文章编号: 1007-4252(2025)02-0071-17 DOI: 10.20027/j.gncq.2025.0009 CSTR: 32180.14.j.gncq.2025.0009

硅谐振式 MEMS 加速度计的研究进展及未来展望

王金涛[1], 刘 飞[2], 曹慧通[2], 李陈征[2], 申燕超[2], 王永胜[2], 任天令[1,*]
（1. 清华大学集成电路学院, 北京 100084; 2. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074）

摘要: 硅谐振式 MEMS 加速度计具有体积小、精度高、功耗低和抗干扰能力强等优点, 是一种应用前景良好的高精度 MEMS 惯性仪表, 可广泛应用于惯性导航、地震监测和重力测量等领域。本文总结分析了国内外主要科研机构关于硅谐振式 MEMS 加速度计的最新研究进展, 探讨了优化硅谐振式 MEMS 加速度计性能的关键技术, 包括结构设计、加工工艺、测控电路和封装技术等, 最后对硅谐振式 MEMS 加速度计的未来发展方向进行了展望。

关键词: 硅谐振式 MEMS 加速度计; 硅微加速度计; 谐振式加速度计
中图分类号: TP212.9 **文献标志码:** A

Research status and development trend of silicon resonant MEMS accelerometer

WANG Jin-tao[1], LIU Fei[2], CAO Hui-tong[2], LI Chen-zheng[2], SHEN Yan-chao[2], WANG Yong-sheng[2], REN Tian-ling[1,*]
(1. School of Integrated Circuits, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: The silicon resonant MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) accelerometer offers several advantages, including small size, high precision, low power consumption, and strong anti-interference capabilities, making it a highly promising high-precision MEMS inertial instrument. It could be widely used in fields such as inertial navigation, seismic monitoring and gravity measurement. This review summarizes and analyses the latest research progress on silicon resonant MEMS accelerometers by major research institutions domestically and internationally, discusses the key technologies for optimizing the performance of these accelerometers, including structural design, process manufacturing, measurement and control circuit, and package technology, and finally provides an outlook on the future development directions of silicon resonant MEMS accelerometers.

收稿日期: 2025−01−16; **修订日期:** 2025−03−18
基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3204100; 2021YFC3002200); 国家自然科学基金资助项目 (U20A20168).
作者简介: 王金涛 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高性能 MEMS 加速度计接口电路设计 (E-mail: jt-wang23@mails.tsinghua.edu.cn).
通信作者: 任天令 (1971—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新型二维电子器件与集成系统、先进智能芯片与系统、智能传感器与集成微系统等 (E-mail: rentl@tsinghua.edu.cn).

Key words: silicon resonant MEMS accelerometer; silicon MEMS accelerometer; resonant accelerometer

0 引言

20 世纪 80 年代以来，微机电系统（Micro-Electro-Mechanical System, MEMS）的发展极大推动了传感器领域的革新，特别是在加速度计领域，MEMS 技术使传统机械结构的加速度计转变为具有微纳结构的 MEMS 加速度计。这种新型的 MEMS 加速度计具有更小尺寸、更高精度和更低功耗[1]，被广泛应用于惯性导航[2]、地震监测[3]、医疗器械[4]和消费电子[5]等领域。

按照工作原理的不同，MEMS 加速度计可分为电容式、压阻式、压电式和谐振式等不同类型[6, 7]。与传统的电容式、压阻式和压电式 MEMS 加速度计相比，谐振式 MEMS 加速度计通过测量谐振器的频率变化来检测外界加速度，具有分辨率高、噪声低、动态范围大和抗干扰能力强等优点[8]，被认为是继摆式积分陀螺加速度计和石英挠性加速度计之后的下一代高精度导航器件[9]。

硅谐振式 MEMS 加速度计自 20 世纪末被提出之后，迅速成为 MEMS 惯性仪表领域的研究热点。经过近 30 年的发展，硅谐振式 MEMS 加速度计取得了巨大进步，逐渐向高精度应用领域发展[10, 11]。本文将在第一节中首先简要介绍硅谐振式 MEMS 加速度计的基本原理，在第二节中系统回顾国内外主要科研机构在硅谐振式 MEMS 加速度计领域的研究进展，在第三节中将对提升硅谐振式 MEMS 加速度计性能的关键技术方向进行探讨，最后对硅谐振式 MEMS 加速度计的未来发展趋势进行展望，并对本文工作进行总结。

1 基本原理

1.1 微机械结构

从图 1 所示的微机械结构示意图中可以看出，硅谐振式 MEMS 加速度计主要由检测质量块、支撑梁、微杠杆和谐振器组成。图中的可动硅结构通过斜杠区域的锚点连接到基底上。

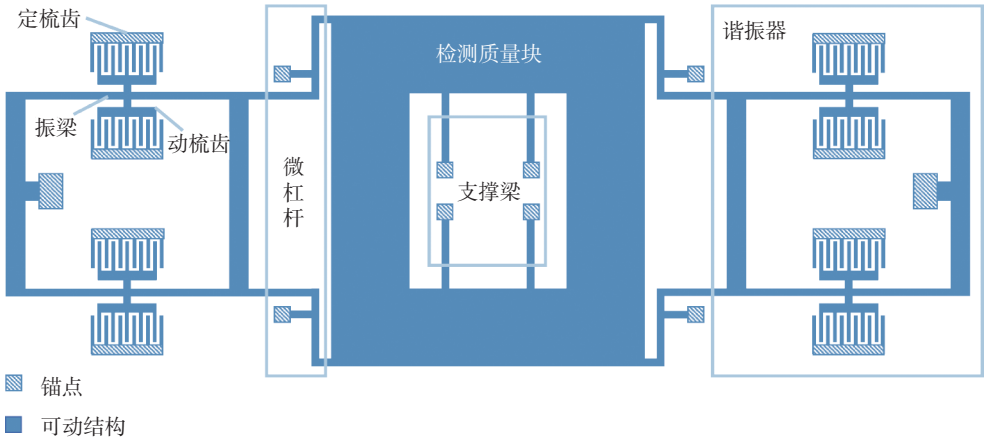

图 1 硅谐振式 MEMS 加速度计微结构的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of silicon resonant MEMS accelerometer microstructure.

检测质量块为自由悬挂的硅片结构，通过中心支撑梁实现悬置。由于支撑梁在敏感方向（图中的水平方向）上的刚度很小，因此检测质量块可以在敏感方向自由移动，主要起到将外界输入的加速度信息转换为惯性力的作用。微杠杆通常由弯曲刚度较小的细长梁构成，主要作用是对检测质量块产生的微弱惯性力进行放大，以提高硅谐振式 MEMS 加速度计的灵敏度。谐振器是硅谐振式 MEMS 加速度计的核心敏感结构，由固定不动的定梳齿、振梁及可移动的动梳齿构成，主要作用是将输入的惯性力转化为频率信息。

1.2 基本工作原理

硅谐振式 MEMS 加速度计基于谐振器的谐振

频率对惯性力的敏感响应来实现测量。当检测质量块在敏感方向上感受到外界的加速度信息时, 首先会偏离中心位置, 产生轴向惯性力; 经微杠杆结构的放大作用, 惯性力被分别传递至两侧的双端音叉(Double-Ended-Tuning-Fork, DETF)谐振器, 其中一侧的谐振器受拉力导致谐振频率增大, 另一侧的谐振器则受压力导致谐振频率减小。在一定的量程范围内, 谐振频率的变化量与输入加速度成正比。因此, 通过精确测量两侧谐振器的差分谐振频率, 即可获得外界的加速度信息[9]。

硅谐振式 MEMS 加速度计一般采用静电驱动、电容检测的方式来驱动谐振器并检测谐振频率。在谐振器定梳齿的驱动端施加驱动电压后, 会在敏感方向上产生交变电场, 进而形成横向驱动力, 使动梳齿往复振动。当驱动电压频率与动梳齿固有频率一致时, 系统便会发生谐振; 此时, 利用梳齿电极检测谐振器谐振时的电容变化, 并将其转化为电压或电流变化, 便可反向标定相关惯性信息, 得到标度因数等参数, 供后端计算加速度信息。

2　国内外研究进展

2.1　国外研究进展

国外研究机构最早在 20 世纪 90 年代开始开展硅谐振式 MEMS 加速度计的相关研究。随后, 美国 Honeywell 公司[12]、Draper 实验室[10, 13-15]、加州大学伯克利分校[16-22]、英国剑桥大学[23-28]、法国 Thales 公司[29, 30]、斯坦福大学[31]、意大利米兰理工大学[32-35]、新加坡国立大学[36, 37] 和韩国首尔国立大学[38] 等高校和科研机构相继展开了长期研究, 并取得了一系列进展。

2.1.1 美国 Draper 实验室

1997 年, 美国 Draper 实验室与麻省理工学院合作开展了硅谐振式 MEMS 加速度计的相关研究[13]。1997 年至 2000 年, Draper 实验室先后研发了三代硅谐振式 MEMS 加速度计样机[13-15], 其工作原理及加速度计结构照片如图 2 所示。

第一代样机为硅谐振式 MEMS 加速度计概念的可行性验证。研究者选择谐振器的反向模态为工作模态, 采用成熟的硅 MEMS 陀螺加工工艺和驱动检测电路, 并用陶瓷管壳进行真空封装。最终谐振器的品质因数(Q 值)达 1×10^5, 但标度因数仅

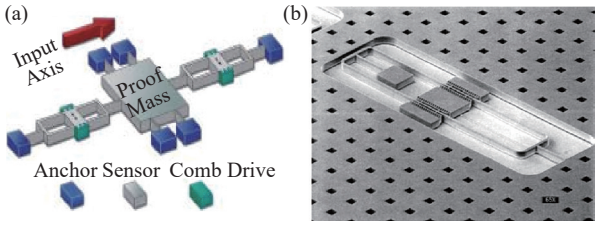

图 2　Draper 实验室研制的硅谐振式 MEMS 加速度计。(a)工作原理示意图; (b)加速度计结构照片[13, 15]

Fig. 2　The silicon resonant MEMS accelerometer developed by Draper Laboratory. (a) Schematic diagram of the working principle. (b) Photograph of the accelerometer structure[13, 15].

为 3.5 Hz/g[13]。第二代样机通过大幅增加检测质量块的质量, 将标度因数提升至 100 Hz/g[14]。第三代样机引入微杠杆结构来放大惯性力, 在面积相比上一代减小 4 倍的同时, 标度因数达到 197 Hz/g[14, 15]。

2005 年, Draper 实验室报道了一种高精度硅谐振式 MEMS 加速度计[10]。该款加速度计采用自激振荡方式进行驱动, 使用玻璃上硅材料(Silicon On Glass, SOG)工艺制造, 并采用陶瓷管壳封装, 样机照片如图 3(a)所示。该加速度计的标度因数达 257 Hz/g, 谐振频率约为 20 kHz。在连续三天的测试时间内, 零偏稳定性和标度因数稳定性分别达到 0.92 μg 和 0.56 ppm(图 3(b)所示), 是目前唯一一款面向战略级导航的、精度最高的硅谐振式 MEMS 加速度计。

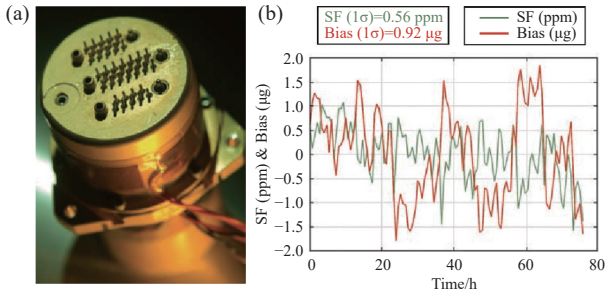

图 3　Draper 实验室研制的高精度硅谐振式 MEMS 加速度计。(a)加速度计样机照片; (b)零偏稳定性及标度因数稳定性测试结果[10]

Fig. 3 High-precision silicon resonant MEMS accelerometer developed by Draper Laboratory. (a) Photograph of the accelerometer prototype. (b) Results of the bias stability and scale factor stability[10]

2.1.2 美国加州大学伯克利分校

美国加州大学伯克利分校自 1997 年起采用表面微加工工艺, 先后研制了两代硅谐振式 MEMS 加速度计[16]。第一代为原理验证, 标度因数仅有

2.4 Hz/g。进一步地，其对加速度计结构进行全面优化，同时采用高真空封装，Q 值大幅提高至 1×10^4，标度因数达 30 Hz/g。

为进一步提高标度因数，加州大学伯克利分校的研究人员详细研究了微杠杆结构对硅谐振式 MEMS 加速度计的影响机理，提出了单级、两级甚至多级微杠杆结构的硅谐振式 MEMS 加速度计方案[17-19]。2002 年，该团队提出了一种具有两级微杠杆结构的硅谐振式 MEMS 加速度计[22]，其结构示意图及实物结构照片如图 4 所示。该结构可将惯性力放大 70 倍，大幅提高了加速度计的灵敏度；同时通过开发绝缘体上硅材料（Silicon On Insulator, SOI）工艺，大幅提升了刻蚀深宽比。最终结果表明，该两级微杠杆结构可大幅提升硅谐振式 MEMS 加速度计的性能。

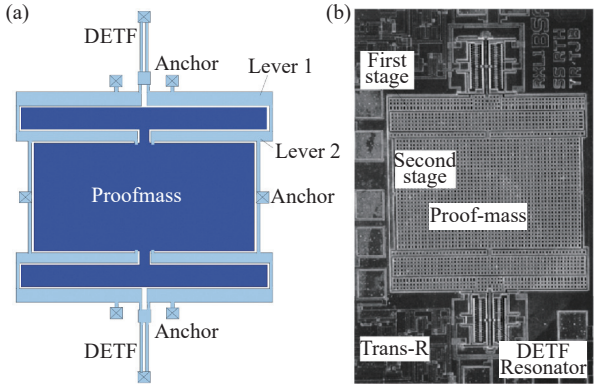

图 4 加州大学伯克利分校设计的具有两级微杠杆结构硅谐振式 MEMS 加速度计。(a)两级微杠杆结构示意图；(b)加速度计实物结构照片[22]

Fig. 4 The silicon resonant MEMS accelerometer with two-stage micro-leverage developed by the University of California, Berkeley. (a) Schematic diagram of the two-stage micro-leverage structure. (b) Photograph of the accelerometer structure[22].

2009 年，加州大学伯克利分校报道了一种具有平衡双端音叉（BDETF）结构的硅谐振式 MEMS 加速度计[39]。如图 5 所示，该结构是在 DETF 结构的基础上改进而成的，能够减小加速度计在强烈振动时的扭矩。测试表明，该加速度计的谐振频率约为 200 kHz，当外界加速度从 0 g 增大到 6.4×10^4 g 时，加速度计能够工作正常，表现出极佳的抗冲击性能。

2.1.3 英国剑桥大学

英国剑桥大学自 21 世纪初开始研究高精度硅谐振式 MEMS 加速度计，主要应用于倾角传感器

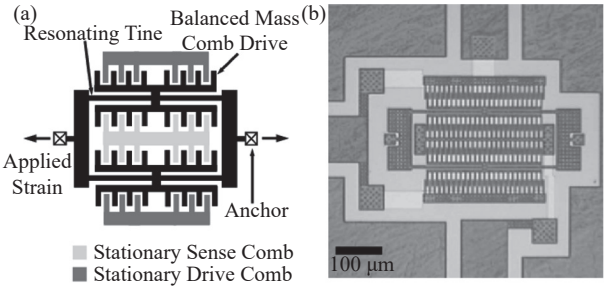

图 5 加州大学伯克利分校设计的具有平衡双端音叉结构硅谐振式 MEMS 加速度计。(a)平衡双端音叉结构示意图；(b)加速度计结构照片[39]

Fig. 5 The silicon resonant MEMS accelerometer with balanced double-ended tuning fork (BDETF) structure designed by the University of California, Berkeley. (a) Schematic diagram of the BDETF structure. (b) Photograph of the accelerometer structure[39].

和重力传感器。

2012 年，剑桥大学设计了一种基于硅谐振式 MEMS 加速度计的倾角传感器[23]，该款传感器采用 SOI 工艺加工，标度因数约为 500 Hz/g。通过结构优化、真空封装、利用自激振荡原理搭建闭环电路等措施，最终明显提升了加速度计性能，其标度因数高达 1400 Hz/g，分辨率提高了一个数量级。

2015 年，剑桥大学设计了一种采用晶圆级真空封装的高精度硅谐振式 MEMS 加速度计[24]。研究人员通过增大检测质量块质量和微杠杆结构的放大倍数，对加速度计的标度因数进行了提升；同时采用晶圆级高真空封装，大幅提升了 Q 值。最终加速度计的标度因数达 816 Hz/g，量程范围为 ±0.05 g，在 1 Hz-50 Hz 的范围内，噪声基底小于 144 ng/√Hz。

2019 年，该团队报道了一种采用单谐振器结

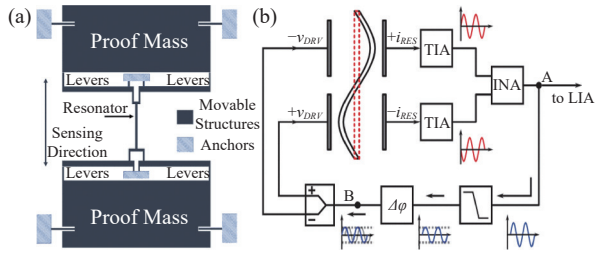

图 6 剑桥大学设计的单谐振器硅谐振式 MEMS 加速度计。(a)单谐振器结构示意图；(b)接口电路示意图[26]

Fig. 6 The silicon resonant MEMS accelerometer with single-resonator developed by the University of Cambridge. (a) Schematic diagram of the single-resonator structure. (b) Schematic diagram of the interface circuit[26].

构的高性能硅谐振式 MEMS 加速度计[26]。图 6 展示了该加速度计的结构示意图及接口电路示意图。该加速度计创新性地采用单谐振器差动检测方案，两个检测质量块分别通过微杠杆结构连接到中间的单根谐振梁。该设计能够避免传统差分谐振器谐振频率相近时发生的机械耦合现象，具有更高的灵敏度和线性度。该加速度计采用 SOI 加工工艺和晶圆级真空封装，标度因数高达 2752 Hz/g, Q 值约为 3×10^4, 固有噪声为 98 ng/√Hz, 零偏稳定性仅 56 ng。

2020 年, 剑桥大学报道了一种用于重力和地震信号测量的高精度硅差分谐振式 MEMS 加速度计[27]。图 7(a)展示了该加速度计的结构及闭环电路示意图。该加速度计基于振梁的谐振频率偏移，配备差分频率读出模块和温度漂移补偿模块，采用 SOI 工艺及深反应离子刻蚀工艺制备，通过晶圆级真空封装，并利用硅通孔(Through Silicon Via, TSV)工艺实现与外围电路的互连。测试结果表明，该加速度计的标度因数高达 5972 Hz/g, Q 值为 3×10^4, 噪声基底仅有 100 ng/√Hz。得益于其超高精度和灵敏度，该加速度计成功检测到了地球潮汐引力的变化，与理论预测结果高度符合(图 7(b))。

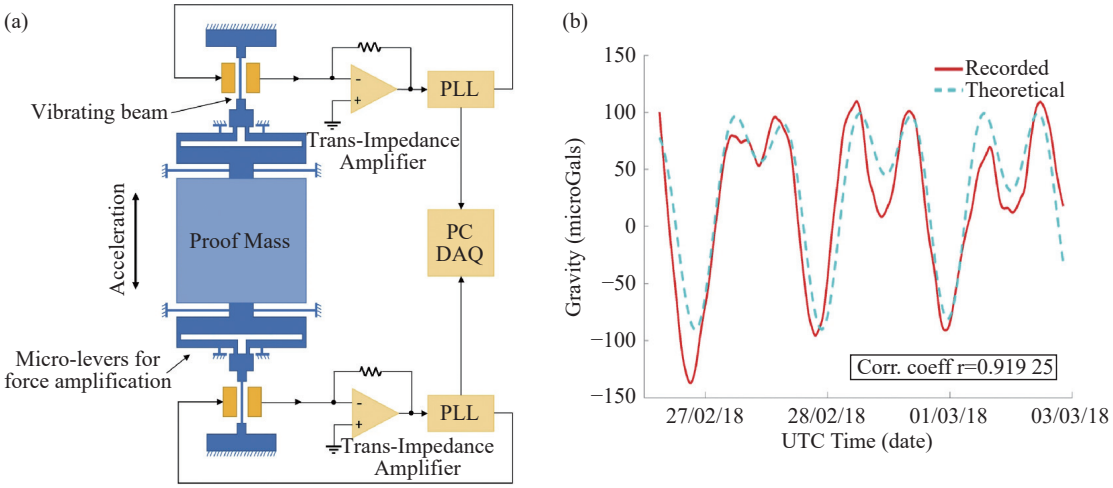

图 7　剑桥大学设计的硅差分谐振式 MEMS 加速度计。(a)加速度计结构示意图; (b)地球潮汐引力测量结果[27]

Fig. 7　The differential silicon resonant MEMS accelerometer designed by the University of Cambridge. (a) Schematic diagram of the accelerometer structure. (b) The comparison between the measurement result and theoretical analysis of the Earth tidal gravity[27].

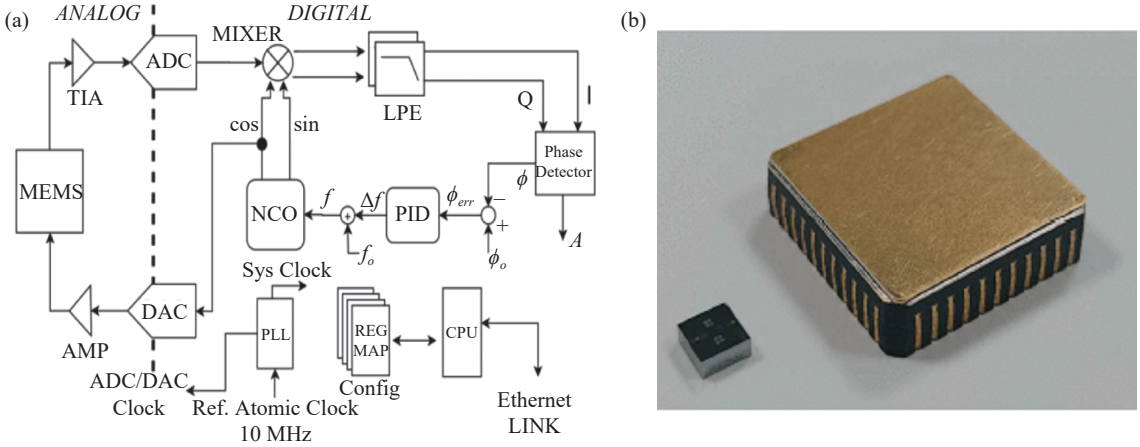

图 8　剑桥大学设计的高精度硅谐振式 MEMS 加速度计。(a)专用数模混合接口电路示意图; (b)采用晶圆级封装的加速度计仪表照片[40, 41]

Fig. 8　High-precision silicon resonant MEMS accelerometer designed by the University of Cambridge. (a) Schematic diagram of the digital-analog mixed-signal interface circuit. (b) Photograph of the accelerometer with wafer-level package[40, 41].

在此基础上，剑桥大学的研究人员全面优化加速度计结构、封装和接口电路，分别于 2021 年和 2022 年发布了两款性能更加优异的高灵敏度、高精度硅谐振式 MEMS 加速度计，用于重力测量和地震监测[40, 41]。图 8(a)为专用数模混合接口电路的示意图。该接口电路分为模拟电路和数字电路两部分，模拟电路连接谐振器的驱动和检测电极，数字部分由现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)来实现，用于谐振频率跟踪及信号数字化输出。两款加速度计均采用 SOI 工艺加工和晶圆级封装，标度因数分别为 9825 Hz/g 和 1110 Hz/g，量程分别为±1 g 和±25 g，零偏稳定性分别为 10 ng 和 123 ng，噪声水平均低于 100 ng/√Hz。图 8(b)为采用晶圆级真空封装的加速度计仪表的照片。

2.1.4 美国 Honeywell 公司

美国 Honeywell 公司是最早开展硅谐振式 MEMS加速度计相关研究的公司之一。2022 年，Honeywell 公司发布了其硅谐振式 MEMS 加速度计的最新产品——MV60[42]。表 1 总结了 MV60 加速度计的各项性能参数。该款加速度计为单轴平面加速度计，量程为±60 g，零偏稳定性和标度因数稳定性分别为 200 μg 和 30 ppm，带宽高达 300 Hz，能够承受的最大冲击高达 5000 g，功耗仅为 45 mW。该款加速度计首次突破了硅谐振式 MEMS 加速度计的高性能门槛，具有较高的精度和可靠性。

表 1 Honeywell 公司的硅谐振式 MEMS 加速度计最新产品 MV60 的各项性能参数[42]

Table1 The performance parameters of Honeywell's latest silicon resonant MEMS accelerometer MV60[42]

性能参数	MV60-1	MV60-2	MV60-3
工作范围/g, min	60	60	60
零偏重复性/μg	1000	500	200
标度因数重复性/ppm	75	50	30
温度范围/℃		−55~+95	
工作带宽/Hz		>300	
可承受冲击/g		>5000	
输入电压/V		+5~+20	
整体功耗/mW		45	
频率输出/kHz		26~29	
差频标度因数/Hzg$^{-1/2}$		90	

2.1.5 法国 Thales 公司

2017 年，法国 Thales 公司发布了硅谐振式 MEMS加速度计的最新研究成果[43]。图 9(a)展示了其提出的硅谐振式 MEMS 加速度计的结构示意图，该款加速度计采用平面双音叉谐振子结构，并利用微杠杆结构实现惯性力放大。该加速度计采用多层 SOI 工艺加工和晶圆级高真空封装，Q 值为 1.2×10^6，在 18 个月的加热老化条件下，零偏稳定性和标度因数稳定性分别优于 50 μg 和 10 ppm，达到导航级精度。

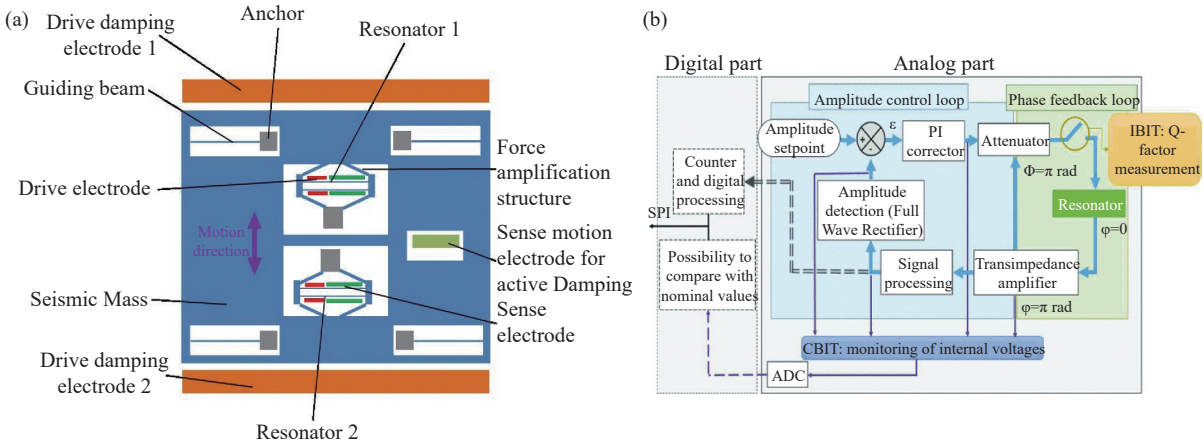

图 9 Thales 公司设计的硅谐振式 MEMS 加速度计。(a)加速度计结构示意图；(b)数模混合 ASIC 芯片架构示意图[30]

Fig. 9 The silicon resonant MEMS accelerometer designed by Thales. (a) Schematic diagram of the accelerometer structure. (b) Schematic diagram of the digital-analog mixed-signal ASIC chip architecture[30].

在此基础上，Thales 公司于 2022 年设计了配套的数模混合专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit, ASIC)芯片[30]。该 ASIC 芯片的核心架构包括数字部分和模拟部分，如图 9(b)所

示。结合跨阻放大器、全波整流器及比例积分校正器, 通过幅度控制回路和相位反馈回路分别对幅度和相位进行控制, 使其满足谐振条件。将此 ASIC 芯片与 MEMS 加速度计芯片集成, 样机的零偏稳定性达 0.3 μg, 噪声基底仅有 1 μg/√Hz。基于这些技术优化, 形成了高性能产品 SiA3000HR。

2.1.6 其它国外研究机构

2010 年, 意大利米兰理工大学报道了一种小尺寸单轴硅谐振式 MEMS 加速度计[32]。该加速度计进行了创新性结构设计, 使谐振梁分布在检测质量块四周, 大大减小了芯片面积, 同时表现出很高的检测灵敏度, 标度因数为 455 Hz/g。2011 年, 该团队又设计了一种具有双轴结构的硅谐振式 MEMS 加速度计[44]。与单轴加速度计相比, 双轴加速度计能够同时测量两个不同方向的加速度信号, 具有较强的交叉轴抗耦合能力, 标度因数约为 200 Hz/g。2012年, 该团队继续对结构进行优化, 实现了标度因数达 455 Hz/g、100 Hz 带宽内噪声为 460 μg/√Hz 的硅谐振式 MEMS 加速度计[33]。2018 年, 米兰理工大学团队进一步报道了一种三轴频率调制硅谐振式 MEMS 加速度计[35], 提出了一种新型时间切换方法, 通过对单谐振器的谐振频率进行差分双采样, 避免了两个谐振器之间的零偏热漂移问题。

2008 年, 新加坡国立大学报道了一种用于硅谐振式 MEMS 加速度计的全差分互补金属氧化物半导体(CMOS)读出电路[36]。该芯片由振荡器和自动幅度控制(AAC)环路组成, AAC 环路采用二阶滤波器和斩波稳定整流器, 能够防止谐振器进入非线性区域, 并在最大程度上减小相位噪声。该芯片采用 CMOS 0.35 μm 工艺流片, 并与加速度计芯片集成, 在 3.3 V 的工作电压下, 实现了 140 Hz/g 的标度因数和 4 μg 的零偏稳定性。

2015 年, 新加坡国立大学设计了一种超低噪声全差分 CMOS 读出电路[37], 用于硅谐振式 MEMS 加速度计。该芯片由一种新型的低噪声、高增益带通跨阻放大器(TIA)和低噪声振幅控制模块组成, 实现了增益、带宽与噪声性能之间的优化平衡; 同时采用斩波稳定技术, 使振幅控制模块的闪烁噪声达到了最小化, 显著提升了加速度计的性能。最终结果表明, 该加速度计的标度因数为 140 Hz/g, 量程范围为±20 g, 零偏稳定性为 6.3 μg, 固有噪声为 2 μg/√Hz, 在 1.5 V 工作电压下, 总功耗仅 3.5 mW。

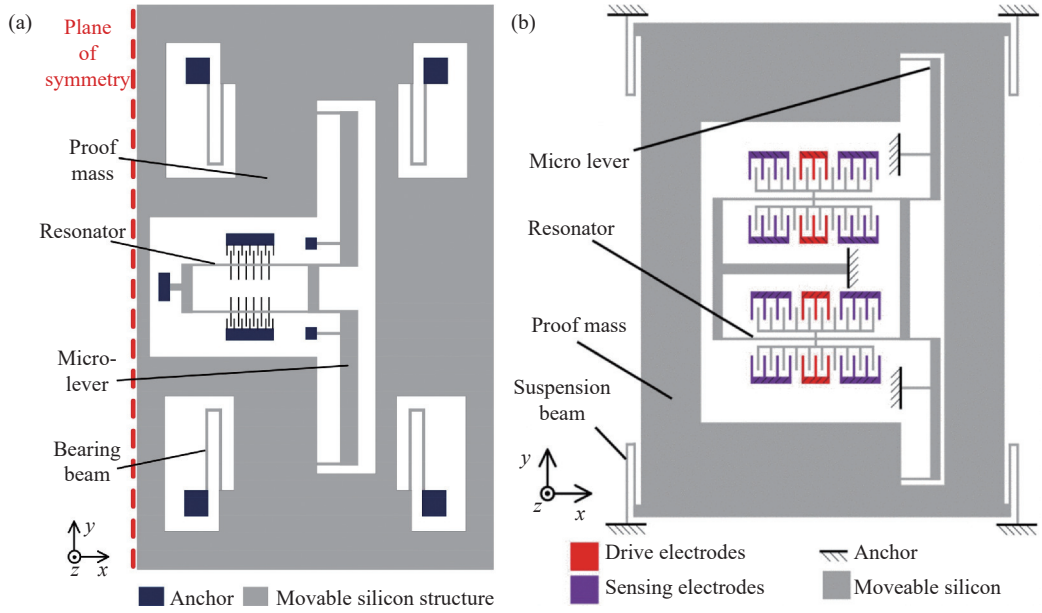

图 10　清华大学设计的 DETF 结构和驱动检测分离结构硅谐振式 MEMS 加速度计。(a)DETE 结构示意图; (b)驱动与检测分离的结构示意图[47, 48]

Fig. 10　The silicon resonant MEMS accelerometer with DETF structure and separated drive-sensing structure developed by Tsinghua University. (a) Schematic diagram of the DETF structure. (b) Schematic diagram of the separated sensing electrodes and sensing electrodes[47, 48].

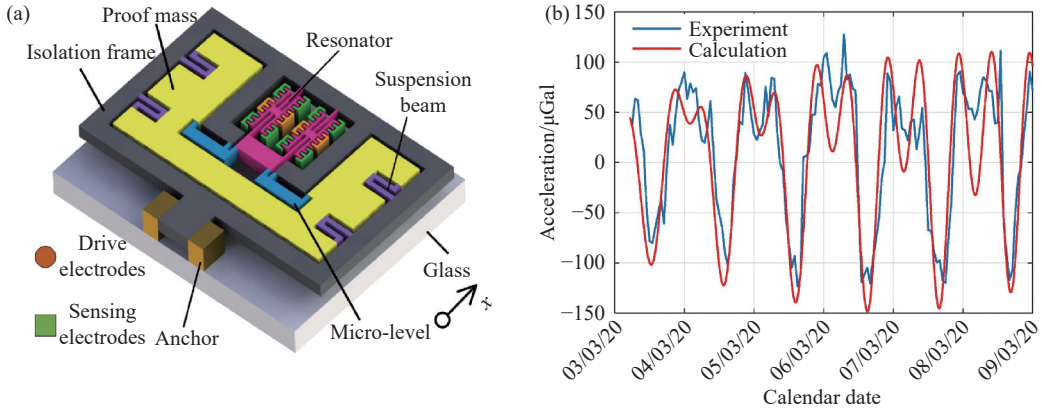

图 11 清华大学设计的极高灵敏度硅谐振式 MEMS 加速度计。(a)具有完全对称结构的加速度计示意图;(b)潮汐效应测试结果[49]

Fig. 11 Highly sensitive silicon resonant MEMS accelerometer designed by Tsinghua University. (a) Schematic diagram of the accelerometer with a fully symmetric structure. (b) The comparison between the experiment result and theoretical calculation of the Earth tide effect[49]

2.2 国内研究进展

由于微纳加工工艺水平的限制,国内的硅谐振式 MEMS 加速度计研究起步较晚,在本世纪初期才逐步开展。清华大学[45-50]、东南大学[51-53]、南京理工大学[54-58]、西安交通大学[59-61]、北京航天控制仪器研究所[62-64]、中国科学院空天信息创新研究院[65-67]等机构的研究较深入,并取得了一系列进展。

2.2.1 清华大学

清华大学与北京大学合作开展了硅谐振式 MEMS 加速度计的早期研究。2003 年,他们合作推导了硅谐振式 MEMS 加速度计的设计原理,并详细分析了加速度计的非线性问题[45]。2004 年,双方合作研制出采用 DETF 结构的硅谐振式 MEMS 加速度计。该款加速度计采用体硅工艺制作,并引入微杠杆结构来放大惯性力。样机灵敏度为 27.3 Hz/g,分辨率为 167.8 μg[46]。

2017 年,清华大学报道了一种高灵敏度硅谐振式 MEMS 加速度计[47]。利用有限元模拟,研究人员精确优化了加速度计的结构系数,同时对频率噪声进行建模,以选择最佳驱动电压。该加速度计采用 SOG 工艺加工和金属管壳真空封装,并利用吸气剂保持封装的高真空度,最终 Q 值达到 3.5×10^6,标度因数从 66.3 Hz/g 提升至 244.15 Hz/g,噪声仅为 0.38 μg/√Hz。在此基础上,该团队于 2018 年提出了一种驱动与检测分离的硅谐振式 MEMS 加速度计[48]。该设计采用分离式驱动-检测电极的双 DETF 谐振器结构,通过自激振荡驱动谐振梁工作。结果表明,此方案能够提高加速度计的信噪比和灵敏度,零偏不稳定性从 179 ng 降低到 127 ng。图 10(a)和(b)分别展示了 DETF 结构及驱动与检测分离结构的示意图。

2021 年,清华大学报道了一种灵敏度极高的硅谐振式 MEMS 加速度计[49]。如图 11(a)所示,通过综合考虑器件的鲁棒性、动态范围和非线性误差等方面,全面优化了加速度计结构,通过采用完全对称的结构,实现了极低的噪声和良好的零偏稳定性。加速度计制备采用 SOG 工艺,并利用陶瓷

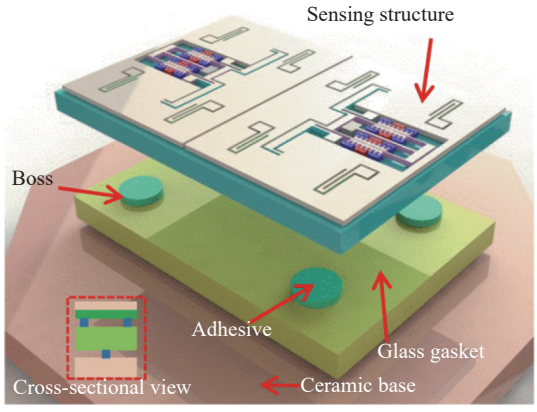

图 12 清华大学设计的具有新型应力隔离结构硅谐振式 MEMS 加速度计示意图[50]

Fig. 12 Schematic diagram of the silicon resonant MEMS accelerometer with novel die-attach structure designed by Tsinghua University[50]

管壳进行封装, 其标度因数高达 876 Hz/g, 在±5 g 的量程范围内噪声仅 75 ng/√Hz, 在精密温控下 3 个月的零偏重复性为 1.56 μg。得益于其极高的灵敏度, 该加速度计能够测量地球潮汐引力的变化, 结果如图 11(b)所示。

2023 年, 清华大学报道了一种具有新型热应力隔离结构的硅谐振式 MEMS 加速度计[50]。如图 12 所示, 研究人员设计了一种新型玻璃贴片结构降低封装过程中的热应力, 并通过有限元分析优化了玻璃贴片的结构参数。实验结果表明, 该加速度计的温度灵敏度为 44.6 μg/℃, 零偏不稳定性仅为 0.297 μg, 最大程度地减小了封装热应力对加速度计的影响。

2.2.2 东南大学

2004 年, 东南大学与新加坡国立大学合作开展了硅谐振式 MEMS 加速度计研究[51]。为解决谐振器之间的机械耦合问题, 他们设计了不等基频谐振器, 使得两个谐振器的谐振频率在全量程内不重叠, 从而显著提升了标度因数[52]。2018 年, 东南大学设计了一种基于同步积分器的数字锁相环(Phase Lock Loop, PLL)测控电路, 来检测谐振器的相位和幅度, 降低了测控电路对采样速率的要求[68], 将加速度计的零偏稳定性提升至 4.0 μg。

2.2.3 南京理工大学

南京理工大学自 2006 年开始研究硅谐振式 MEMS 加速度计[54]。2009 年, 其设计的加速度计标度因数达到了 92 Hz/g, 在±30 g 的范围内非线性仅为 0.322‰[69]。

随后, 南京理工大学与新加坡国立大学深度合作, 设计用于硅谐振式 MEMS 加速度计的 ASIC 芯片。2017 年, 他们合作报道了两款 ASIC 芯片[55, 56]。如图 13(a)所示, 第一款 ASIC 芯片由全差分连续时间振荡维持电路和数字测频电路组成, 采用斩波稳定技术和无尾电流源结构来抑制闪烁噪声, 以改善加速度计的零偏稳定性。MEMS 传感器的制备采用 SOI 工艺, ASIC 芯片的制造采用标准 0.35 μm CMOS 工艺。最终加速度计的标度因数为 280 Hz/g, 量程为±20 g, 零偏不稳定性为 0.4 μg, 噪声基底为 1.2 μg/√Hz, 在 1.5 V 工作电压下的功耗为 4.37 mW[56]。如图 13(c)所示, 第二款 ASIC 芯片利用

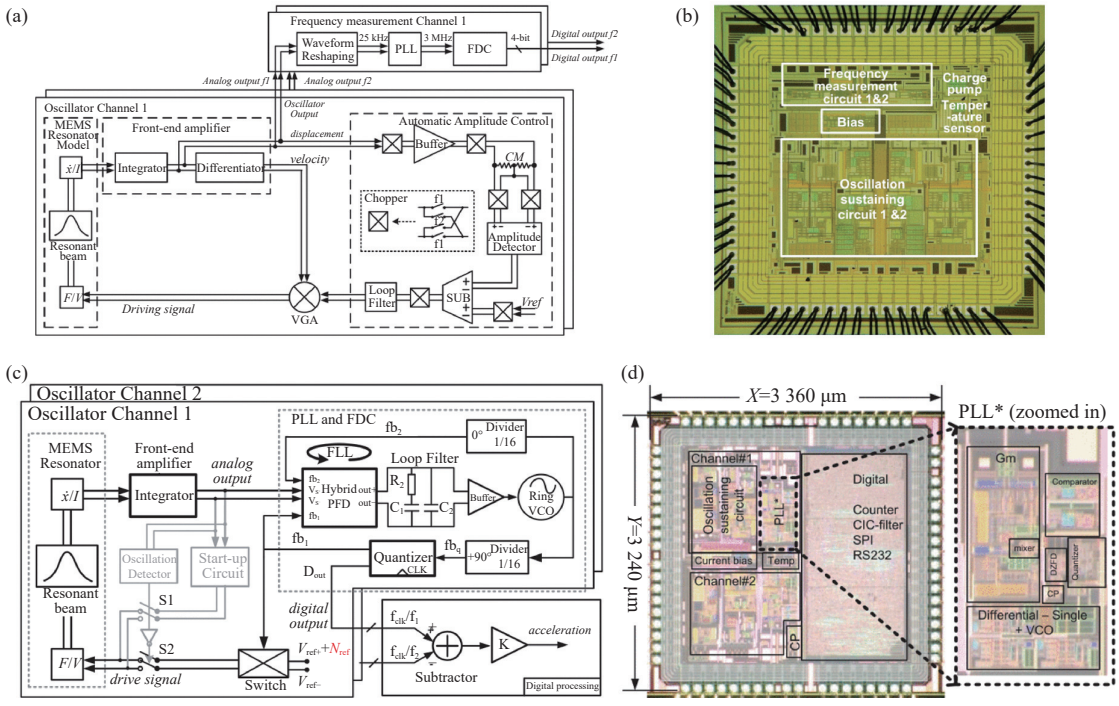

图 13　南京理工大学与新加坡国立大学合作设计的两款硅谐振式 MEMS 加速度计 ASIC 芯片。(a)第一款 ASIC 芯片系统架构; (b)第一款 ASIC 芯片照片; (c)第二款 ASIC 芯片系统架构; (d)第二款 ASIC 芯片照片[55, 56]

Fig. 13 Two silicon resonant MEMS accelerometer ASIC chips designed by Nanjing University of Science and Technology in collaboration with the National University of Singapore. (a) System architecture of the first ASIC chip. (b) Photograph of the first ASIC chip. (c) System architecture of the second ASIC chip. (d) Photograph of the second ASIC chip[55, 56]

PLL 和 Σ-Δ 模数转换器来维持谐振器的振荡并实现了信号从频率到数字的转换。MEMS 传感器和 ASIC 芯片的制造分别采用 80 μm SOI 工艺和标准 0.35 μm CMOS 工艺，最终实现了 0.23 μg 的零偏不稳定性和 1 μg/√Hz 的噪声密度，量程为±30 g，在 1.5V 电压下功耗仅为 2.7mW[55]。

2.2.4 其它国内研究机构

2020 年，西安交通大学设计了一种高性能双轴硅谐振式 MEMS 加速度计[59]，结构如图 14(a)所示。该加速度计能够同时测量面内加速度的大小和方向。同时，研究人员提出了一种基于矩阵校准的温度补偿方法，理论上可以消除温度漂移的影响。该加速度计的制备采用 SOI 工艺，标度因数高达 4026.5 Hz/g，分辨率为 6.6 μg。2022 年，西安交通大学提出了一种频率自动跟踪系统[60]，如图 14(b)所示。该系统能够实时读出并调整谐振器频率，从而扩大同步范围；同时搭建了基于 FPGA 的高精度频率测量系统，大幅提升了加速度计的各项性能，使其能够满足地震检测和潮汐测量等高精度应用场景的要求。

2021 年，中国科学院空天信息创新研究院创新性地提出了一种应用于硅谐振式 MEMS 加速度计的比例差分温度补偿方法[65]。该方法基于差分调频原理，利用温差比参数来抵消温度变化引起的差分谐振器频率漂移。结果表明，采用该补偿方法的加速度计在−10℃ ~ 70℃ 范围内，对温度的敏感度从 43.16 ppm/℃ 降低到 0.83 ppm/℃。

2022 年，中国科学院空天信息创新研究院设计了一种基于固有温漂抑制锁相环(TDS-PLL)的 MEMS 压控振荡器(VCO)，来补偿温度漂移[66]。图 15 展示了该款加速度计系统的示意图。TDS-PLL 能够跟踪由温度变化引起的谐振频率漂移，对加速度计的温度漂移实现动态抑制。由于加速度触感、温度漂移捕获和抑制被集成到 TDS-PLL 控制回路中，因此系统在捕获加速度的同时便完成了温度漂移补偿。测量结果表明，该加速度计的零偏不稳定性为 13.15 μg，噪声水平为 7.04 μg/√Hz。

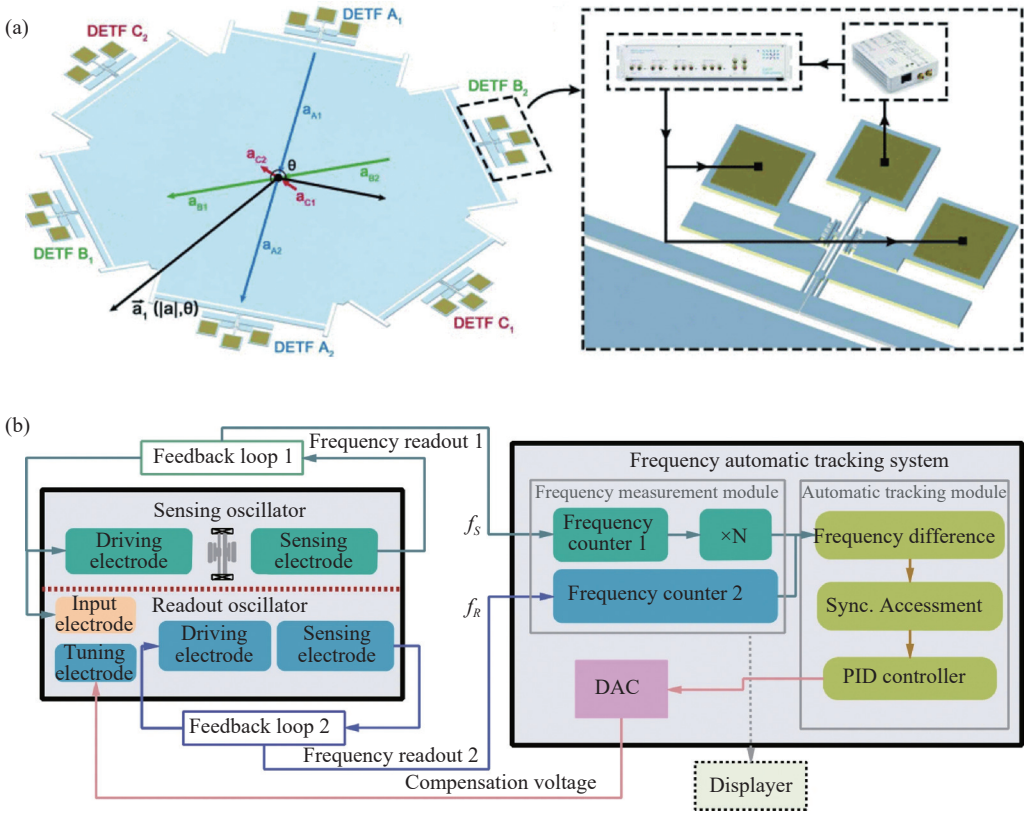

图 14 西安交通大学提出的双轴硅谐振式 MEMS 加速度计。(a)双轴结构示意图；(b)频率自动跟踪系统示意图[59, 60]

Fig. 14 Dual-axis silicon resonant MEMS accelerometer proposed by Xi'an Jiaotong University. (a) Schematic diagram of the dual-axis structure. (b) Schematic diagram of the automatic frequency tracking system[59, 60]

表 2　国内外主要研究机构的硅谐振式 MEMS 加速度计性能比较

Table2 The performance comparison of silicon resonant MEMS accelerometer from major domestic and international institutions

研究单位	时间	标度因数 Hzg^{-1}	谐振频率 kHz	零偏稳定性 μg	噪声水平 $\mu gHz^{-1/2}$	量程范围 g	带宽 Hz
Draper实验室	2005[10]	126.7	-	0.19	4.5	-	-
加州大学伯克利分校	2002[20]	17	145	-	40	±1	-
	2005[21]	158	130	-	-	-	-
剑桥大学	2015[24]	9408	149	-	0.144	±0.05	-
	2017[25]	980	200	0.23	0.08	-	-
	2019[26]	2752	352.2	0.056	0.098	-	-
	2019[28]	5610	-	0.0175	0.0178	±1	-
	2020[27]	5792	1	10	0.025	±1	-
	2021[40]	1110	115	0.123	0.7	±25	-
	2022[41]	9825	270	0.007	0.01	±1	-
Honeywell公司	2022[42]	90	-	200	-	±60	>300
Thales公司	2023[29]	-	-	40	0.3	±100	-
斯坦福大学	2017[31]	427	804	0.16	-	-	-
米兰理工大学	2010[32]	455	~59	-	460	±1	100
	2014[34]	240	80.11	233	111	±8	100
新加坡国立大学	2008[36]	140	135	-	20	±1	-
	2015[70]	260	25	0.4	1.2	±20	-
	2015[37]	140	21	0.6	2	±20	>200
	2016[55]	200	18	0.23	1.6	±30	-
清华大学	2017[47]	244.1	21	-	0.38	±15	-
	2018[48]	244	-	1.05	0.127	±1	-
	2021[49]	876.4	20	0.0173	0.075	±5	-
	2023[50]	210.7	-	3.22	-	±20	-
东南大学	2018[71]	578	22	15.5	-	-	-
南京理工大学	2022[57]	90.93	18.5	1	-	±20	-
	2023[58]	124	25.6	0.72	-	-	-
西安交通大学	2018[72]	1153	143.3	-	13.8	±1	5
	2020[59]	4026.5	330	6.6	-	-	-
	2024[61]	2611	-	6.8	-	±3	-
中科院空天信息创新研究院	2022[66]	776.75	182	-	7.04	±0.32	100
	2023[67]	780	185	-	-	±20	-
北京航天控制仪器研究所	2016[63]	100	18	50		±40	>200
	2016[62]	92	21	-	-	±30	-
	2024[64]	216	18.2	6.5	-	±20	-

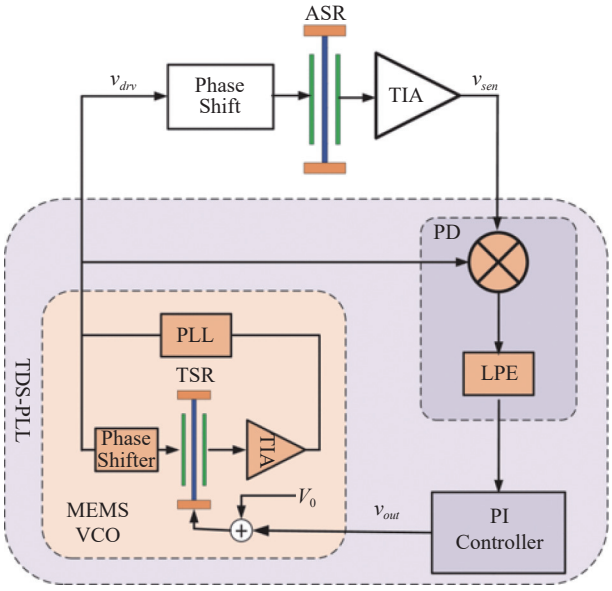

图 15 中国科学院空天信息创新研究院设计的具有固有温漂抑制锁相环(TDS-PLL)的加速度计示意图[66]

Fig. 15 Schematic diagram of the accelerometer with TDS-PLL developed by the Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences[66]

2.3 研究进展总结

表 2 总结了国内外高校和科研机构关于硅谐振式 MEMS 加速度计的研究进展情况。从表中可以看出，由于国外研究机构针对硅谐振式 MEMS 加速度计的研究起步较早，加上有先进的 MEMS 微纳加工工艺、晶圆级真空封装技术和 ASIC 电路设计技术，其在结构设计、真空封装和测控电路上已经基本成熟，并逐步走向工程应用。主流的设计方案是：结构上采用差分式 DETF 谐振器，最大程度地减小共模干扰的影响；引入微杠杆结构放大谐振器产生的微弱惯性力，以提高标度因数；利用晶圆级高真空封装技术，来获得尽可能大的 Q 值；电路方案采用基于自激振荡或 PLL 及自动增益控制的测控电路，并呈现由传统模拟电路向数字电路转变的趋势。近年来，研究方向逐渐向多轴加速度计及 ASIC 芯片转变。与传统的分立式电路相比，ASIC 芯片集成度更高，具有更小体积、更低功耗和更强性能，能够大幅提高加速度计的性能。

近年来，随着研究的不断深入，国内科研机构在高精度硅谐振式 MEMS 加速度计方面的技术水平进步显著，在结构设计优化、测控电路数字化、高精度频率测量及误差建模补偿等方面取得了一系列成果。但需要清楚地认识到，目前国内硅谐振式 MEMS 加速度计的整体水平与国外先进水平相比，仍存在一定差距。虽然噪声性能和温度灵敏度等单项指标提升显著，但零偏稳定性和标度因数非线性等部分关键指标仍有差距。同时，在各单项技术能力方面还有待提升，例如：在加工工艺方面，整体加工精度与封装工艺水平相比国外还存在较大差距；在测控电路方面，高信噪比检测和测频噪声抑制等技术还有较大的提升空间。

3 关键技术问题

硅谐振式 MEMS 加速度计集高精度、低功耗和高可靠性于一体，可用于下一代高精度惯性仪表。为全面提高硅谐振式 MEMS 加速度计的综合性能，必须从结构设计、加工工艺、测控电路和封装技术四个方面进行协同优化。图 16 显示了提升加速度计综合性能所需关键技术的示意图。

3.1 高灵敏结构设计技术

谐振器作为硅谐振式 MEMS 加速度计的核心部件，其设计质量会直接影响器件的性能。因此，需要对高灵敏结构设计技术开展研究，探讨如何在有限的尺寸下实现高灵敏度，同时提高结构的可靠性和鲁棒性。

为实现高灵敏硅谐振式 MEMS 加速度计的结构设计，应深入研究谐振器的能量耗散机制，探索高 Q 值谐振器的设计理论和方法；同时，应建立谐振器及微杠杆结构理论模型，研究微结构耦合的力学特性；此外，还需采用多物理场仿真分析与实验验证相结合的方法，以确定谐振器、微杠杆等结构的最佳设计参数，进一步提升加速度计的灵敏度；最后，应优化锚点分布位置，设计缓冲垫或限位器等应力隔离结构和有源阻尼电极等部件，进一步增强硅谐振式 MEMS 加速度计的可靠性和鲁棒性。

3.2 高精度加工工艺技术

工艺制造是实现硅谐振式 MEMS 加速度计从设计方案到具体结构的最关键步骤，其工艺精度的高低和工艺误差的大小在很大程度上影响着加速度计的性能。因此需要开展高精度加工工艺技术研究，探讨如何精准地控制加速度计的微结构及其形貌，同时确保高其可靠性和高真空。

当前硅谐振式 MEMS 加速度计的主流加工工艺基于全硅工艺方案。该方案能够在一定程度上

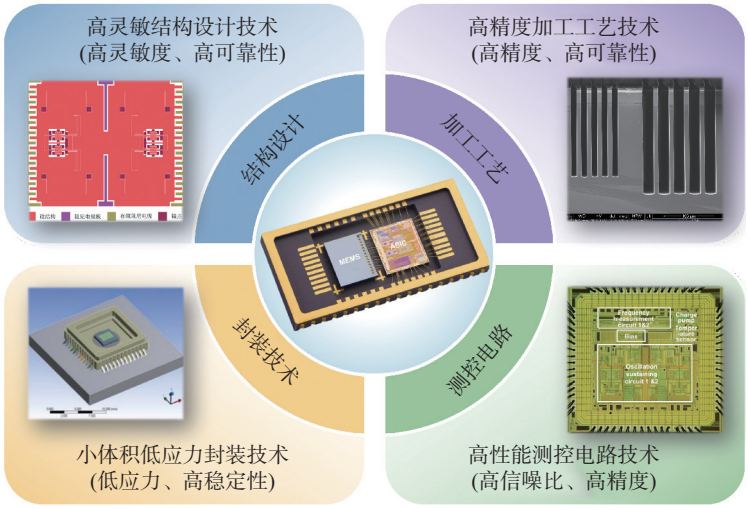

图 16　全面优化硅谐振式 MEMS 加速度计的关键技术示意图[73]

Fig. 16　Illustration of the key technologies to comprehensively improve the performance of silicon resonant MEMS accelerometer[73]

实现前道微纳加工工艺与后道晶圆级真空封装之间的整合, 具有更优的工艺可靠性, 但同时工艺难度也大幅提升[74]。

为实现高精度硅谐振式 MEMS 加速度计加工工艺, 应优化刻蚀等工艺, 提高刻蚀精度, 制造高深宽比的微结构[75]; 同时, 应优化键合工艺, 提升键合强度, 实现高可靠性封装; 此外, 应优化薄膜吸气剂制备技术, 提升吸气剂的吸气性能, 进一步提高密封腔的真空度及其长期保持能力[9]。

3.3　高性能测控电路技术

测控电路是实现硅谐振式 MEMS 加速度计的频率信息向电学信号转换的核心模块, 其精度和噪声性能直接影响加速度计的整体性能。因此, 需要开展高性能测控电路技术研究, 探讨实现加速度计微弱信号的精确处理及各类误差补偿的方法, 在此基础上开发集成复杂功能模块的 ASIC 芯片。

为实现硅谐振式 MEMS 加速度计测控电路的高性能, 应系统分析电路的闪烁噪声和相位噪声等, 优化低噪声电路技术, 以提高其信噪比。同时, 应开展误差补偿电路和频率测量电路的仿真分析与设计, 以实现高精度误差补偿和频率测量。此外, 应开展 ASIC 芯片的前端设计与后端仿真, 通过集成低噪声低漂移差分放大器、稳幅控制器和自激振荡电路等模块, 不断提升加速度计精度水平, 降低其体积、功耗与成本。

3.4　小体积、低应力封装技术

封装主要为硅谐振式 MEMS 加速度计提供电学互连、机械保护及环境保护, 封装质量在很大程度上影响着加速度计的可靠性与鲁棒性。因此, 需要开展小体积、低应力封装技术研究, 探讨如何降低封装应力, 提高其稳定性, 进而实现 MEMS 芯片与 ASIC 芯片“1+1>2”的集成效果。

为实现硅谐振式 MEMS 加速度计的小体积、低应力封装, 应在结构设计和测控电路研究的基础上, 围绕加速度计所需的机械支撑和电学互连, 对封装总体方案、应力隔离结构和贴片工艺等方面进行优化, 提高封装集成度, 减小加速度计的整体体积, 降低机械应力和热应力, 进一步提升加速度计的综合性能[75]。

4　未来展望

经过近 30 年的发展, 硅谐振式 MEMS 加速度计技术取得了显著进步, 已经从实验室原理验证迈向工程化实际应用, 其精度已被验证具备应用于战略级导航等高精度应用场景的潜能。通过对近年来国内外主要科研机构对硅谐振式 MEMS 加速度计最新研究进展的归纳, 可以总结出以下两点发展趋势:

(1) 小型化与集成化

随着微纳加工技术的不断发展, 硅谐振式 MEMS 加速度计正朝着更小型、更集成的方向发

展。通过采用更先进的纳米加工与刻蚀技术，能够制造更精密的微结构，在提升加速度计性能的同时减小其体积与功耗；同时，通过设计多轴加速度计，能够同时敏感多个方向的加速度，实现更加精确的运动控制和环境感知。此外，还应当开展先进封装技术，如晶圆级真空封装、2.5D 封装、3D 封装、异质集成和系统级封装等，通过集成不同功能模块甚至不同类型传感器，以获取多维度信息，提高系统的整体精度，增强其在复杂环境下的适应能力[7, 11]。

(2) 工程化应用

硅谐振式 MEMS 加速度计的精度已被验证具有战略级潜力，可用于中高精度惯性导航领域。因此，未来的研究重点应放在加速度计工程样机的研制上，以早日实现工程化应用。

目前，美国 Draper 实验室、Honeywell 公司和法国 Thales 公司等已陆续推出导航级精度的硅谐振式 MEMS 加速度计产品[7]；在国内，虽然研究整体起步较晚，但经过科研人员的刻苦攻关，目前已经在主要关键技术上取得突破，研制的样机精度明显提升，技术成熟度逐步提高，已实现小批量试应用。未来，在原理样机研制的基础上，应对工程样机研制进行重点攻关。具体而言，可围绕硅谐振式 MEMS 加速度计的工作稳定性和可靠性，开展误差建模补偿研究，通过对比不同建模方法，不断改进温漂、静态误差等模型，优化补偿效果，提升硅谐振式 MEMS 加速度计对不同环境的适应性；同时，应开展检测质量块的有源阻尼技术研究，以提升加速度计的抗振动能力；最后，综合考虑尺寸、重量、功耗与成本（SWaP+C），不断提升硅谐振式 MEMS 加速度计的技术成熟度，发展可用于高精度导航的工程样机，推动硅谐振式 MEMS 加速度计的工程化应用。

5 结论

硅谐振式 MEMS 加速度计是高精度 MEMS 加速度计的重要发展方向，且具备低成本、集成化等诸多优势，预计未来会被广泛应用于中高精度惯性导航领域。本论文对国内外主要科研机构对于硅谐振式 MEMS 加速度计的研究现状进行了全面综述。整体而言，国外研究机构起步较早，其技术已趋于成熟，可达到导航级精度，并逐步推出工程样机及产品；国内关于硅谐振式 MEMS 加速度计的研究整体起步较晚，但经过数十年的发展，在主要关键技术上已经取得突破，技术成熟度逐渐提高，并已开始进行工程化应用。为全面提高硅谐振式 MEMS 加速度计的性能，需要从加速度计的结构设计、加工工艺、测控电路和封装技术四个方面进行协同优化。

未来，在高性能与低成本的需求牵引下，硅谐振式 MEMS 加速度计将向着小型化与集成化的方向发展，在性能持续提升的同时，体积、功耗和成本不断降低；此外，硅谐振式 MEMS 加速度计已被证明可达到战略级精度，未来将向着工程化应用发展。另外，在保证性能的同时，需不断提高其工作稳定性与可靠性，以加速实现高精度导航领域的工程化应用。

参考文献：

[1] Zhang D, Wei B. Advanced mechatronics and MEMS devices II [M]. Springer Cham, 2017.

[2] Shaeffer D K. MEMS inertial sensors: A tutorial overview[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(4): 100-109.

[3] Saunders J K, Goldberg D E, Haase J S, et al. Seismogeodesy using GPS and low-cost MEMS accelerometers: Perspectives for earthquake early warning and rapid response[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2016, 106(6): 2469-2489.

[4] Panescu D. MEMS in medicine and biology[J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 2006, 25(5): 19-28.

[5] Grankin M, Khavkina E, Ometov A. Research of MEMS accelerometers features in mobile phone [C]. Proceedings of the 2012 12th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Oulu, Finland, 2012: 1-6.

[6] Zhang Z, Zhang H M, Hao Y C, et al. A review on MEMS silicon resonant accelerometers[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2024, 33(2): 174-208.

[7] 张霞. 微机械加速度计的研究现状综述 [J]. 功能材料与器件学报, 2013, 19(06): 275-283.

[8] 董景新. 微惯性仪表: 微机械加速度计 [M]. 清华大学出版社, 2003.

[9] 杨博, 阚宝玺, 徐宇新等. 硅微谐振加速度计的研究现状及发展趋势 [J]. 导航与控制, 2017, 16(4): 96-106.

[10] Hopkins R, Miola J, Sawyer W, et al. The silicon oscillating accelerometer: A high-performance MEMS accelerometer for

precision navigation and strategic guidance applications [C]. Proceedings of the 2005 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, CA, USA, 2005: 970-979.

[11] 丁衡高. 三十年不断发展的 MEMS 惯性传感器 [J]. 导航与控制, 2023, 22(4): 1-4.

[12] Hanse J G. Honeywell MEMS inertial technology & product status [C]. Proceedings of the PLANS 2004 Position Location and Navigation Symposium (IEEE Cat. No. 04CH37556), Monterey, CA, USA, 2004: 43-48.

[13] Gibbons K A. A micromechanical silicon oscillating accelerometer [D]. USA: Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1997.

[14] Michel N S. Force multiplier in a microelectromechanical silicon oscillating accelerometer [D]. USA: Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2000.

[15] Hopkins R E, Borenstein J T, Antkowiak B, et al. The silicon oscillating accelerometer: A MEMS inertial instrument for strategic missile guidance [C]. Proceedings of the 2005 National Technical Meeting of The Institute of Navigation. San Diego, CA, USA, 2000: 970-979.

[16] Roessig T A, Howe R T, Pisano A P, et al. Surface-micromachined resonant accelerometer [C]. Proceedings of International Solid State Sensors and Actuators Conference (Transducers '97), Chicago, IL, USA, 1997: 859-862.

[17] Su X-P S, Yang H S. Design of compliant microleverage mechanisms[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2001, 87(3): 146-156.

[18] Su X-P S, Yang H S. Single-stage microleverage mechanism optimization in a resonant accelerometer[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 21(3): 246-252.

[19] Su X-P S, Yang H S. Two-stage compliant microleverage mechanism optimization in a resonant accelerometer[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 22(4): 328-334.

[20] Seshia A A, Palaniapan M, Roessig T A, et al. A vacuum packaged surface micromachined resonant accelerometer[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2002, 11(6): 784-793.

[21] Su X-P S, Yang H S, Agogino A M. A resonant accelerometer with two-stage microleverage mechanisms fabricated by SOI-MEMS technology[J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5(6): 1214-1223.

[22] Su X-P S. Compliant leverage mechanism design for MEMS applications [D]. USA: Department of Electrical Engineering, University of California, Berkeley, 2002.

[23] Zou X D, Thiruvenkatanathan P, Seshia A A. Micro-electro-mechanical resonant tilt sensor [C]. Proceedings of the 2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings, Baltimore, MD, USA, 2012: 1-4.

[24] Zou X D, Seshia A A. A high-resolution resonant MEMS accelerometer [C]. Proceedings of the 2015 Transducers-2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), Anchorage, AK, USA, 2015: 1247-1250.

[25] Zou X D, Seshia A A. Non-linear frequency noise modulation in a resonant MEMS accelerometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(13): 4122-4127.

[26] Zhao C, Pandit M, Sobreviela G, et al. A resonant MEMS accelerometer with 56ng bias stability and 98ng/√Hz noise floor[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2019, 28(3): 324-326.

[27] Mustafazade A, Pandit M S, Zhao C, et al. A vibrating beam MEMS accelerometer for gravity and seismic measurements[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 10415.

[28] Pandit M, Mustafazade A, Zhao C, et al. An ultra-high resolution resonant MEMS accelerometer [C]. Proceedings of the 2019 IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Seoul, Korea (South), 2019: 664-667.

[29] TopAxyz Digital MEMS Accelerometer [EB/OL]. https://www.thalesgroup.com/en/markets/aerospace/navigation-solutions/topaxyz-digital-mems-accelerometer, 2024-09-24.

[30] Dejaeger R, Lefort O, Jeanneteau M, et al. A low-noise mixed signal ASIC for navigation-grade resonant MEMS accelerometer [C]. Proceedings of the 2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 2022: 1-3.

[31] Shin D D, Chen Y, Flader I B, et al. Epitaxially encapsulated resonant accelerometer with an on-chip micro-oven [C]. Proceedings of the 2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANS-DUCERS), Kaohsiung, Taiwan, 2017: 595-598.

[32] Comi C, Corigliano A, Langfelder G, et al. A resonant microaccelerometer with high sensitivity operating in an oscillating circuit[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2010, 19(5): 1140-1152.

[33] Tocchio A, Caspani A, Langfelder G. Mechanical and

electronic amplitude-limiting techniques in a MEMS resonant accelerometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(6): 1719-1725.

[34] Langfelder G, Caskani A, Tocchio A. Design criteria of low-power oscillators for consumer-grade MEMS resonant sensors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 567-574.

[35] Marra C R, Tocchio A, Rizzini F, et al. Solving FSR versus offset-drift trade-offs with three-axis time-switched FM MEMS accelerometer[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2018, 27(5): 790-799.

[36] He L, Xu Y P, Palaniapan M. A CMOS readout circuit for SOI resonant accelerometer with 4μg bias stability and 20μg/√Hz resolution[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008, 43(6): 1480-1490.

[37] Zhao Y, Zhao J, Wang X, et al. A sub-μg bias-instability MEMS oscillating accelerometer with an ultra-low-noise read-out circuit in CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2015, 50(9): 2113-2126.

[38] Lee J, Rhim J. Temperature compensation method for the resonant frequency of a differential vibrating accelerometer using electrostatic stiffness control[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22(9): 095016.

[39] Myers D R, Cheng K B, Jamshidi B, et al. Silicon carbide resonant tuning fork for microsensing applications in high-temperature and high G-shock environments[J]. Journal of Micro-Nanolithography MEMS and MOEMS, 2009, 8(2): 021116.

[40] Sobreviela F G, Pandit M, Mustafazade A, et al. A MEMS vibrating beam accelerometer for high resolution seismometry and gravimetry [C]. Proceedings of the 2021 IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Fainesville, FL, USA, 2021: 196-199.

[41] Sobreviela-Falces G, Pandit M, Young D, et al. A navigation-grade MEMS vibrating beam accelerometer [C]. Proceedings of the 2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS), Tokyo, Japan, 2022: 782-785.

[42] MV60 Accelerometer [EB/OL]. https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/sensors/mv60-accelerometer, 2024-09-24.

[43] Lefort O, Thomas I, Jaud S. To the production of a robust and highly accurate MEMS vibrating accelerometer [C]. Proceedings of the 2017 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), Karlsruhe, Germany, 2017: 1-19.

[44] Comi C, Corigliano A, Langfelder G, et al. A new biaxial silicon resonant micro accelerometer [C]. Proceedings of the 2011 IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Cancun, Mexico, 2011: 529-532.

[45] 贾玉斌, 郝一龙, 钟莹等. 基于谐振原理的硅微机械加速度计 [J]. 微纳电子技术, 2003, 40(7): 271-273.

[46] Jia Y B, Hao Y L, Zhang R. Double tuning-fork resonant accelerometer [C]. Proceedings of the 7th International Conference on Solid-State and Integrated Circuits Technology, Beijing, China, 2004: 1812-1815.

[47] Yin Y G, Fang Z X, Han F T, et al. Design and test of a micromachined resonant accelerometer with high scale factor and low noise[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 268: 52-60.

[48] Fang Z X, Yin Y G, Liu Y F, et al. Low-noise drive of a micromachined resonant accelerometer with separated sensing and actuation [C]. Proceedings of the 2018 IEEE SENSORS, New Delhi, India, 2018: 1-4.

[49] Fang Z X, Yin Y G, Chen C, et al. A sensitive micromachined resonant accelerometer for moving-base gravimetry[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 325: 112694.

[50] Ma Y K, Wand S H, Xu W Y, et al. Design and test of MEMS resonant accelerometer with a novel die-attach structure [C]. Proceedings of the 2023 IEEE SENSORS, Vienna, Austria, 2023: 1-4.

[51] Lin H, Xu Y P, Qiu A P. Folded silicon resonant accelerometer with temperature compensation [C]. Proceedings of the 2004 IEEE SENSORS, Vienna, Austria, 2004: 512-515.

[52] 黄丽斌, 陈卫卫, 杨波等. 不等基频硅微谐振式加速度计 [J]. 传感技术学报, 2011, 24(11): 4.

[53] Wang Z J, Xing C Y, Zhang J, et al. Three dimensional wafer-level vacuum packaging of MEMS resonant accelerometer [C]. Proceedings of the 2021 22nd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Xiamen, China, 2021: 1-4.

[54] 裘安萍, 苏岩, 施芹等. 硅微振梁式加速度传感器中微杠杆结构的设计 [J]. 传感技术学报, 2006, 19(05B): 2204-2207.

[55] Zhao J, Wang X, Zhao Y, et al. A 0.23 μg bias instability and 1 μg/√Hz acceleration noise density silicon oscillating

accelerometer with embedded frequency-to-digital converter in PLL[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017, 52(4): 1053-1065.

[56] Wang X, Zhao J, Zhao Y, et al. A 0.4 μg bias instability and 1.2 μg/√Hz noise floor MEMS silicon oscillating accelerometer with CMOS readout circuit[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017, 52(2): 472-482.

[57] Huang J Y, Zhao Y, Xia G M, et al. Systematic modeling of a MEMS resonant accelerometer based on displacement coordination[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(7): 6454-6465.

[58] Zhang J, Wu T H, Liu Y D, et al. Thermal stress resistance for the structure of MEMS-based silicon differential resonant accelerometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(9): 9146-9157.

[59] Wang S D, Zhu W L, Shen Y L, et al. In-plane dual-axis MEMS resonant accelerometer with a uniform sensitivity [C]. Proceedings of the 2020 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Hiroshima, Japan, 2020: 1-4.

[60] Xu L, Qi Y H, Jiang Z D, et al. Fast frequency relocking for synchronization enhanced resonant accelerometer[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2022, 8(1): 93.

[61] Zhang Y Q, Wang S Q, Yang Q Q, et al. A novel design of a MEMS resonant accelerometer with adjustable sensitivity[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 379: 115859.

[62] 王超, 胡启方, 王岩等. 硅微谐振式加速度计结构设计与仿真优化 [J]. 导航与控制, 2016, 15(01): 41-46.

[63] 王岩, 赵克, 张玲等. 高精度硅微谐振加速度计工程化设计与实现 [J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(02): 229-234.

[64] 高乃坤, 刘福民, 徐杰等. 工程化硅微谐振加速度计设计与实现 [J]. 传感器与微系统, 2024, 43(04): 112-114+118.

[65] Cai P C, Xiong X Y, Wang K F, et al. An improved difference temperature compensation method for MEMS resonant accelerometers[J]. Micromachines, 2021, 12(9): 1022.

[66] Ma L B, Wang J W, Wang Z, et al. An intrinsically temperature-drift suppression phase-locked loop with MEMS voltage-controlled oscillator for micromechanical resonant accelerometer[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2022, 31(6): 901-911.

[67] Bie X R, Xiong X Y, Wang Z, et al. Analysis of the thermally induced packaging effects on the frequency drift of micro-electromechanical system resonant accelerometer[J]. Micromachines, 2023, 14(8): 1556.

[68] 黄力弘. 硅微谐振加速度计数字锁相驱动与检测技术研究 [D]. 南京: 仪器科学与工程学院, 东南大学, 2018.

[69] 裘安萍, 庄瑞芬, 施芹. 硅微谐振式加速度计结构设计与仿真 [J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(1): 5.

[70] Wang X, Zhao J, Zhao Y, et al. A 1.2 μg/√Hz-resolution 0.4 μg-bias-instability MEMS silicon oscillating accelerometer with CMOS readout circuit [C]. Proceedings of the 2015 IEEE International Solid-State Circuits Conference-(ISSCC) Digest of Technical Papers, San Francisco, CA, USA, 2015: 1-3.

[71] Yang B, Guo X, Wang Q H, et al. A biologically-inspired hair accelerometer based on resonant sensing [C]. Proceedings of the 2018 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Lake Como, Italy, 2018: 1-4.

[72] Wang S D, Wei X Y, Zhao Y L, et al. A MEMS resonant accelerometer for low-frequency vibration detection[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 283: 151-158.

[73] ASICs development for MEMS applications: A platform approach [EB/OL]. https://www.slide-share.net/slideshow/asics-for-mems-a-platform-approach/63623604#4, 2024-09-24.

[74] 郑辛, 刘飞, 雷明等. 微小型惯性仪表发展现状、趋势以及对行业的影响 [J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(6): 701-708.

[75] 王雅迪. MEMS 谐振式加速度计的技术及发展 [J]. 电子元器件与信息技术, 2020, 4(10): 1-2.