的益处, 但在该环境下由于欠阻尼环式响应导致 MEMS 加速度计的稳态的建立时间较长和性能下降。为此人们提出了不同的解决方案来抑制欠阻尼加速度计不稳定的行为, 例如可利用闭环接口电路形成抑制系统; 通过反馈信号将静电力施加到质量块上。2013 年, Y. Jeong 等人<sup>[2]</sup>报道了具有纳米间隙的圆片级真空封装的三轴 MEMS 加速度计, 采用高深宽比的多晶和单晶 Si 工艺, 在 40  $\mu\text{m}$  厚的 SOI 衬底上制备三个单质量块面积小于 1 mm<sup>2</sup> 的小尺寸器件;  $x$  和  $y$  方向传感是内平面器件,  $z$  方向传感是外平面器件。其水平电容间隙和垂直电容间隙仅为 300 nm, 以提高灵敏度和空气的阻尼, 确保在低气压下 (约 1 Torr, 1 Torr = 133.322 Pa) 能稳定工作。同时还使用附加的阻尼电极进一步增加灵敏度和开环稳定工作。300 nm 的间隙提供较大的机电耦合系数, 使加速度计的谐振频率可设计得较高 (约 15 kHz), 因而产生其更好的抗冲击和振动的性能。该三轴加速度计的平面 ( $x/y$  轴) 和外平面 ( $z$  轴) 的标度因子测量值分别为 7.5 和 8.7 mV/g, 在加速度  $\pm 6 g$  的范围内, 其交叉轴的灵敏度小于 0.5%。为适应六自由度单片集成惯性测量组合 (IMU) 的要求, 2014 年该研究小

组<sup>[3]</sup>又研发了可在真空中工作的单质量块三轴摇摆式加速度计, MEMS 加速度计设计为准静态工作(非谐振传感器)并处在中等真空水平(1~10 Torr), 通过利用电容的纳米气隙(<300 nm)以增加挤压膜的空气阻尼。芯片尺寸的减小是由尺寸为  $450\text{ }\mu\text{m} \times 450\text{ }\mu\text{m} \times 40\text{ }\mu\text{m}$  的单质量块所组成的类摇摆结构来实现的, 其由 1 个十字形多晶硅弹簧固定在衬底上。纳米级的电容间隙允许所设计的加速度计具有高谐振频率(约 15 kHz), 为此提供较大的抗冲击和振动的能力。该三轴加速度计的  $x$ ,  $y$  和  $z$  轴的标度因子测量值分别为 5, 6 和 11 mV/g, 其交叉轴的灵敏度小于 3.0%。

为了监视不同生活环境下人们的日常活动, 在医疗保健业中对传感范围宽的 MEMS 加速度计的需求不断增长。为了实现上述运动传感器, 当前的 MEMS 加速度计需要进一步扩大可检测加速度范围, 质量块尺寸最小化以提高传感分辨率和大规模传感集成电路相集成以缩减整体芯片面积。2013 年, D. Yamane 等人<sup>[4]</sup>报道了具有宽测量范围的 CMOS-MEMS 加速度阵列。高密度的黄金用于质量块使得在降低器件尺寸的同时而不影响敏感度。此外, 黄金电镀的最大工艺温度低于  $400^{\circ}\text{C}$ , 适合在大规模传感集成电路芯片上采用后 CMOS 工艺可靠地实现 MEMS 传感器。所研发的 CMOS-MEMS 加速度阵列, 在  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  集成了 9 个不同类型的 MEMS 加速度计, 通过调整每个加速度计的特性使加速度阵列的测量范围达到  $1.7 \sim 20\text{ g}$ 。采用高密度黄金的每个质量块的面积等于或小于  $200\text{ }\mu\text{m} \times 200\text{ }\mu\text{m}$ , 使每个质量块的布朗噪声设计值低于  $100\text{ }\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。同年, Y. C. Liu 等人<sup>[5]</sup>还报道了全差动、多传感接口电路和三轴的纯  $\text{SiO}_2$  的电容式 CMOS-MEMS 加速度计的单片集成。其 MEMS 结构是采用 TSMC  $0.35\text{ }\mu\text{m}$  标准的 CMOS 工艺, 加速度计的弹簧、质量块、传感电极和应力补偿框架等均由 CMOS 工艺的金属层和绝缘层所制备, 单片中传感部分采用后 CMOS 工艺。该单片集成系统具有三个特点: 其一, 基于分时的读出电路比传统的三个独立的电路设计具有更小的芯片尺寸( $1.57\text{ mm} \times 1.73\text{ mm}$ ); 其二, 加速度计的全差动传感机制抑制了谐波信号, 使其信噪比有较大改善( $x$ ,  $y$  和  $z$  轴的传感单元的本底

噪声分别为 0.40, 0.21 和  $0.94\text{ mg}/\sqrt{\text{Hz}}$ ); 其三, 纯氧化层的叠层作为质量块和应力补偿框架等机械结构材料, 提高了温度的稳定性。

MEMS 加速度计广泛应用于汽车和航空领域, 同时也广泛用于受欢迎的消费电子产品, 包括智能手机、游戏机、个人媒体播放器、辅助导航系统和摄像机稳定系统等, 如何适应市场需求形成低成本大规模生产成为关键问题之一。因为 MEMS 加速度计的特性需要包含物理激励等一系列的测试, 其测试成本占生产过程中成本的主要部分。2013 年, E. Giomi 等人<sup>[6]</sup>报道了用于汽车的中等级  $g$  的 MEMS 加速度计特性测量的低成本新概念。为了解决在被测器件(DUT)、评估板、机械适配器和转台之间的失调和测试转换到另一个轴(如从  $x$  到  $y$ )或半轴(即从正到负)时环境的改变等两个问题, 研发了新的测试程序对自动测试设备进行第二次校准; 程序的第一个目标是正确补偿多重失调, 第二个是找到引起平衡的被测器件  $1\text{ g}$  加速度时所对应的角速度率, 这种特定的角速率应用于 DUT 线性加速度的测量。该方法可用于自动测试设备的低成本测量并获得较好的结果, 该新方法已经过三自由度的惯性测量组合验证。

边缘场结构的电容式传感对于惯性 MEMS 具有开发的潜力, 因为其去耦传感方向不是如梳齿结构那样来自吸引的方向, 因此本质上避免了齿间吸引的问题。2013 年, G. Langfelder 等人<sup>[7]</sup>报道了高灵敏度差动的边缘场的 MEMS 加速度计, 采用表面微机械工艺, 其具有非常薄的平面相连(胞的间隙为  $10\text{ }\mu\text{m}$ , 互连间隙为  $2\text{ }\mu\text{m}$ , 互连宽度为  $8\text{ }\mu\text{m}$ , 互连到质量块的间隙为  $1.6\text{ }\mu\text{m}$ )。该较薄的互连用于创建边缘场传感, 通过增加密度就可直接增加传感的灵敏度。该器件包含  $2 \times 27$  个胞, 其尺寸为  $450\text{ }\mu\text{m} \times 600\text{ }\mu\text{m}$ 。实验结果表明, 器件谐振频率为 850 Hz,  $Q$  值为 4, 灵敏度为  $6\text{ fF/g}$ , 线性量程为  $3\text{ g}$ , 线性误差小于 2.5% ( $\pm 3.5\text{ g}$ )。满刻度范围为  $\pm 100\text{ g}$  的 MEMS 加速度计广泛用于汽车行业的被动安全检测, 例如安全气囊控制系统中对冲击的检测, 为此传感器必须承受一个频谱从几赫兹到数百千赫的很大的加速度。2013 年, L. Baldassarre 等人<sup>[8]</sup>报道了用于精密阻尼的高  $g$  MEMS 加速度计。为了得到精密阻尼条件, 该方

法使质量块最小化；质量的减少，将获得较小的移动质量，并采用类晶格结构补偿所诱发的传感器刚度的损失。所提出的类晶格结构也被称为桁架结构，该桁架结构由连续梁和排列成三角形的铰链所组成，即使很低质量也具有好的刚性。

## 1.2 MEMS 陀螺仪

第一个 MEMS 陀螺仪基于压电原理采用石英制备，其在 20 世纪 90 年代后期被用于豪华的轿车。早期的 Si MEMS 陀螺仪是采用永磁作为驱动的，其逐步被 21 世纪初引入的静电驱动的 Si MEMS 陀螺仪所取代。目前 Si 和石英 MEMS 陀螺仪已广泛应用于汽车中的电子稳定控制、防滚翻和 GPS 导航等子系统，其在消费市场应用的主要障碍是价格；然而，随着新技术的突破和成本的进一步降低，MEMS 陀螺仪最终会进入手机、视频节目控制器和数码相机等消费市场。由于工业自动化仪表、航空电子设备和平台稳定等对高精度的要求，以及和 MEMS 加速度计等其他传感器集成和微形化的发展，近两年来 MEMS 陀螺仪技术向高精度、高稳定度等更高性能以及更高可靠性方向发展，在设计、工艺和新原理等方面有新的进步和创新，如自适应预测和补偿模型、专用频率调谐电极的设计、可调谐带宽的自动模式匹配、数字输出的读出电路、 $10^{-6}$  精度的标度因子自校准、力学正交误差以补偿热漂移、力再平衡、整角、自校准的机制、高谐振频率与抗振动、抗冲击失效机理和热原理新机制等。

对于大多数惯性导航系统的实际应用，需要从冷启动快速反应到“导航准备好”的状态，尤其对偏置漂移小于  $5^\circ/\text{h}$  的 MEMS 陀螺仪更是如此。在启动阶段，启动误差大大影响其角速度测量的精度。为了补偿启动 MEMS 陀螺仪的漂移曲线以满足快速启动的要求，有必要预测它们的趋势。2013 年，N. Yao 等人<sup>[9]</sup>报道了用于高精度 MEMS 陀螺仪的自适应预测和补偿模型，提出了一种基于分类和识别曲线算法的新自动预测和补偿结构，该算法具有支持向量机器和  $\chi^2$  统计学的知识。首先采用这个结构，高精度 MEMS 陀螺仪的启动漂移被自动分类和认可，然后相应的指数或多项式预测模型被选择用于分类启动漂移。实验证明，采用这种自适应结构，冷启动 100 s 后，MEMS 陀螺仪可以进

入高精密工作状态。

为了提高 MEMS 陀螺仪的信噪比，常采用与其模式频率相匹配的方法；已有正交信号幅度调整或控制谐振模式信号之间的相位差等方法，但其均存在较低信噪比或窄带宽的不足。2013 年，S. Sonmezoglu 等人<sup>[10]</sup>报道了具有改进标度因子热稳定性的高性能自动模式匹配的 MEMS 陀螺仪，采用 Si/玻璃的微机械工艺，在  $35\ \mu\text{m}$  厚的 SOI 衬底上制备具有隔离作用的频率调谐电极的单质量块全退耦的 MEMS 陀螺仪。其借助所设计的专用频率调谐电极，自动实现模式匹配系统并能保持驱动模式和传感模式的谐振频率之间的匹配。该方法通过保持质量块上的电压不变，使驱动模式和传感模式两者的频率响应相互隔离，从而在  $+20\sim-80\ ^\circ\text{C}$  的温度范围内，使器件的标度因子的稳定性提高了 4.4 倍；同时还保持一个较宽的频响带宽（大于 50 Hz）。测试结果表明，该 MEMS 陀螺仪实现了  $0.73^\circ/\text{h}$  非常低的偏置不稳定性和  $0.024^\circ/\sqrt{\text{h}}$  的角度随机游走（ARW）；测量的 ARW 和理论上预估的布朗噪声极限几乎是相同的（ $0.023^\circ/\sqrt{\text{h}}$ ）。2014 年，该研究小组<sup>[11]</sup>进一步研发了具有较宽和可调谐带宽的自动模式匹配的 MEMS 陀螺仪，利用在陀螺仪中驱动模式和传感模式之间调零后的剩余正交信号和驱动信号之间的相位关系来实现和维护匹配谐振模式的频率。该系统通过传感模式的力反馈控制器的均衡积分控制器参数可调整系统的带宽，且和机械传感器的带宽无关。在模式匹配工作时，系统实现的驱动和传感模式之间的频率分离的模式匹配误差小于  $10^{-5}/\text{Hz}$ 。在模式匹配条件下系统的带宽达 50 Hz 且可调，实验证明了 MEMS 陀螺仪偏置不稳定性和角度随机游走分别比模式不匹配时的相应指标（约 100 Hz）改进了 2.9 和 1.8 倍，分别达  $0.54^\circ/\text{h}$  和  $0.025^\circ/\sqrt{\text{h}}$ 。温度在  $0\sim100\ ^\circ\text{C}$  的变化范围内，由于结构不同，陀螺仪的驱动模式和传感模式分别表现出不同的频率温度系数，分别为  $-1.41\times10^{-5}$  和  $-2.32\times10^{-5}/^\circ\text{C}$ ；但实验数据显示在宽的温度范围内系统自动维护频率匹配的条件。

陀螺仪表头的电容读出电路的性能提高也是 MEMS 陀螺仪的关键技术之一。2013 年，

A. Ismail 等人<sup>[12]</sup>报道了基于数字输出的高性能 MEMS 陀螺仪，MEMS 表头和一个高度可编程电容式接口的 ASIC 电路相连接，构建成具有数字输出的完整的传感模块。该 ASIC 采用  $0.18\ \mu\text{m}$  高压 CMOS (HVC MOS) 工艺，其特点是可同时制备芯片面积为  $12\ \text{mm}^2$  的  $10\ \text{V}$  横向扩散 MOS (LD-MOS) 器件，在数字域内实现了传感和驱动两者的闭环信号处理；和模拟电路实现相比，提供了一个更高级的可编程环路系数和参数。数字实现的环路和自同步功能相结合，以及驱动和激励信号电压水平的可编程使该 ASIC 可与宽量程 MEMS 陀螺仪表头相接口。测量结果表明 MEMS 陀螺仪的性能优越，偏置不稳定性为  $1^\circ/\text{h}$ ，本底噪声为  $0.001\ 3^\circ/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，满量程为  $\pm 300^\circ/\text{s}$ ， $5\ \text{V}$  电源时工作电流为  $25\ \text{mA}$ 。

MEMS 惯性传感的精度受到其标度因子漂移效应很大的影响，因而限制了其在具有  $10^{-6}$  稳定性要求的导航级任务中的潜在应用。其  $10^{-3}/^\circ\text{C}$  量级的温度敏感性是限制 MEMS 惯性传感实现  $10^{-6}$  总体稳定度的主要因数。2013 年，A. A. Trusov 等人<sup>[13]</sup>报道了标度因子自校准的精度达到  $10^{-6}$  的 MEMS 科里奥利振动陀螺仪，采用传感模式增益闭环控制的标度因子自校准科里奥利振动陀螺。和半球谐振陀螺仪所用的标度因子闭环控制相同，在该陀螺仪正常运行时，通过在传感模式中注入已知的抖动信号以测量和去除标度因子的变化。该方法已经被已开发的 Si MEMS 四质量块陀螺仪所验证，其偏置不稳定性为  $0.2^\circ/\text{h}$ ，具有类似半球谐振陀螺仪的对称结构和低损耗。在  $10\ ^\circ\text{C}$  的温度变化范围内，已演示了其同步测量的准确值和自校准标度因子的估值之间的均方根误差的精度为  $3.5 \times 10^{-4}$ （由于启动阶段的限制），工作  $30\ \text{min}$  后精度达到  $10^{-6}$ 。2014 年，该研究小组<sup>[14]</sup>采用新的方法在 Si MEMS 四质量块振动陀螺仪上实现长时偏置稳定度的扩展，新的方法是利用陀螺仪中力学正交误差以补偿系统参数的变化。正交通常被认为是在陀螺仪中的寄生信号，其反应陀螺仪中的传感器对旋转感应的响应失真。该正交信号可以用于补偿传感模式检测系统的热漂移，正交信号的变化也可用于补偿寄生感应的旋转的响应，因此可减少电子学热漂移的影响。该新方法包括温度自传感的算法；

可利用驱动模式的谐振频率以校正系统的力学参数热漂移和边带比率的方法；可直接检测力学驱动模式的振幅的方法，三者的结合使陀螺仪的长时偏置稳定性达到高水平。该方法已由一个 Si MEMS 四质量块振动陀螺仪所验证，其固有频率为  $3\ \text{kHz}$ ，频率失配小于  $0.5\ \text{Hz}$ ，质量的因子为  $950$ ，封装中并没有吸气剂，其  $300\ \text{s}$  后的偏置稳定性为  $0.1^\circ/\text{h}$ ；重要的是，在  $3\ \text{h}$  的积分时间内其仍然保持该值。

科里奥利振动陀螺仪根据谐振器的物理形状和振动模式的性质可分为两类：其一是非对称结构，典型的结构是由具有高品质因数的双质量块的音叉来实现，该结构已达到的接近极限的偏置不稳定性为  $10^\circ/\text{h}$  量级；其二是振动条或对称结构，两者都允许驱动轴的任意定位。2014 年，A. A. Trusov 等人<sup>[15]</sup>报道了属于第二类的 Si MEMS 四质量块的陀螺仪的力再平衡、整角、自校准的机制。该陀螺仪的四个质量块具有反相耦合的杠杆机制，并提供两个在空间上  $90^\circ$  分开的动态平衡的振动模式；加吸气剂后其  $Q$  值为  $10^6$ 。在数字板上运行的控制软件实现了四个主要伺服回路：驱动振幅、驱动频率锁相环、传感的科里奥利力再平衡和传感正交。此外，控制驱动轴或模式角可以实现三个功能：锁定到规定位置以利于力的再平衡操作、允许推进响应全角操作的旋转和按指令以规定的速度旋转以利于虚拟转盘式自校准。力再平衡模式速率测量实验结果表明，其满量程为  $1\ 350^\circ/\text{s}$ ，角度随机游走为  $0.05^\circ/\sqrt{\text{h}}$  和偏置不稳定性为  $0.2^\circ/\text{h}$  或为满量程的  $5 \times 10^{-8}$ 。在几种不同温度下， $1\ \text{h}$  内以恒定的  $\pm 100^\circ/\text{s}$  旋转的整角的模式测量实验结果表明，其恒定角增益为  $0.75$ ，标度因子的不稳定性为  $3 \times 10^{-6}$ 。使用虚拟转盘自校准，即在陀螺仪伺服回路中的模式角度的回转和对控制信号的监控，从而可观察频率、阻尼和增益等方面的不匹配和失调作为模式角度的函数，且利用数学模型消除对偏置的贡献。

随着传感单元的谐振频率  $f_0$  的增加，MEMS 陀螺仪的尺寸减小，进而成本降低且易于集成，同时由于  $f_0$  的增加其抗外界振动的鲁棒性也得以改善。2013 年，J. T. Liewald 等人<sup>[16]</sup>报道了谐振频率  $f_0$  为  $100\ \text{kHz}$  的 MEMS 振动陀螺仪，采用具有

淀积在多晶硅上多功能层的表面微机械工艺, 100 kHz 的 MEMS 振动陀螺仪和 15 kHz 的参照陀螺仪在相同的晶圆上制备以利于性能比较, 其传感单元的尺寸在  $x/y$  方向比参照的减少 30%, 其电容间隙相比减少 60%。测量结果证明, 理论上是来自 15 kHz 参考模型的关键参数可以使精度扩展到 100 kHz。测量结果也表明, 谐振频率增加到 100 kHz, 具有效应相反的两面: 一方面, 陀螺的灵敏度大幅下降和正交误差上升; 另一方面, 抗振动的能力有较大提高。在振动频率低于 100 kHz 且振动振幅为 1 000  $g$  时, 其没有明显的错误, 其最大振动灵敏度为  $0.003^\circ/s/g$ , 比商业 MEMS 陀螺仪 ( $f_0 \approx 16$  kHz) 小 1 000 倍。

冲击影响 MEMS 陀螺仪的可靠性已成为其在汽车和航空航天应用的一个挑战; 在便携式消费电子产品中应用时, 冲击影响其可靠性仍然是一个主要问题, 如手机很容易意外下落。2014 年, J. Li 等人<sup>[17]</sup>报道了冲击对三轴 MEMS 陀螺仪可靠性的影响和失效分析。可靠性实验包括三个不同的方向和在 1 500~15 000  $g$  内的几种加速度的冲击影响。分别研究了 MEMS 器件的封装失效和功能失效; 失效分析显示 MEMS 器件封装失效的冲击水平高于 8 000  $g$ , 而由于梳状结构的黏滞或断裂所引起的器件功能失效的冲击水平约为 4 000  $g$ 。动态有限元分析与直接集成用于研究 MEMS 器件承受冲击载荷的非线性响应, 内部活动元素和固定部分之间的碰撞由接触定义建模。仿真结果表明, 如结构变形和应力计算分布, 可以用来预测潜在的失效位置和解释观察到的封装失效和梳齿结构裂缝的原因, 也预测了在 MEMS 结构中可能的黏滞作用的位置。利用流体粒子代替固体质量块开创了一个相对较新的 MEMS 研究领域; 流体惯性传感省略了可动部件, 具有器件结构简单和鲁棒性的特点。2014 年, J. Bahari 等人<sup>[18]</sup>报道了基于热原理的鲁棒的 MEMS 陀螺仪。该新颖的单轴热陀螺仪的工作原理是温差检测, 温差来自两个电阻微加热器交替产生的振荡气流的科里奥利效应。采用铂作为导体层的体 Si 微机械工艺。器件结构由两个微加热器等间隔的两个电阻温度探测器所组成。170 nm 厚的铂加热器和微结构探测器以最小的结构支撑, 自由悬浮在衬底内蚀刻的空腔上。在加热

器功率为 20 mW 时, 角速度为  $\pm 3.5$  r/s 的测试中, 器件展示优异的线性度, 十字形和矩形腔体的两种热陀螺仪的灵敏度分别为 0.947 和 1.287 mV/ $^\circ/s$ 。器件的鲁棒性实验表明, 抗下落冲击的能力为 2 722~16 398  $g$ 。

### 1.3 MEMS 惯性测量单元

经过六年的技术攻关, 1998 年第一个实用的 MEMS 惯性测量单元 (IMU) 诞生了, 其只包含三个 Si MEMS 的传感器<sup>[19]</sup>, 采用改进的体 Si 微机械工艺, 可用于战术级的导航。几乎同期在汽车工业中 MEMS 加速度计和角速度传感器的 ESP 系统代替了宏机械的 ESP 系统, 并投入量产。进入 21 世纪, MEMS IMU 进入机器人和消费市场, 可用于移动机器人改善测量距离、微型飞行稳定、微型直升机自治盘旋或表演、小型室内飞艇的定位和将微型惯性传感器集成到衣服或鞋子内用于人的跟踪。随着应用的需求, MEMS IMU 向更多自由度集成方向发展。目前 MEMS 惯性测量单元定义为一种器件, 其包含三轴加速度计、三轴陀螺仪、三轴磁力计和一个压力传感器; IMU 称为十自由度器件, 因为其包含集成在一个封装中的 10 个传感器。该集成可采用封装级 (共封装); 采用 3D 堆叠技术, 或部分传感器的集成或全部传感器集成于芯片级 (单片集成电路)。器件制造商正在竞相生产这些器件, 提高其性能, 降低成本。近两年来, MEMS IMU 向多自由度、小体积、低成本和可穿戴应用方向发展, 如用于室内移动定位的九自由度的无线微形 MEMS IMU 和低成本六自由度无线 MEMS IMU、用于运动分析与识别的十自由度的无线压力传感 IMU、采用零速度更新算法以提高低等级 IMU 用于位移估计的精度、采用可穿戴 IMU 估计人们游自由泳的能量消耗以及适合与 IMU 单片集成的新型 3D 磁场传感器。

为适应室内的移动定位服务, 2013 年, F. Höflinger 等人<sup>[20]</sup>报道了无线微型 MEMS IMU, 提供要求的最小的体积和重量, 采用四层 PCB 混合集成传感器和微控制器, 其尺寸为 22 mm $\times$ 14 mm $\times$ 4 mm (约 1.2 cm<sup>3</sup>), IMU 提供对三轴加速度计、三轴陀螺仪和三轴磁强计的数据的覆盖和全控制。其微控制器可将收集到的原始数据无线发送给基站; 最高传感器采样速率为 640 样本/s。

因此,通过移动数据到基站的快速处理使 IMU 性能得以优化。由于其体积小,该 IMU 可集成到衣服或鞋子中,以用于移动应用的精确位置估计和基于位置的服务。该 IMU 放在鞋中用于行人跟踪定位性能实验结果表明,基于卡尔曼滤波器和速度为零更新相结合的传感器数据融合处理,可以在室内区域精确地跟踪一个人的运动。IMU 可包含在消费电子产品中,如智能手机,用于人体运动分析、环境和活动识别的研究。同年,R. Adelsberger 等人<sup>[21]</sup>报道了无线压力传感 IMU,该传感器系统由四部分组成:IMU 模块(三轴加速度计、三轴陀螺仪和三轴磁强计)、鞋底形的压力传感器(具有 1 248 个敏感点,高的空间分辨率)、处理模块和远程装置(PC 或智能手机);IMU 模块和微控制器模块的总尺寸为 14 mm×45 mm×4 mm。压力传感器通常放置在一个鞋中以测量施加在脚上的力。数据可以存储在传感器节点或可以无线传输到远程装置,其负责数据流接收、传感器控制和分析,以自动实时检测人的坐、站立和走路的情况。该系统的低功耗使运行时间可超过 14 h。实验结果表明,该系统对区分站着、坐着和散步情况的实时分类精度大于 99%。

为了补充基于卫星导航的定位系统的局限性,2014 年,A. Patarot 等人<sup>[22]</sup>报道了室内行人的惯性导航传感和技术的实例研究,其采用基于商用的三轴 ADXL345 加速度计和三轴 ITG3200 陀螺组成的低成本 IMU;传感器、MPU 等电路、电池和智能手机无线连接等均组装在腰带上的盒子中。同时建立了腰带安装模式的相应算法,既可控制校准(陀螺仪静止时,通过颠簸积分来已知路径时),又可控制自由位移,以实时提供行人的位置。实验结果表明,腰带安装和脚安装技术一样高效,在行走 200 m 距离时,其定位平均误差小于 2%。

为了适应运动员和康复训练师在举重练习中要跟踪三个维度的位移和速度的需求,2013 年,J. L. Coyte 等人<sup>[23]</sup>报道了在运动和康复训练中应用低成本惯性传感器估计位移的分布。由于从各种来源积累的误差,先前使用的低成本 IMU 对于这类特定的应用是非常不切实际的。该研究采用抽样加速度和六自由度的 IMU 的定位数据,开发了数字集成和频率集成两种不同的方法应用到体育训练

和康复中的位移估计。提出了针对加速度噪声积累和陀螺仪角误差问题的解决方案,开发了一个零速度更新算法以改善采用低等级 IMU 时对位移估计的精度。实验结果表明,使用一个具有宽松公差 IMU 来确定位移的可行性,其采用数值集成的方法测得训练区域的峰值距离的测量精度为 5%。能量消耗的测量对理解任何类型人类运动的生物物理学是至关重要的,2014 年,F. Dadashi 等人<sup>[24]</sup>报道了采用可穿戴 IMU 估计人们自由泳时的能量消耗,该 IMU 由一个三轴加速度计、一个三轴陀螺仪、电池、一个内存单元和一个微控制器组成。使用一组四个防水的 IMU 戴在 18 岁游泳者的两个前臂、胫骨和右小腿上,以提取自由泳能量消耗主要的时空决定因素。使用可穿戴 IMU 获取描述符合游泳的生物力学的解释。这些描述作为贝叶斯线性模型的输入以用于估计能量消耗。为了提高评估的普及能力,采用游泳者的人体测量参数设计贝叶斯模型的非线性调整。同时采用间接测量的热量法和血乳酸浓度获得能量消耗的参考值。实验结果表明,评估提议的模型的测试数据显示估计和参考能量消耗之间表现出很强的相关性和 9.4% 的高相对精度。

为了适于和惯性传感器共集成以组成单芯片惯性测量组合,2014 年,D. Ettelt 等人<sup>[25]</sup>报道了用于 IMU 的 3D 磁场传感器概念,和传统的谐振 MEMS 磁传感器不同,其基于洛伦兹力的测量,新的磁传感器采用永磁材料和纳米尺度硅应变仪的压敏电阻检测,实现了适应小尺寸传感器的低功耗和高灵敏度。采用 MEMS 工艺在 SOI 衬底上淀积了 CoFe 与 PtMn 铁磁和反铁磁性的多层薄膜材料并形成在磁场作用下可运动的 MEMS 结构,其和支撑的 Si 纳米线结构的硅应变仪相连。三维磁场的测量是由在芯片上集成的三个相互独立的 MEMS 结构完成的。实验结果表明,磁场测量在  $x$  轴和  $y$  轴分量的灵敏度为 1.09 V/T,而在  $z$  轴分量的灵敏度为 0.124 V/T。为了实现在空间三个方向对磁场传感是灵敏的,在相同芯片上需要有两个永久磁化的方向。通过  $x$  轴和  $y$  轴灵敏度之间 99.7% 的测量校正以实现两个磁化方向的验证。该三维传感器的功耗小于 30  $\mu$ W,对应的极化直流电流为 100  $\mu$ A。其磁场在  $x$  与  $y$  轴向分量的分辨率

为  $100 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 在  $z$  轴向分量的分辨率为  $350 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 该传感器适用于地球磁场的精确测量。

#### 1.4 MEMS 麦克风

20 世纪 80 年代初期, 基于压电原理和 Si 微加工技术开发了首个 MEMS 麦克风。20 世纪 80 年代末到 90 年代初, 研发出采用体单晶硅工艺的 Si 电容式麦克风, 其适合于批量制造。随着手机和笔记本电脑的发展, 小、薄、全匹配且能在自动化生产线实现自动装配的 MEMS 麦克风商品化应运而生。2003—2005 年以表面微机械工艺制备的 Si 电容式传感的模拟输出的 Si 麦克风进入移动电话市场, 2006 年数字输出的 MEMS 麦克风进入笔记本电脑市场, 目前 MEMS 麦克风已成为年销售达 10 亿只的 MEMS 主流产品之一。近两年, MEMS 麦克风技术向提高性能、低噪声数字 I/O 接口电路和可靠性的方向发展, 在工艺和设计等方面均有创新, 如耦合膜的新结构设计、 $\text{SiO}_2$  牺牲层的 CMOS-MEMS 新工艺、无背板且具有平面接近气隙新结构、可扩展带宽的反相器基的  $\Delta\Sigma$  调制器, 硅纳线的低噪声智能传感和多晶硅结构机械失效机理研究等。

为了解决随着 MEMS 麦克风尺寸减小其灵敏度降低的问题, 2013 年, H. Gharaei 等人<sup>[26]</sup>报道了采用了耦合膜的新结构设计的高灵敏度的 MEMS 电容式麦克风。在 MEMS 麦克风中, 声波引起的膜的偏差。这个偏差使膜的表面接近背面板, 并使电容器的容量变化, 该变化是电容式麦克风的主要检测机制。同时膜的偏差导致其有效的表面减少, 对敏感度有负面影响。采用耦合膜的新结构设计以解决这一问题, 该耦合薄膜包括两部分: 第一部分是暴露在声波里, 第二部分设计为电容器的移动电极, 其通过一个接口和第一部分的中心相连。该设计提供了相同的偏转而保持有效表面积不变。计算模拟结果表明, 在较低的声压水平 (SPL) 时, 其机械灵敏度为主导, 而 SPL 足够大时 (大于 110 dB), 电灵敏度为主导, 导致开路灵敏度的增加。CMOS-MEMS 技术的优点是容易实现低成本的无掩模腐蚀以及 MEMS 器件和电路易于集成在同一芯片上。同年 J. Esteves 等人<sup>[27]</sup>报道了采用  $\text{SiO}_2$  牺牲层的 CMOS-MEMS 新工艺改善 MEMS 电容式麦克风的频率响应, 该器件是基于

$0.35 \mu\text{m}$  CMOS 标准工艺来制备, 和传统体 Si 微机械工艺形成背面的腔体相比, 该工艺只有在衬底前面的牺牲层  $\text{SiO}_2$  的一步无掩模的刻蚀。为了避免由于声压的均衡导致在低频区域声学的短路, 重点设计了隔膜的穿孔。隔膜上穿孔的位置和尺寸的选择在腐蚀时间和器件声学性能两者之间进行折中考虑。计算模拟结果表明, 该 MEMS 麦克风的谐振频率为 600 kHz, 在 100 Hz~300 kHz 内的相应灵敏度为  $11 \mu\text{V}/\text{Pa}$ 。低于 100 Hz 时, 由于隔膜上的穿孔引起声学的短路, 该器件在高频应用时有较好的匹配。实验结构的测量表明, 其电学和机械特性与设计结果相符。2014 年, C. I. Chang 等人<sup>[28]</sup>报道了无背板且具有平面气隙接近的 CMOS-MEMS 麦克风, 是适应 CMOS 标准工艺的新结构设计; 声压会使弹簧—隔膜结构变形, 进一步导致平面传感电极之间的气隙接近。因此, 声压力和悬浮弹簧的动力响应可由传感电容的变化来决定。这样的设计具有以下优点: 不需要背板, 进而也不需要使隔膜接近背板的偏压, 且也可预防隔膜和背板之间的接通和过程的黏滞作用; 容易与传感电路集成。设计的实现采用标准的  $0.35 \mu\text{m}$  CMOS 工艺, 典型的麦克风有  $200 \mu\text{m}$  直径的隔膜和 48 对金属/钨叠层传感电极。测量数据显示该麦克风的灵敏度在 1 kHz 为  $-64.78 \text{ dBV}/\text{Pa}$ 。

数字输出 MEMS 麦克风具有抗电磁干扰、更高的抗电源功率干扰和数字输出更有利于数字信号处理等优点。MEMS 麦克风的接口电路是关键之一, 传感器要求接口电路高性能、低功耗和低成本。2013 年, T. Christen<sup>[29]</sup>报道了用于数字输出 MEMS 麦克风的 15 bit,  $140 \mu\text{W}$  且可扩展带宽的反相器基的  $\Delta\Sigma$  调制器, 其特性是具有一个可扩展信号带宽以支持超声频率用于近距离传感, 如手势的识别。采用简单的数字反相器代替运算放大器 (OTA), 该调制器实现了低功耗和较小的芯片面积。为了提高反相器方法的鲁棒性, 稳压器用来提供一个内部生成的供电以调节反相器的偏置。稳压器也改善了电源的干扰。通过依据采样的频率动态调整内部电源电压, 该  $\Delta\Sigma$  调制器具有可扩展到 100 kHz 的信号带宽。在通常 20 kHz 音频带宽内, 其耗散功率为  $140 \mu\text{W}$ , 最小电源电压为 1.5 V, 动态范围为 92.6 dB, 信噪比为 87.9 dB, 总谐波



失真为  $-102.7$  dB。同年 J. Nebhen 等人<sup>[30]</sup>报道了基于硅纳米线的低噪声智能传感器的 MEMS 电阻式麦克风, 其采用创新的低成本技术实现音频感知, 利用在 MEMS 中的单晶硅纳米线的压敏电阻检测来达到。接口电路为定制的模拟前端设计, 由传感器调节和一位四级连续时间  $\Sigma\Delta$  调制器 (CT- $\Sigma\Delta$ M) 所组成; 采用  $0.28\ \mu\text{m}$  CMOS 工艺制备, 整个接口电路的电流消耗为  $2\ \text{mA}$ , 在  $10\ \text{Hz}\sim 10\ \text{kHz}$  内, 其噪声密度为  $7\ \text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。所获得的智能传感器具有降低输出数据率的特点, 适用于无线传感器网络, 其能将原始数据直接传输到远程基站。

MEMS 电容麦克风包含两个平行的由薄膜多晶硅所制成的隔膜, 而多晶硅是相对脆性材料。在生产中如何控制多晶硅薄膜的质量成为关键。2013 年, T. K. Cheong 等人<sup>[31]</sup>报道了减轻 MEMS 电容麦克风多晶硅结构机械失效的研究, 描述了电容式麦克风精密加工的经验, 提出了薄膜多晶硅膜片的机械故障风险降到最低的解决方案。该研究发现在多晶硅层的下面存在意想不到的埋层氧化“锁眼”形缺陷, 当该衬底经后续工艺中升高温度的处理时, 此缺陷是形成多晶硅薄膜断裂的主要原因。这种“锁眼”形缺陷的形成是由于采用 PECVD 单层  $\text{SiO}_2$  填充深槽时空气缺陷被包在其中的“面包条”效应; 采用低压正硅酸乙酯/ $\text{SiO}_2$  复合工艺以减少“锁眼”的尺寸可减少材料断裂的概率, 从而提高器件成品率。同年 W. X. Fang 等人<sup>[32]</sup>还报道了 MEMS 麦克风机械可靠性的研究, 按美军标 883 的恒定加速度实验条件对商业 MEMS 麦克风开展试验并进行失效分析。借助于实验和有限元算法模拟的结合, 发现所研究的麦克风的 MEMS 部分在垂直于隔膜平面可承受的应力极限大于  $20\ 000\ g$ ; 当恒定加速度高到  $30\ 000\ g$  时, 有 40% 的器件由于隔膜破裂而失效。

### 1.5 RF MEMS

第一只 RF MEMS 诞生于 1979 年。它是采用 Si 上的微机械薄膜开关结构, 经过 20 多年的发展 RF MEMS 已成为由薄膜体声波谐振器 (FBAR)、微机械谐振器、电容开关/变容器和金属接触开关等多类产品构成的 RF 无源元件微形化的主流产品之一。2003 年, FBAR 双工器以每月百万只的量进入 CDMA 移动通信市场, FBAR 成为首个商品

量产的 RF MEMS。微机械谐振器比传统的石英振荡器具有耐冲击、体积小、易于量产和易于与 CMOS 电路集成等优点。2007 年, 微机械谐振器首次商品化, 其开始进入石英振荡器的专属领域, 2013 年出货量已达 1 亿只, 年增长率为 70%<sup>[33]</sup>。RF MEMS 接触开关与 p-i-n 和 FET 固态开关相比, 具有低插损、高隔离、高线性和易于与 CMOS 电路集成等优点, 其商品化的主要障碍是可靠性。RF MEMS 电容开关/变容器比接触开关耐受 RF 功率的能力更强且具有更高的开关寿命, 其商用化所遇到的挑战是进一步降低成本以及介质充电等可靠性问题。近两年来, RF MEMS 向高可靠、低功耗和高性能方向发展, 新工艺和新结构设计不断突破。

#### 1.5.1 MEMS 谐振器

近两年, MEMS 谐振器向低功耗、低相位噪声、低抖动、单片集成和高频率方向发展, 在工艺、设计和材料等方面均有创新, 如振荡器电路的低功耗设计, CMOS 振荡器与 MEMS 谐振器共同设计, AlN 的强机电耦合和单晶 Si 的稳定性、低阻尼相结合, CMOS-MEMS 谐振器和跨阻放大器的单片集成, RF MEMS 谐振器的有源传感, 80 nm 气隙的电容式谐振器, 超低功耗的加热式 CMOS-MEMS 谐振器, 高 Q 多晶金刚石薄膜, 铌酸锂和硅上锆钛酸铅薄膜等。

AlN 轮廓模式 MEMS 谐振器具有较高的 Q 值, 较高的  $Q \cdot K_t^2$  乘积 ( $K_t$  是机电耦合系数), 其适合低功耗的应用, 且在相同的硅晶片上易实现多频率。为进一步降低先前报道的 AlN 基谐振器的功耗, 2013 年, X. T. Wu 等人<sup>[34]</sup>报道了采用 65 nm CMOS 工艺低功耗的基于 AlN 轮廓模式 MEMS 谐振器的可调谐振荡器, 该 AlN 轮廓模式 MEMS 谐振器由夹在两个铂电极之间的  $2\ \mu\text{m}$  厚的 AlN 薄膜组成, 其底部和顶部电极被图形化并分别连接, 并且和电信号或接地线相连接; 采用矩形轮廓模式振动, 其谐振频率主要由亚谐振器之间的宽度  $W$  来决定。在同一芯片上可制造多个频率的振荡器: 204, 517 和 850 MHz。中心频率为 204 MHz 的振荡器的最大调谐范围达到  $6.11 \times 10^{-4}$ 。由于该振荡器电路的 MOS 器件具有较低的阈值电压且工作在亚阈值区域, 导致在 0.55 V 电

源下的功耗仅为  $47\ \mu\text{W}$ 。所测量的振荡器相位噪声在偏离主频  $204\ \text{MHz}$  的  $1\ \text{kHz}$  处为  $-77\ \text{dBc/Hz}$ 。同年 J. Koo 等人<sup>[35]</sup>报道了低相位噪声的基于  $\text{AlN}$  轮廓模式 MEMS 谐振器的科耳皮兹振荡器, 采用  $0.13\ \mu\text{m}$  CMOS 工艺设计与制备基于  $\text{AlN}$  轮廓模式 MEMS 谐振器的差分科耳皮兹振荡器; CMOS 振荡器与 MEMS 谐振器共同设计并分析每个有源器件对相位噪声的影响, 同时设计了电流基温度补偿机制来减少振荡器漂移温度的漂移。该振荡器工作在  $1.16\ \text{GHz}$ , 总功耗为  $4.2\ \text{mW}$ , 工作电源为  $1\ \text{V}$ 。分别在频率偏离主频  $100\ \text{kHz}$  和  $1\ \text{MHz}$  处, 它的相位噪声分别达到  $-143.6$  和  $-173.3\ \text{dBc/Hz}$ , 其相位噪声的品质因数为  $228.3$ 。2014 年, H. Bhugra 等人<sup>[36]</sup>报道了可应用于高性能定时的压电谐振器。压电 MEMS 谐振器和电容式 MEMS 谐振器相比, 其传感层直接和电极接触, 两者之间不需要几百纳米的气隙; 其工作时不需要加直流偏置。该压电谐振器在 SOI 衬底上采用和 CMOS 兼容的工艺制备, 在单晶 Si 层上淀积了电极和  $\text{AlN}$  压电的叠层; 其把压电材料的强机电耦合优点和单晶 Si 的稳定性、低阻尼的优点相结合。该压电谐振器已商品化, 是目前最低的抖动 MEMS 振荡器, 在  $12\ \text{kHz} \sim 20\ \text{MHz}$  内, 其均方根抖动小于  $0.3\ \text{ps}$ 。此外, 该振荡器展示了长期频率稳定性, 在两年内其频率变化小于  $\pm 2 \times 10^{-7}$  ( $25\ ^\circ\text{C}$ ); 和典型石英的  $\pm 5 \times 10^{-7}$  可比。其很易通过  $1\ 500\ g$  耐冲击和  $20\ g$  的振动实验, 军级产品具有抗  $70\ 000\ g$  冲击的能力。

CMOS-MEMS 谐振器具有快速的周转时间、低成本、易成型、小尺寸和 MEMS/集成电路易于集成等特点。2013 年, V. Pachkawade 等人<sup>[37]</sup>报道了用于振荡器的 CMOS-MEMS 谐振器集成系统, 采用  $0.35\ \mu\text{m}$  CMOS 加工技术实现 CMOS-MEMS 谐振器和跨阻放大器在芯片上的集成。所设计的弹性模式的环形谐振器具有机械工作在全差分模式所需的模式形状特点, 有低频和高频两个谐振器, 其中心频率分别为  $1.39$  和  $9.34\ \text{MHz}$ 。全差分模式工作比传统单端输入和输出模式的馈通的电平低  $30\ \text{dB}$ 。在芯片上低频谐振器和跨阻放大器的集成, 表现出很好的整体性能, 具有更高的传输谱 (接近  $0\ \text{dB}$ )、更大的馈通抑制、高的信号与馈

通的比率 ( $35\ \text{dB}$ ) 和精确的谐振频率相移 ( $0^\circ$ )。同年 B. Bahr 等人<sup>[38]</sup>报道了基于有源传感的固态 RF MEMS 谐振器, 其声学谐振器采用 CMOS 工艺中的硅和二氧化硅叠层制备, 由声学布拉格反射镜和将体接触 FET 嵌入声学共振腔的有源传感器组成。由于有源传感器在存在寄生效应之前对谐振信号具有放大功能, 使其比无源传感具有更高谐振频率的优点。采用  $32\ \text{nm}$  的 SOI 工艺实现体谐振 FET, 其谐振频率高于  $11\ \text{GHz}$ ,  $Q$  值约为  $30$ , 尺寸小于  $15\ \mu\text{m}^2$ , 该 CMOS 集成器件的热稳定性小于  $3 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。同年 T. L. Naing 等人<sup>[39]</sup>还报道了功耗为  $78\ \mu\text{W}$  且适应全球移动通信系统 (GSM) 相位噪声的皮尔斯振荡器, 其基频为  $61\ \text{MHz}$  酒杯园盘式谐振器。为提高性能, 将谐振器的芯片面积减少到原来的  $1/10$  (从  $0.1\ \text{mm}^2$  减小到  $0.01\ \text{mm}^2$ ); 其圆盘半径为  $32\ \mu\text{m}$ , 气隙为  $80\ \text{nm}$ , 其在真空中的  $Q$  值为  $130\ 000$ 。采用  $0.35\ \mu\text{m}$  CMOS 技术设计和制备适应皮尔斯振荡器的低相位噪声、低功耗的跨阻放大器。测量结果表明, 在  $61\ \text{MHz}$ , 该皮尔斯振荡器在偏离主频  $1\ \text{kHz}$  的相位噪声为  $-119\ \text{dBc/Hz}$ , 在远离主频的相位噪声为  $-139\ \text{dBc/Hz}$ 。当分频到 GSM 的  $13\ \text{MHz}$  时, 其对应的偏离主频  $1\ \text{kHz}$  的相位噪声是  $-132\ \text{dBc/Hz}$ , 在远离主频的相位噪声是  $-152\ \text{dBc/Hz}$ , 两者都满足 GSM 参考振荡器相位噪声的要求。如此低相位噪声和低功耗的微小的 MEMS 器件将可能成为低功耗自主传感器网络的关键环节之一。为了补偿 MEMS 谐振器温度引起的频率漂移, 2013 年, M. H. Li 等人<sup>[40]</sup>还报道了基于超低功耗的加热式 CMOS-MEMS 谐振器的 CMOS 集成振荡器电路, 其采用  $0.35\ \mu\text{m}$  CMOS 标准工艺设计并制备单片集成的加热式微机械谐振器电路, 其由一个双头梳齿谐振器、弯曲形状的加热器和读出电路所组成。在整个温度范围 ( $-40 \sim 85\ ^\circ\text{C}$ ) 其频率的温度稳定性为  $+6.7 \times 10^{-5} \sim -5 \times 10^{-5}$  (等效小于  $10^{-6}/^\circ\text{C}$ ), 且超低功耗加热器只有  $0.47\ \text{mW}$  的功率; 实现亚毫瓦水平的低加热能耗的关键是低导热材料 (二氧化硅和多晶硅) 和高的热绝缘材料组合的设计。在  $1.2\ \text{MHz}$ , 该加热式 CMOS-MEMS 振荡器在偏离主频  $1\ \text{kHz}$  的相位噪声小于  $-103\ \text{dBc/Hz}$ , 在偏离主频  $1\ \text{MHz}$  的相位噪声小

于  $-110 \text{ dBc/Hz}$ 。

基于新材料和其他压电材料的 MEMS 谐振器的研究和应用也在开展。2014 年, H. Najar 等人<sup>[41]</sup>报道了用于低损耗微机械谐振器的高热导率的多晶金刚石薄膜, 采用热灯丝化学气相沉积微晶金刚石薄膜, 通过优化淀积条件以提高其热导率, 并提高微机械谐振器的品质因数 ( $Q$ )。测量结果表明, 该双端梳齿多晶金刚石谐振器的  $Q$  为 241 047, 谐振频率为 246.86 kHz。同年 S. B. Gong 等人<sup>[42]</sup>报道了基于两端水平振动铌酸锂 MEMS 谐振器的单片集成多频宽带 RF 滤波器, 铌酸锂具有高  $Q$  值和高机电耦合系数, 适合用于射频滤波器。所制备的两种 MEMS 谐振器的中心频率分别为 500 和 750 MHz, 其机电耦合系数分别为 8% 和 14.6%。由两种谐振器所组成的自耦合射频滤波器具有低损耗 (4 dB) 和宽带滤波; 其 3 dB 带宽在 500 和 750 MHz 分别达到中心频率的 2% 和 3.9%。同年 H. Yagubizade 等人<sup>[43]</sup>还报道了基于硅上锆钛酸铅薄膜压电的轮廓模式谐振器的超高频 (UHF) 4 阶带通滤波器, 该谐振器基于在  $3 \mu\text{m}$  硅薄膜上采用脉冲激光沉积了  $1 \mu\text{m}$  厚的具有高介电常数的锆钛酸铅薄膜所组成。一个超高频四阶带通滤波器基于两个略有不同的共振频率的二阶轮廓模式谐振器, 该带通滤波器的带宽约为 28.6 MHz, 在 700 MHz 频率附近具有大于 30 dB 的阻带抑制。

### 1.5.2 RF MEMS 开关

RF MEMS 开关近两年向增加可靠性、降低损耗、新结构和 NEMS 方向发展。在可靠性机理、设计、工艺和新材料等方面均有创新, 如互调失真机理、驱动电压冲击机理、键合封装窄气隙结构、硅通孔 (TSV) 新结构、回流玻璃结构、双稳态结构、可开关的 AlN 压电谐振器、可重构 MEMS 表面的波导开关、可调谐带通/带阻滤波器和 SiC NEMS 开关等。在低功率水平时, MEMS 电容式开关比传统的半导体开关具有更好的线性, 然而在高射频功率水平时, 互调失真成为重要问题。2013 年, D. Molinero 等人<sup>[44]</sup>报道了高 RF 功率下 MEMS 电容开关中的互调失真的研究。理论和实验研究表明, 在高 RF 功率下, 其额外的失真是由 RF 功率使开关膜自加热所引起的, 自加热显著降

低了该膜的弹簧系数。该结果意味着在输入功率触发自驱动之前, 失真可能会迅速增加到一个不可接受的水平, 以致 MEMS 电容开关承载功率的能力将受限于互调失真而不是自驱动。决定 RF MEMS 开关的寿命的关键因素之一是偏压的波形。2013 年, A. Fruehling 等人<sup>[45]</sup>报道了驱动电压对于商用欧姆接触 RF MEMS 开关的寿命的影响, 对商业化的欧姆接触 RF MEMS 开关进行批量研究。结果表明, 当开关驱动的偏置电压小于额定工作点的 15% (29 V) 时, 观察到有 75% 的器件寿命增加大于 6 倍。虽然偏置电压降低了 15% 会增加开关过程的跳变行为, 但仿真结果表明, 减少了 15% 偏置电压会使开关的冲击速度和力量分别降低了 24% 和 42%。但开关寿命显著增加也带来一些不足。其增加了开关接触电阻的离散 ( $1 \sim 3.1 \Omega$  与  $1 \sim 2.5 \Omega$  比较), 也增加了开关的下降时间 ( $48 \mu\text{s}$  与  $13 \mu\text{s}$  比较)。MEMS 开关的封装技术对开关寿命和大规模生产成本尤其重要。同年 T. Nakatani 等人<sup>[46]</sup>报道了采用圆片级封装并具有较窄接触间隙的可靠的压电 RF MEMS 开关, 采用微机械工艺在 SOI 晶片上制备坚硬的单晶硅梁, 其具有压电动作机构和接触凸点, 且无背面腐蚀。将该晶片的键合和低温共烧陶瓷 (LTCC) 的帽层晶圆片再键合在一起, 直接封装为一个开关, 其接触间隙仅为  $0.5 \mu\text{m}$ , 而不采用牺牲层的工艺。该开关工作多达 10 亿个周期后, 仍保持较低插入损耗 (在 5 GHz 下小于 0.4 dB), 其驱动电压为 20 V。该单刀单掷 (SPST) 开关的尺寸为  $1.6 \text{ mm} \times 1.1 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ , 适合表面贴装。

为了适应在 4G 通信前端的超宽带中所用多个无线标准的切换, 2013 年, T. Seki 等人<sup>[47]</sup>报道了用于 4G 前端的 RF MEMS 开关, 该单刀双掷结构的 RF MEMS 开关采用具有金属接触和静电驱动器 SOI “驱动衬底” 和具有驱动器的运动部分的高阻 Si “帽层衬底” 相互键合的结构。通过使用 TSV 结构避免了趋肤效应的损耗并减少了信号线到衬底的损耗, 同时减少了开关的体积。采用集成的电荷泵电路使内部驱动开关 28 V 转换为外部的 3 V 驱动。该 RF MEMS 开关在 3 GHz 时, 不仅有很低插入损耗 (小于 0.25 dB) 和大于 30 dB 的高隔离度, 还具有高的线性度和非常低的谐波失

真。为了进一步降低 Si 梁对 RF MEMS 插入损耗的影响, 2014 年, J. H. Wang 等人<sup>[48]</sup>报道了采用回流玻璃结构的低损耗 RF MEMS 硅开关, 通过玻璃回流工艺将玻璃结构插入到 Si 梁之中和金属接触形成一体, 以减少 RF MEMS 开关的插入损耗。在 5~30 GHz 内, 对该 RF MEMS 开关进行 S 参数测量, 其插入损耗为 0.12~0.33 dB, 比 Si 同类开关的插入损耗降低了 0.26 dB。

为适应不同应用发展的需要, RF MEMS 的新结构设计和新的应用研究也在不断地发展。2013 年, A. Yahiaoui 等人<sup>[49]</sup>报道了基于金属之间黏滞效应的双稳态 RF MEMS 开关电容器的新概念, 主要的思想是利用金属之间的黏滞作用使器件处于给定位置, 而金属与金属间的接触仅用于机械的目的而没有电的功能。20 V, 10  $\mu$ s 脉冲用于开关器件从一个稳定的位置转到另一个稳定的位置; 信号断开后, 器件在很长一段时间内维护自己的位置且变化很小; 在实验室环境柜橱里存储 4 天, 其开态的电容相对漂移 0.06%。采用 MEMS 常规工艺制备该器件, 其关态的和开态的电容比为 3。为了未来自适应和可以重构的射频系统的发展, 高品质因数的可重构和自适应滤波器是必要的。同年 C. D. Nordquist 等人<sup>[50]</sup>报道了可开关的 AlN 压电谐振器, 其作为一种新的构建块可用于自适应和可重构的滤波器。该新型谐振器集成了 AlN 轮廓模式 MEMS 谐振器和射频 MEMS 电容式开关两种技术, 以改变 RF 信号电极和压电薄膜之间的耦合。模拟结果表明, 1.5  $\mu$ m 的间隙将使两者的耦合最小化, 而 10 nm 的间隙将使两者的耦合与接近电极的亲密接触一样有效, 说明使用这种新结构可以实现耦合的高对比度。采用高阻 Si 衬底和 Si CMOS 兼容工艺制备该新型谐振器, 其可开关谐振的面积小于 0.1 mm<sup>2</sup>。对 400  $\mu$ m $\times$ 150  $\mu$ m 的两端口的谐振器的测量结果表明, 其开关比率为 13 dB, Q 值为 170, 中心频率为 240 MHz。

将 RF MEMS 技术和毫米波波导相结合用于波导开关部件, 将比传统的旋转电机的波导开关具有小尺寸和快响应时间等优点, 比 p-i-n 二极管具有更好的 RF 性能。2013 年, Z. Baghchehsaraei 等人<sup>[51]</sup>报道了基于可重构 MEMS 表面的毫米波 SPST 波导开关。采用微机械工艺制备的芯片由折

叠弹簧、梳齿驱动的致动器和可重构表面组成。该可重构表面是一组矩阵式的垂直的悬臂列, 其分为成两组: 活动部分和固定部分; 其可以由水平集成的 MEMS 梳齿驱动致动器所驱动, 使传输态和阻塞态之间可相互转换。在完全阻塞状态, 垂直的阵列使主要 TE<sub>10</sub> 模式的电场线形成短路以抑制波的传播。采用特制的法兰盘将该芯片集成于 WR-12 波导中。测试结果表明, 在 60~70 GHz, 该波导开关关态的隔离度大于 30 dB, 开态的插入损耗小于 0.65 dB, 驱动电压为 44 V。该器件工作 14 h 后, 开关了 430 万次, 再次进行了性能测量, 结果表明其没有性能指标的退化。在动态干扰环境下, 宽带无线电系统需要在频谱中有选择的接受信号, 提出带通/带阻滤波器的需求, 2014 年, Y. H. Chao 等人<sup>[52]</sup>报道了在 0.7~1.1 GHz 频段具有带宽控制的可调谐两极和四极带通到带阻滤波器, 其带通到带阻转换和带宽控制是通过调节不对称负载微带谐振器的耦合系数来实现的。分别采用 RF MEMS 开关和一个串联耦合变容二极管对源/负载和输入/输出耦合系数进行控制。测试结果表明, 在两极滤波器的带通模式中, 中心频率的调谐范围是 0.78~1.10 GHz; 在 0.95 GHz, 实现可调 1 dB 带宽为 68~120 MHz。两极滤波器带阻模式的抑制电平超过 30 dB。四极滤波器的带通模式中, 中心频率的调谐范围是 0.76~1.08 GHz, 在 0.94 GHz, 实现可调 1 dB 带宽为 64~115 MHz。四极滤波器带阻模式的抑制电平超过 40 dB。

NEMS 开关和 MEMS 开关相比, 具有较小漏电流的陡直切换、超小尺寸和高速度 (具有三个数量级的改善)。在新兴的 NEMS 开关中, SiC 器件表现出卓越的性能和具有向长寿命的鲁棒的 NEMS 逻辑发展的潜力。2014 年, T. He 等人<sup>[53]</sup>报道了采用超灵敏激光干涉仪对接触模式的 SiC NEMS 开关动力学的研究, 其通过直接探测 SiC 纳米悬臂振动的尖端, 来研究该开关的动力学行为。在 4 英寸 (1 英寸 = 2.54 cm) Si/SiO<sub>2</sub> (500 nm) /SiC (500 nm) 衬底上采用表面纳机械工艺制备三端水平 SiC NEMS 开关, 其悬臂长为微米级, 宽、厚和气隙均为 200~300 nm。方法一是设计了独特的“泵和探针”类型的光学技术: 采用一个 RF 调制的 405 nm 波长的 (蓝色) 激光去激发 SiC 悬臂梁,

同时采用 633 nm 波长的（红色）激光干涉仪探测它的尖端的运动。方法二是通过静电栅直接启动 SiC 器件，同时用光学监控悬臂梁的运动。通过增加振幅驱动使 SiC 悬臂梁接近谐振频率，当器件做周期接触时，发现了其动力学新的特征。实验结果表明，毫伏级电压驱动的该 SiC NEMS 开关，其“冷”开关模式的开关周期大于 100 亿次。

### 1.5.3 RF MEMS 电容

近两年，RF MEMS 电容已商品化，向可调滤波器、谐振器和带阻滤波器等应用研究的方面发展，在电路设计和工艺上有创新，如可调谐四极梳状线滤波器、采用 RF MEMS 变容器的衰减模式谐振腔、超材料的平面可调谐滤波器和低温超导可调谐带阻谐振器等。商品化的 RF MEMS 电容具有全密封、高可靠、大量生产而一致性好、集成升压变换和串行接口（SPI）控制等功能而易于控制等特点，有力支持了应用研究的开展。2013 年，C. H. Ko 等人<sup>[54]</sup>报道了采用商用高可靠 5 bit RF MEMS 电容研制的首款在 1.5~2.4 GHz 频段的可调谐四极滤波器，该 RF MEMS 电容采用 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 标准工艺制造并完全密封，其与高电压驱动器和 SPI 控制逻辑电路集成而形成具有 32 bit 的数字可调电容，且具有数十亿周期的可靠性。该可调滤波器是把 MEMS 电容放在每个谐振器上的一个标准的四极梳状线设计。测试结果表明，其调谐频段为 1.5~2.4 GHz，功率处理能力大于 20 dBm，在 1.9 GHz 的二次和三次谐波小于 -125 dBc（在 20 dBm），输出三阶互调为 33~35 dBm。在 2.156 GHz，输入 5 MHz 宽带码分多址（CDMA）信号，功率为 20 dBm，其相邻信道功率比为 45~48 dB。同年 A. Anand 等人<sup>[55]</sup>报道了具有集总调谐元的独特的高 Q 且倍频程可调谐的谐振器，其采用高负载衰减模式谐振腔设计技术。和传统的设计不同，该谐振器的调谐采用可调谐的变容器，其被放置一个衬底/集成衰减模式腔体顶部的表面。该新设计在不牺牲 Q 值的前提下显著降低传统设计的集成复杂性。测试结果表明，采用固态变容器的可调谐振器的频率调谐范围为 0.5~1.2 GHz（调谐的比例为 2.4:1），Q 值为 82~197。基于相同的可调谐振器设计而采用 RF MEMS 变容器，调谐范围为 6.25~6.6 GHz，

Q 值为 140~240。

采用超材料的平面可调谐滤波器和体调谐滤波器相比，具有低损耗、高线性和易于批量生产等特点。2014 年，B. Pradhan 等人<sup>[56]</sup>报道了采用超材料的 RF MEMS 可调谐带阻滤波器，在 Si 衬底的共面波导（CPW）传输线上，采用超材料结构的互补裂缝环谐振器（CSRR）和 RF MEMS 可变电容器相结合，和平面集成电路技术兼容。CSRR 是在 CPW 的信号线和接地上刻蚀而成，而信号线之间的“MEMS 桥”处于载有 CSRR 的接地上以形成可变电容器。通过静电驱动该 RF MEMS 可变电容器，调制滤波器的电特性，使其谐振频率可调。模拟结果表明，在“MEMS 桥”处于下状态时，其带阻抑制为 -20.19 dB，中心频率为 35.32 GHz；当“MEMS 桥”处于上状态时，其带阻抑制为 -18.29 dB，中心频率为 38.80 GHz。在低温下工作的超导接收机的前端需要可调射频滤波器来消除干扰，而 RF MEMS 是唯一能够与超导微电子集成在芯片上的可调技术。2014 年，S. S. Attar 等人<sup>[57]</sup>报道了采用超导 RF MEMS 可变电容的低温超导可调谐带阻谐振器和滤波器，其采用铌基超导 RF MEMS 可变电容，该器件适合与超导微电子技术相集成。在低温（4 K）下，射频可变电容可从 40 fF 变化到 0.46 pF。该可变电容可用于设计一个单片集成可调谐谐振器。低温测量结果表明，当偏置电压在 0~58 V 变化时，其谐振频率在 2.62~2.54 GHz 连续可调，而在 2.54~1.95 GHz 是一个离散的漂移。使用相同的制造工艺，设计了中心频率为 2 GHz 的铌基三极带阻滤波器，尺寸为 5 mm×0.85 mm，在低温下，实测中心频率为 2.7 GHz，调谐带宽约为 500 MHz，带阻抑制大于 -35.0 dB。

（未完待续）

作者简介：



赵正平（1947—），男，江苏扬州人，硕士，研究员，博士生导师，中国电子科技集团公司科技委副主任，宽禁带半导体材料与器件、下一代 GaN 技术等重大基础研究课题的首席专家，GaAs 专用集成电路重点实验室首席专家，长期从事 GaAs 微电子、微波功率器件、微电子机械系统、宽禁带半导体器件与电路以及纳电子学等方面的研究工作。