

文章编号: 2095-4980(2024)08-0908-10

低 g 值MEMS惯性开关研究进展

熊 壮, 张凤田, 谢 晋, 张照云, 杨 杰, 赵宝林*

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 微机电系统(MEMS)惯性开关是集传感与执行为一体的无源电子器件, 具有体积小、重量轻、易集成、加工一致性好、免装配等优势, 在汽车工业、航空航天、武器装备等领域具有广阔的应用前景。低 g 值MEMS惯性开关的应用场景主要为飞行器加/减速过程特定功能的触发, 在设计时应保证弹簧刚度低, 质量块体积大, 在结构设计与加工工艺中存在一定难度。本文介绍了低 g 值MEMS惯性开关的基本物理模型和工作原理, 对国内外研究现状进行了阐述, 总结了现阶段迫切需要解决的关键问题, 并提出相应解决思路, 为后续研究提供有益参考。

关键词: 微机电系统; 惯性开关; 低 g 值; 微纳加工

中图分类号: TN305

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023002

Research progress of low- g MEMS inertial switch

XIONG Zhuang, ZHANG Fengtian, XIE Jin, ZHANG Zhaoyun, YANG Jie, ZHAO Baolin*

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Micro-Electro-Mechanical Systems(MEMS) inertial switches are passive electronic devices that integrate sensing and actuation. They have the advantages of small size, light weight, easy integration, good processing consistency, and no need for assembly. They have a broad application prospect in fields such as the automotive industry, aerospace, and military equipment. The application scenarios of low- g value MEMS inertial switches are mainly for triggering specific functions during the acceleration/deceleration process of aircraft. In the design, it is necessary to ensure low spring stiffness and a large mass block volume, which poses certain difficulties in structural design and processing technology. This paper introduces the basic physical model and working principle of low- g value MEMS inertial switches, discusses the current research status at home and abroad, summarizes the key issues that urgently need to be addressed at this stage, and proposes corresponding solutions, providing beneficial references for subsequent research.

Keywords: Micro-Electro-Mechanical System; inertial switch; low- g value; micro-fabrication

惯性开关是一种以振动系统中“弹簧—质量—阻尼”为物理模型, 以固体质量块为载体感知外界环境中加速度变化, 并通过金属部件间机械接触的方式执行开关通断状态转换的精密惯性装置^[1]。相对于其他的环境传感器, 惯性开关的突出特点是其在工作过程中无需保持能量供应, 只有在环境中的加速度信号发生并高于开关闭合阈值(以下简称 g 值, $1g \approx 9.8 \text{ m/s}^2$)时才实现电路的接通, 因此是典型的无源器件。惯性开关的无源特性使其可大幅减少能量供应, 在长时工作系统中发挥优势, 同时不受复杂电磁信号的干扰, 有效确保系统决策的安全性与可靠性, 在武器装备、航空航天、工业等领域中获得广泛应用。

传统的惯性开关采用精密机械加工的方式加工质量块、壳体、电极、弹簧等零件, 再进行装配、调试、筛选。零件特征尺寸在0.1~100 mm范围, 整机体积普遍大于40 000 mm³。受零件多、装调复杂、体积大等限制, 难以在现代化装备向小型化、轻量化、灵巧化方向发展发挥重要作用。借助于微机电系统(MEMS)技术的快速发展, 传统惯性开关正逐渐被体积小、重量轻、易集成、加工一致性好、免装配的MEMS开关所替代, 并在武器装备中获得应用^[2-5]。

收稿日期: 2023-01-02; 修回日期: 2023-02-16

基金项目: 某专项基金资助项目(7090104050101)

*通信作者: 赵宝林 email:18799538@qq.com

MEMS 惯性开关根据需求可分为高 g 值应用场景与低 g 值应用场景。高 g 值应用场景主要包括汽车的碰撞、弹药出膛、触发毁伤等，此类加速度信号幅值通常在数十 g 至数万 g ，同时具有脉宽窄、作用时间短等特征。低 g 值应用场景主要针对飞行器加/减速过程特定功能的触发，此类加速度信号阈值通常在 $1g \sim 20g$ ^[6]，同时具有线性增加/减小、变化缓慢等特征。如，一般炮弹飞行的加速度为 $10g$ ，坦克炮弹和迫击炮炮弹飞行的飞行加速度为 $5g$ ，导弹飞行的加速度为 $20g$ ^[7]。

低 g 值加速度 MEMS 惯性开关在设计时应保证弹簧刚度低，质量块体积大。由于应用场景特殊，开关对阈值敏感精确度、长期工作稳定性、恶劣环境适应性等提出较高要求，给结构设计与加工技术带来巨大挑战。国内外科研工作者针对上述需求开展了深入的研究，提出多种解决措施，以期提升开关性能，满足现代化武器装备对集成化、小型化、智能化、高可靠等方面的需求。

1 低 g 值 MEMS 惯性开关的工作原理

惯性开关是典型的“弹簧—质量—阻尼”系统，工作原理如图 1 所示。在惯性加速度作用下，可动质量块(m)向基底运动，当加速度达到闭合阈值 a_{th} 时，质量块底面上的可动电极与基底上的固定电极接触，进而建立闭合回路。

开关运动规律满足牛顿第二定律。在 z 方向上惯性加速度 $a(t)$ 的作用下，力学平衡方程可表示为^[8]：

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega\dot{z} + \omega^2 z = a(t) \tag{1}$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}, \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2}$$

式中： $z(t)$ 为质量块相对基底的运动位移； ξ 为系统阻尼比； $\omega=2\pi f$ 为“弹簧—质量”结构本征固有角频率； k 、 m 、 c 分别为系统的等效刚度、等效质量和阻尼系数。

由于低 g 值惯性开关敏感的惯性加速度信号是准静态的，频率近乎为零。采用准静态分析方法^[9]，忽略式(1)中的导数项，惯性开关的闭合阈值 a_{th} 可表示为：

$$a_{th} = \omega^2 Z_0 = \frac{k}{m} Z_0 \tag{3}$$

式中 Z_0 为固定电极与可动电极间的间隙，即开关在 a_{th} 加速度下的行程。从式(3)同样可知，若希望降低开关阈值 a_{th} ，需降低系统等效刚度并提升等效质量，即降低系统在主振方向上的谐振频率。不同阈值开关行程与谐振频率关系曲线如图 2 所示。低 g 值 MEMS 惯性开关阈值一般不超过 $20g$ ，为提高阈值敏感精确度，降低工艺难度，开关行程一般控制在 $10 \mu m$ 以上。从图 2 可以看出，开关的谐振频率设计范围大约在 $100 \sim 500 \text{ Hz}$ 之间，同时，MEMS 器件质量块 m 一般在数百 μg ，则可计算出相应的系统等效刚度 k 大约为数 N/m 。

2 低 g 值 MEMS 惯性开关研究进展

现阶段低 g 值 MEMS 惯性开关主要采用硅基材料、金属材料以及微流体 3 种技术路线。基于硅材料的开关一般在单晶硅片或绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)片通过深硅刻蚀(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)工艺加工支撑梁与质量块，再通过阳极键合的方式对结构进行密封，属于标准的 MEMS 体硅加工工艺。基于金属材料的开关利用微电镀技术构造开关中的可动结构，微电镀工艺采用“种子层溅射—光刻铸模—电镀—平坦化”反复循环的方式实现可动结构的层叠增材加工，结构越复杂，需要的层数就越多。硅材料与金属材料各有优劣，根据不同的应用场景，可以选择不同的技术路线。如，某些应用场景需要器件具备宽温域适应性($-40 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$)，此时，由于金属材料的膨胀系数较大，可能导致开关阈值出现偏差，而硅材料则较为稳定，是该场景下的首选技术路线；某些

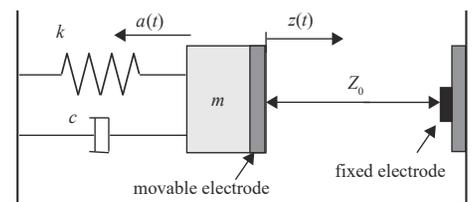


Fig.1 Analytical model of the low- g MEMS inertial switch

图 1 MEMS 惯性开关物理模型示意图

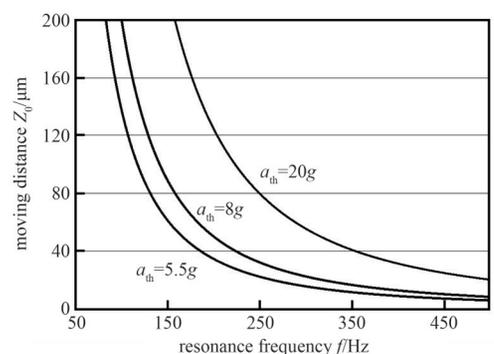


Fig.2 Relation between moving distance and resonance frequency of the inertial switch

图 2 惯性开关行程与谐振频率的关系

应用场景需要器件具有较小的接触电阻，此时，金属材料的导电性能优势可以充分发挥。微流体开关以液滴作为敏感惯性力的载体，通过在玻璃、硅、聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane Silsesquioxane, PDMS)等材料表面制备微通道控制液滴的流动特性，由于液滴本身存在挥发性，给开关的长期稳定性带来较多不确定因素，因此现阶段尚未获得实际应用。

2.1 基于硅材料的低 g 值 MEMS 惯性开关

美国圣地亚实验室在 2004—2005 年的“年度实验室成就”(Labs Accomplishments)中报道了一种用于武器装备中的“硅基再入段开关(SiReS)”^[2-4]。采用了 SOI 硅片与 DRIE 技术，在基底与结构层分别加工质量块与悬臂梁。质量块设计为圆柱形，由 9 根在器件层制备的沿圆周均匀分布的细长折叠梁支撑，以降低刚度，如图 3 所示。离心测试结果表明，开关闭合阈值为 12g~15g。为提升开关抗冲击性能，Epp 等^[10-11]在此基础上通过在封装管壳内灌注硅油的方式实现开关动态下的阻尼调整。冲击试验结果表明，在经历幅值 7 191g，脉宽 5.5 ms 的加载过后，开关仍可正常工作，恶劣环境下的生存能力得到有效验证^[12]。

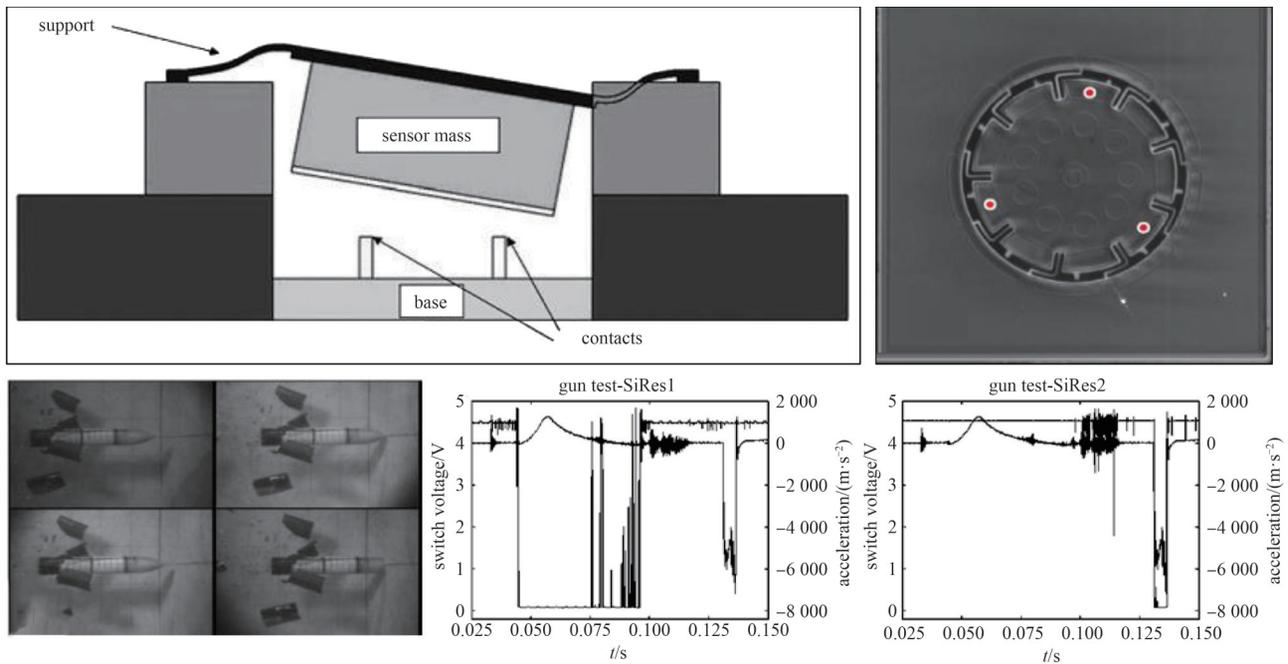


Fig.3 Typical micro switch and gun test results
图3 典型开关结构图与冲击试验测试

韩国首尔大学 Hwang 等^[13]采用 SOI 制作了垂直运动结构 MEMS 惯性开关。质量块由 4 组折叠梁支撑，并在质量块周围设计了止挡结构以限制在非敏感方向上的位移，如图 4 所示。开关上下盖板由玻璃组成，固定电极位于底盖板表面，通过阳极键合工艺对开关进行密封，并采用玻璃通孔(Through Glass Via, TGV)工艺将电信号引出。测试结果表明，开关闭合阈值 6.61g，接触电阻 8.5 Ω，刚度约为 3.29 N/m。常态下工作寿命超过 10 000 次；在经历 80 °C、6 h 高温环境后，开关连续工作 200 次且性能无明显变化。

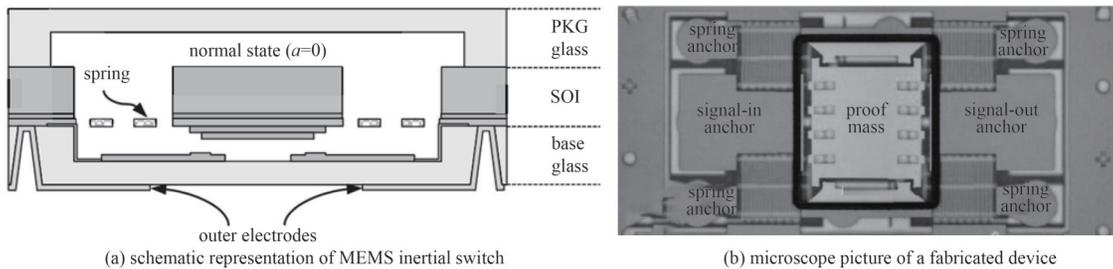


Fig.4 MEMS inertial switch proposed by Hwang
图4 Hwang 等研制的 MEMS 惯性开关

西安电子科技大学 LIU Min 等^[14]提出一种基于 SOI 材料的平面运动双稳态开关，如图 5 所示。与线性弹性机制不同，双稳态机制具有突变弹跳阈值和稳态保持的特性，即在不施加外力的前提下可保持开关处于自锁状态。工艺方面，分别在 2 个 SOI 晶圆上制备完整的弹性梁与质量块，再将 2 片 SOI 通过金-金热压键合的方式进行组合，从而实现了大质量的制备目标。测试结果表明，开关在 8g 加速度下可进行自锁闭合，在反向 105g 的加速度下可实现解锁。因为自锁状态下电极间接触压力较大，因此接触电阻较小(0.75 Ω)。

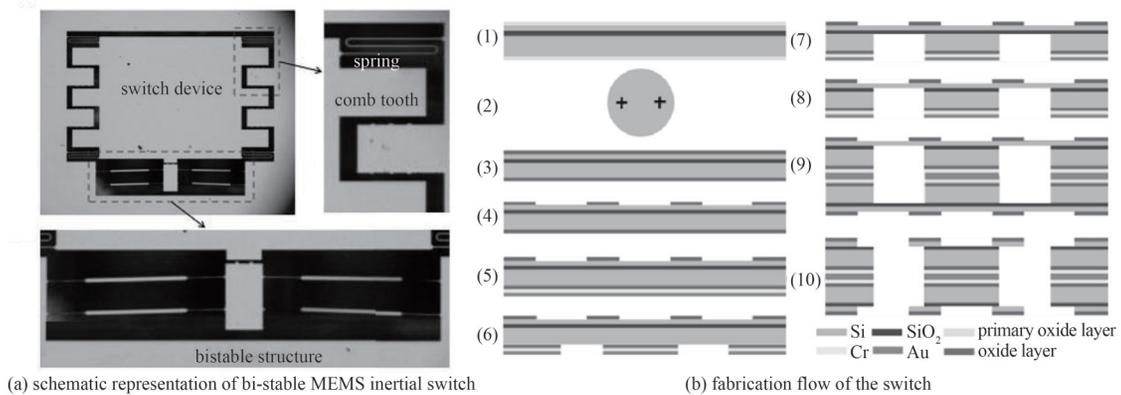


Fig.5 MEMS inertial switch proposed by LIU Min
图5 LIU Min 等研制的双稳态MEMS惯性开关

中国工程物理研究院电子工程研究所创新性地提出一种基于双埋层 SOI 硅片的螺旋梁低 g 值开关^[15-18]，如图 6 所示。双埋层 SOI 是一种 3 层单晶硅和 2 层 SiO₂ 相叠分布的特殊 SOI 材料，其中中间层的单晶硅层用作平面螺旋梁结构，可较好地控制梁的厚度。在此基础上，开发了适用于双埋层 SOI 加工的系列工艺技术，如深槽光刻、玻璃-SOI-玻璃直接键合、金属屏蔽、穿通刻蚀等，具体加工流程如图 6 所示。测试结果表明，开关阈值小于 4.77g(目前公开报道中的最低阈值)，刚度为 2.3 N/m，阈值重复性偏差小于 2%，导通电阻小于 10 Ω，抗随机振动能力大于 0.4g²/Hz。同时，采用该技术的批量加工合格率大于 95%，具有较高的工程化应用水平。

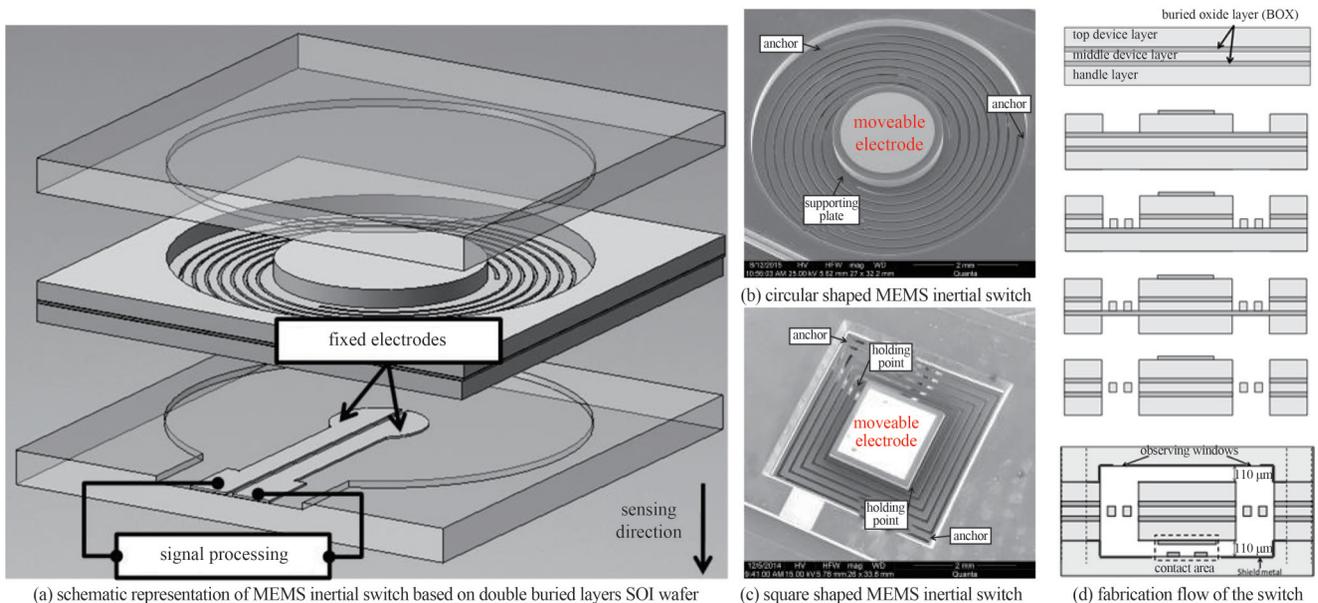


Fig.6 MEMS inertial switch proposed by China Academy of Engineering Physics
图6 中国工程物理研究院研制的MEMS惯性开关

重庆大学彭迎春等^[19]采用单晶硅片制作垂直运动结构的开关，如图 7 所示。阈值为 14.2g~16.1g，阈值精确度为 ±1g，抗冲击能力大于 1 000g，接触电阻为 10~15 Ω。由于开关没有顶部盖板，因此在敏感轴运动方向上没有进行位移限制，影响了开关的抗冲击性能。

美国陆军实验室 Currano 等^[20]开发了基于低阻 SOI 材料的平面运动插锁式开关，如图 8 所示。质量块沿平面展开，由 4 根折叠梁支撑。在质量块运动方向上(x 轴)对称分布 2 组悬臂式插锁机构，因此开关对 x 轴正、负方向

上的加速度均敏感。为使开关能够重复使用,设计了V形梁式电热执行器。在闭锁状态下,通过对执行器施加电流输入,可使执行器悬臂产生形变,释放已闭锁的质量块,开关闭合阈值为21.9g。存在的问题包括:质量块厚度仅为20 μm ,因此必须通过增加质量块面积(4 mm \times 6.5 mm),以增加重量;通过低阻硅间的闭锁接触建立闭合回路,因此导通电阻过大(2~50 M Ω)。

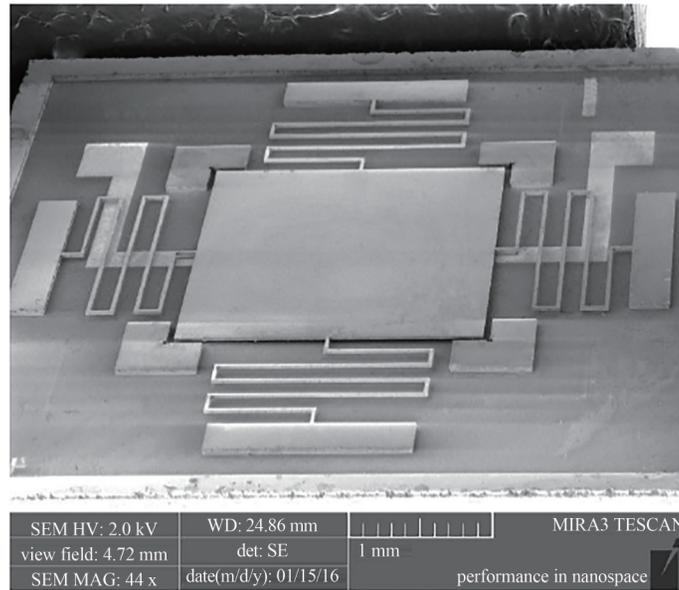


Fig.7 SEM picture of fabricated MEMS inertial switch
图7 基于单晶硅片的MEMS开关电镜照片

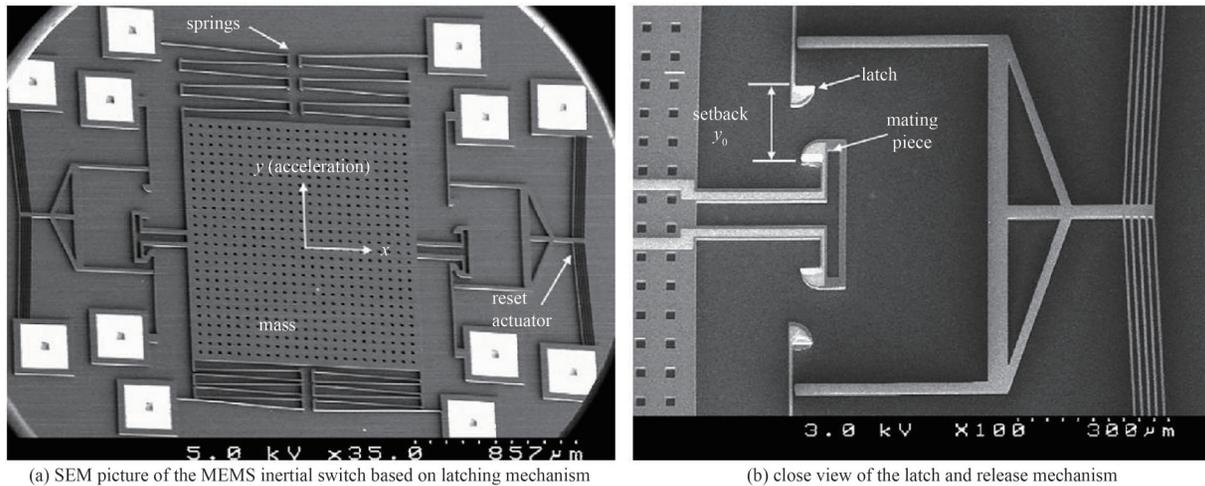


Fig.8 MEMS inertial switch proposed by Currano
图8 Currano等研制的MEMS惯性开关

新加坡国立大学 Ongkodjojo 等^[21]提出一种非接触式惯性开关设计思路,如图9(a)所示。采用悬臂梁作为敏感惯性力载体,并将其作为门级G,与下方基底上的源极S和漏极D共同形成一个场发射晶体管。通过建立悬臂梁位移与晶体管输出电流之间的关联,可表征出外界加速度的大小。开关阈值设计为4.8g,但未见器件制作及其性能测试的相关报道。韩国首尔大学 Kim 等^[22-23]提出一种基于静电力的阈值调节的水平运动惯性开关,如图9(b)所示。通过质量块周围的梳齿电极对系统施加电刚度,实现阈值的调节。开关本征阈值为10.25g,通过施加0~30 V的电压,可实现阈值在2g~17.25g之间的调节。开关加工思路与文献[19]相近,由于开关没有顶部盖板,因此在非敏感方向上的抗冲击性能较为薄弱。另一方面,开关通过硅-硅接触建立导通回路,因此接触电阻较大。上述2种开关均为有源器件,在某些特定的电磁干扰环境下的使用可靠性存在较多不确定因素。

2.2 基于金属材料的低 g 值 MEMS 惯性开关

上海交通大学 CHEN 等^[24]提出一种水平运动的金属惯性开关，采用节圆弹簧的支撑梁设计降低系统等效刚度，如图 10(a)所示。开关以陶瓷作为基底，主体结构为 Ni(镍)，采用微电镀工艺进行加工。固定电极采用柔性悬臂式设计增加接触时间，同时采用了止挡结构，限制开关在非敏感方向的位移。测试结果表明，开关阈值为 25g。上海交通大学 LI 等^[25]在此基础上，进一步提出了一种多节移动电极的接触方式，以避免接触弹跳，增加接触可靠性；同时通过静电力辅助的方式增加接触时间，如图 10(b)所示。开关阈值设计为 22g，通过施加 8 V 电压，接触时间可由 45 μ s 提升至 192 μ s。

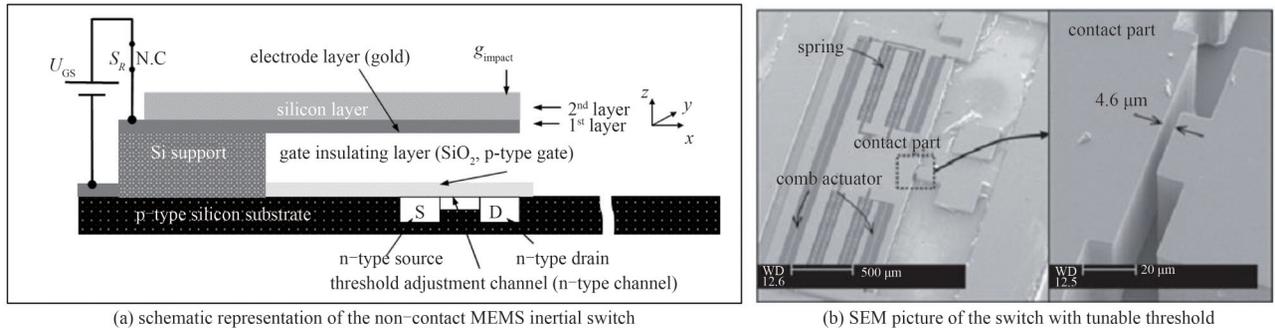


Fig.9 MEMS inertial switch proposed by Ongkodjojo
图9 Ongkodjojo 等研制的 MEMS 惯性开关

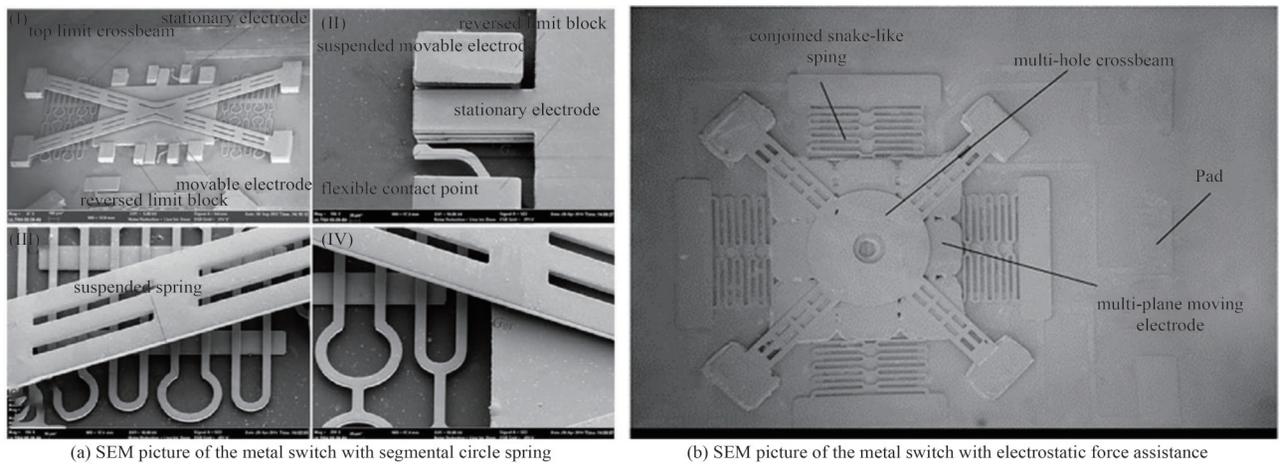


Fig.10 MEMS inertial switch proposed by CHEN, LI
图10 CHEN、LI等研制的 MEMS 惯性开关

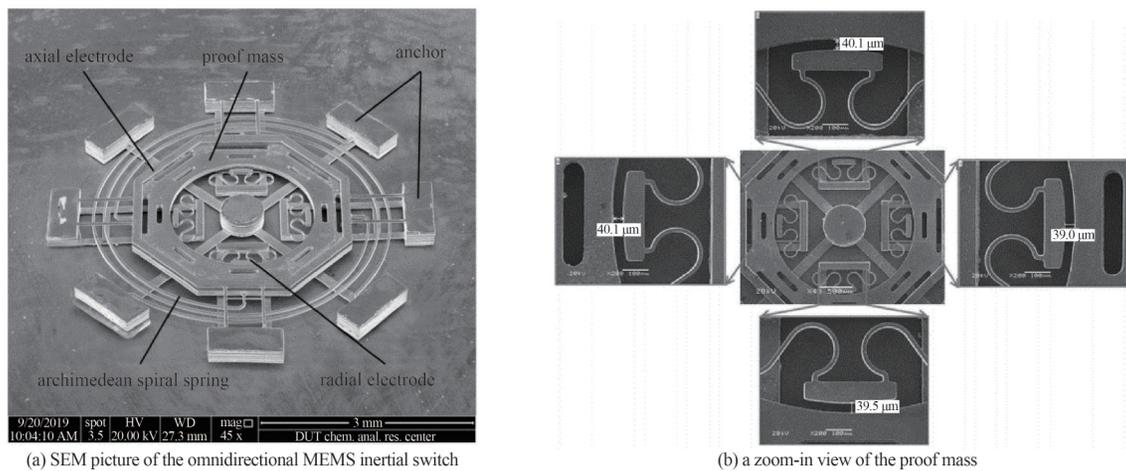


Fig.11 SEM picture of the omnidirectional MEMS inertial switch
图11 万向敏感金属开关电镜图

大连理工大学 DU 等^[26]提出一种万向金属惯性开关，采用螺旋形梁以降低系统等效刚度，如图 11 所示。在质量块周围布置了 4 个固定电极，通过单个电极自身或相邻电极组合的方式可实现水平面 8 个方向的加速度敏感；在质量块顶部设计了 1 个固定电极，用于垂直方向加速度敏感。开关以钢材料作为基底，主体结构为 Ni，采用 6 层微电镀工艺进行加工。测试结果表明，开关垂直方向阈值为 8.9g，水平方向阈值为 11.6g。

台湾“国立清华大学” Chung 等^[27]提出了一种金属结构的自锁开关，如图 12 所示。开关采用悬臂式结构，自由端位于固定电极下方。当施加惯性加速度时，悬臂自由端向固定电极移动，并逐渐产生形变；当加速度达到开关阈值时，悬臂自由端越过固定电极，建立自锁状态。为提升系统等效质量，在悬臂顶部设计一对长 2 mm，宽 1 mm 的质量块。开关以硅材料作为基底，主体结构为 Ni，在 17.22g 的加速度下能实现自锁，接触电阻 40 Ω；在施加反向 50g 加速度时能实现解锁。由于悬臂自由端在每次工作时都与固定电极产生摩擦，因此开关的长期工作可靠性不易保障。

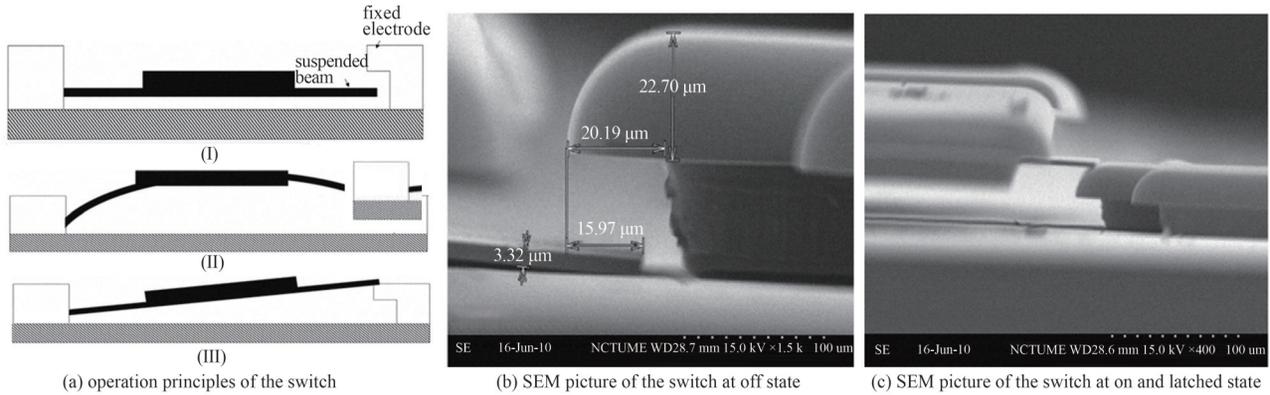


Fig.12 MEMS inertial switch proposed by Chung

图 12 Chung 等研制的 MEMS 惯性开关

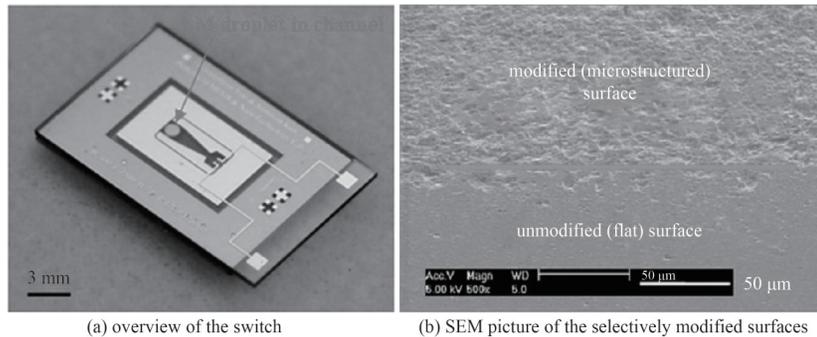


Fig.13 MEMS inertial switch based on liquid-metal droplet proposed by Yoo

图 13 Yoo 等研制的液态金属 MEMS 惯性开关

2.3 微流体低 g 值 MEMS 惯性开关

韩国浦项工科大学 Yoo 等^[28]首次提出一种基于微流体技术的惯性开关，如图 13 所示。采用水银液滴作为敏感加速度载体，当加速度达到开关阈值时，液滴穿过微流道到达固定电极槽，实现开关的导通。采用 SOI 材料加工微流道，电极材料选用 Ni/Cr 薄膜，避免与水银之间的合金化。通过改变微流道的结构参数，可以实现对 2g~20g 范围内惯性加速度的敏感。工艺中采用喷砂手段对 DRIE 刻蚀深槽侧壁粗糙度进行有选择性的改善，以降低对水银液滴运动状态的影响。

美国圣地亚实验室在 2011 年 LDRD 年度报告中提出一种液态开关新思路，如图 14 所示。建立以汞(Hg)-铊(Tl)合金材料为液滴、Au 材料为电极、SOI 材料为结构层的工艺路线^[29-30]，对 Hg-Au 合金化对电极导电性能和液滴运动状态的影响、Hg 在空气中氧化和挥发等问题进行技术分析讨论。研究了微流道壁面状态和微流道结构尺

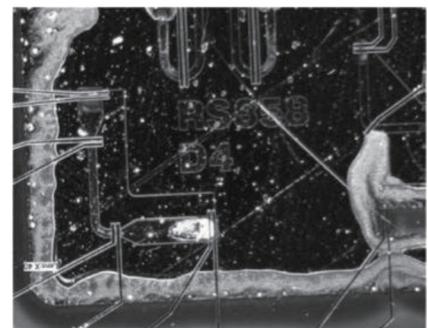


Fig.14 MEMS inertial switch based on Hg-Tl alloy metal droplet

图 14 以 Hg-Tl 合金材料为液滴的 MEMS 开关

寸的分散性对液滴动态力学性能的影响, 实现了 SOI 材料微流道、电极结构的组装。在 $10g\sim 20g$ 离心加速度作用下观测到了水银液滴的流动状态, 但液态金属汞是一种具有挥发性的剧毒金属, 器件的制作和封装具有一定的危险性。

台湾大学 Kuo 等^[31-32]采用水滴作为敏感惯性力载体, 分别采用 PDMS 与玻璃制备微流道以及基底, 如图 15 所示。在玻璃基底上覆盖一层金属 LC 电路。当加速度达到阈值时, 水滴通过微流道到达水凝胶腔室, 使水凝胶膨胀, 进而改变 LC 电路的电容以及电路振荡频率。通过改变微流道的宽度刻蚀实现开关整阈值调整。试验结果表明, 当外界加速度达到 $15g$ (开关阈值)时, 采用无线测试方法测量到 LC 电路振荡频率由 72 MHz 下降至 57 MHz 。

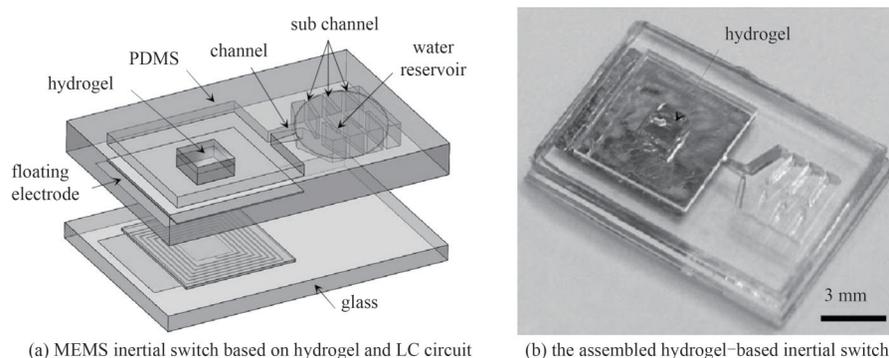


Fig.15 MEMS inertial switch based on liquid-metal droplet proposed by Kuo

图 15 Kuo 等研制的液态金属 MEMS 惯性开关

3 现阶段面临的主要问题与解决思路

3.1 主要问题

在武器装备领域, 虽然现阶段低 g 值 MEMS 开关已用于部分场合, 但尚无法满足装备实战化水平进一步提升对极端环境适应性(振动、冲击、温度、辐照)、长期稳定性(接触电阻、精确度)、智能化(动态监测、健康状态检测)的新要求, 具体问题体现在:

1) 低 g 值开关均是由低刚度支撑弹簧和大敏感质量块构成, 且需要在装备完整生命周期内保持良好可靠性。但武器弹药在长期库存、战备执勤、瞬发、飞行、引爆等不同阶段所受载荷差距过大(抗跌落过载上万 g 、匀加速度 $10g\sim 80g$ 、高冲击 $5\ 000g\sim 30\ 000g$ 以及低 g 值大带宽飞行振动谱等), 复杂恶劣的强环境激励(温度、振动、冲击)导致低 g 值开关的大柔度结构多模态动力学响应控制不足, 非线性特征显著, 从而造成接触失调、阈值超差、电极接触磨损等不可靠现象。

2) 对于武器装备“长期贮存、一次使用”的零故障容忍度, MEMS 开关尚不具备实用的动态特性监测手段, 导致其在强环境下的工作适应性设计优化改进、健康状态评估和长时工作稳定性评估困难重重。

3) 针对中子辐照、累积高剂量率辐照等实战化场景, 尚需进一步开展 MEMS 开关在辐射条件下的生存能力考核验证研究。

3.2 解决思路

针对上述关键问题, 提出以下解决思路:

1) 敏感结构强环境激励拓扑动力学响应分析与优化。建立准确的开关非线性高阶动力学模型, 研究开关微结构的高阶多模态响应与非线性混沌特征预测方法, 并结合结构优化技术(尺寸优化+拓扑优化)完成具有干扰模态响应抑制功能的微结构拓扑设计。

2) 强冲击/强振动载荷对接触界面的影响。研究静力及强环境动载激励、温度对微结构接触界面粘弹性材料本构力学行为的影响, 建立基于近场动力学的触点宏/微观接触损伤分析模型, 实现抗磨损、低导通电阻的接触界面形貌及电极导通特性调控设计。

3) 微纳加工精确度与工艺应力控制。针对硅微结构跨尺度、深槽的高精确度 MEMS 加工难点, 开展误差补偿、圆片键合应力控制技术, 获得高精确度、低应力的微结构。

4) 微结构动态特性在线表征。研究阵列化分布式监测电极设计方法, 实现动态检测电容。结合低 g 值开关非线性高阶动力学模型, 建立弹簧-质量结构动力学响应特性的在线监测手段。

5) 辐照对敏感结构性能影响。在强辐射载荷下, 在 MEMS 敏感结构材料中造成明显的位移损伤, 导致敏感结构体的杨氏模量、残余应力应变发生轻微变化。上述变化将直接作用于器件的输出, 是影响器件性能的关键因素。需开展材料参数、敏感结构辐射退化传递机制研究, 通过敏感结构、封装、工艺抗辐照加固设计, 提升低 g 值开关的抗辐照性能。

4 总结与展望

低 g 值 MEMS 惯性开关是集传感与执行为一体的无源电子器件, 具有体积小、重量轻、易集成、加工一致性好、免装配等优势, 在汽车工业、航空航天、武器装备等领域应用广泛。本文从低 g 值 MEMS 惯性开关的工作原理、结构特点、工艺特点等方面, 对国内外的研究现状与应用情况进行了较为全面的阐述。分析了现阶段惯性开关在装备实战化水平进一步提升方面面临的主要问题, 建议从强环境激励工况下微结构动力学拓扑设计优化、强冲击/强振动载荷对接触界面的影响、微纳加工精确度与工艺应力控制、微结构动态特性在线表征、敏感结构抗辐照特性等方面入手, 进一步加大对低 g 值 MEMS 惯性开关的研究力度, 提升开关的集成度、极端环境适应性、长期稳定性、工作可靠性等性能, 对推进武器装备实战化水平具有重要实践意义与应用价值。

参考文献:

- [1] FROBENIUS W D,ZEITMAN S A,WHITE M H,et al. Microminiature ganged threshold accelerometers compatible with integrated circuit technology[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1972,19(1):37-40. doi:10.1109/T-ED.1972.17368.
- [2] Sandia National Laboratories. Sandia lab news[R]. Albuquerque:Sandia National Laboratories, 2005.
- [3] Sandia National Laboratories. Labs accomplishments[R]. Albuquerque:Sandia National Laboratories, 2005.
- [4] Sandia National Laboratories. Labs accomplishments[R]. Albuquerque:Sandia National Laboratories, 2004.
- [5] HT Micro Analytical Inc. Mems precision[EB/OL]. [2023-01-02]. <http://www.htmicro.com>.
- [6] YOON S W. Vibration isolation and shock protection for MEMS[D]. Ann Arbor,Michigan:University of Michigan, 2009.
- [7] RAGHUNATHAN N. MEMS switches for impact threshold detection[D]. Peroulis:Purdue University, 2014.
- [8] 北京航空学院材料力学教研室. 材料力学教程[M]. 北京:国防工业出版社, 1982. (Department of Materials Mechanics, Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics. Material mechanics course[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 1982.)
- [9] 陈光焱,王超. 微惯性开关设计技术综述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2009,7(5):439-442. (CHEN Guangyan,WANG Chao. Review of the design of micro inertial switch[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2009,7(5):439-442.) doi:10.3969/j.issn.1672-2892.2009.05.015.
- [10] FIELD R V,EPP D S. Development and calibration of a stochastic dynamics model for the design of a MEMS inertial switch[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2007,134(1):109-118. doi:10.1016/j.sna.2006.04.033.
- [11] PALMER J A,EPP D S,GARCIA E J,et al. Engineering fluidic damping in a MEMS inertial switch:conference proceedings of the society for experimental mechanics series:SAND2006-0500C[C]// International Modal Analysis Conference. St.Louis, Missouri: Sandia National Laboratories, 2006.
- [12] BAKER M S,POHL K R. Testing of MEMS mechanical non-volatile memory and silicon re-entry switch:SAND2005-6094[R]. Livermore,CA,United States:Sandia National Laboratories, 2005. doi:10.2172/875630.
- [13] HWANG J,RYU D,PARK C,et al. Design and fabrication of a silicon-based MEMS acceleration switch working lower than 10g[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2017,27(6):65009. doi:10.1088/1361-6439/aa6cd2.
- [14] LIU Min,ZHU Yingmin,WANG Chao,et al. A novel low- g MEMS bistable inertial switch with self-locking and reverse-unlocking functions[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2020,29(6):1493-1503. doi:10.1109/JMEMS.2020.3032586.
- [15] XIONG Zhuang,WANG Chao,ZHANG Fengtian,et al. A low- g MEMS inertial switch based on direct contact sensing method[J]. IEEE Transactions on Components,Packaging and Manufacturing Technology, 2019,9(8):1535-1541. doi:10.1109/TCPMT.2019.2926332.
- [16] ZHANG Fengtian,WANG Chao,YUAN Mingquan,et al. Conception,fabrication and characterization of a silicon based MEMS inertial switch with a threshold value of 5g[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2017,27(12):125001. doi:10.1088/1361-6439/aa7c0d.
- [17] ZHANG Fengtian,YUAN Mingquan,JIN Weifeng,et al. Fabrication of a silicon based vertical sensitive low- g inertial micro-switch for linear acceleration sensing[J]. Microsystem Technologies, 2017,23(7):2467-2473. doi:10.1007/s00542-016-3008-y.
- [18] XIONG Zhuang,ZHANG Fengtian,PU Yingdong,et al. Silicon-based,low- g microelectromechanical systems inertial switch for linear acceleration sensing application[J]. Micro & Nano Letters, 2015,10(7):347-350. doi:10.1049/mnl.2015.0059.

- [19] 彭迎春. 低 g 值微型加速度开关器件关键技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017. (PENG Yingchun. Research on key technology of low g value micro acceleration switch device[D]. Chongqing,China:Chongqing University, 2017.)
- [20] CURRANO L J,BAUMAN S,CHURAMAN W,et al. Latching ultra-low power MEMS shock sensors for acceleration monitoring[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2008,147(2):490–497. doi:10.1016/j.sna.2008.06.009.
- [21] ONGKODJOJO A,TAY F E H. Optimized design of a micromachined G-switch based on contactless configuration for health care applications[J]. Journal of Physics:Conference Series, 2006(34):1044–1052. doi:10.1088/1742–6596/34/1/173.
- [22] KIM H,JANG Y,KIM Y,et al. MEMS acceleration switch with bi-directionally tunable threshold[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014(208):120–129. doi:10.1016/j.sna.2014.01.003.
- [23] KIM H S,JANG Y H,KIM Y K,et al. MEMS acceleration switch capable of increasing threshold acceleration[J]. Electronics Letters, 2012,48(25):1614–1616. doi:10.1049/el.2012.3794.
- [24] CHEN Wenguo,YANG Zhuoqing,WANG Yan,et al. Fabrication and characterization of a low- g inertial microswitch with flexible contact point and limit-block constraints[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2016,21(2):963–972. doi:10.1109/TMECH.2015.2463726.
- [25] LI Jian,WANG Yan,LI Yue,et al. A contact-enhanced MEMS inertial switch with electrostatic force assistance and multi-step pulling action for prolonging contact time[J]. Microsystem Technologies, 2018,24(7):3179–3191. doi:10.1007/s00542–018–3881–7.
- [26] DU Liqun,LI Yu,ZHAO Jian,et al. A low- g MEMS inertial switch with a novel radial electrode for uniform omnidirectional sensitivity[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2018(270):214–222. doi:10.1016/j.sna.2017.12.068.
- [27] CHUNG C H,MA R P,SHIEH Y C,et al. A robust micro mechanical-latch shock switch with low contact resistance[C]// 2011 the 16th International Solid-State Sensors,Actuators and Microsystems Conference. Beijing,China:IEEE, 2011:1046–1051. doi:10.1109/TRANSDUCERS.2011.5969169.
- [28] YOO K,PARK U,KIM J. Development and characterization of a novel configurable MEMS inertial switch using a microscale liquid-metal droplet in a microstructured channel[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011,166(2):234–240. doi:10.1016/J.SNA.2009.12.008.
- [29] GALAMOBBS P C. Liquid metal environment sensing devices(ESDs) [R]. U. S. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories 2011 LDRD Annual Report, 2011:599–600.
- [30] GALAMOBBS P C. Compatibility issues associated with the feasibility of liquid metal use in harsh environment[R]. U. S. Albuquerque,New Mexico:Sandia National Laboratories 2010 LDRD Annual Report, 2010:557–558.
- [31] KUO J C,KUO P H,LAI Y T,et al. A passive inertial switch using MWCNT-hydrogel composite with wireless interrogation capability[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2013,22(3):646–654. doi:10.1109/JMEMS.2012.2237385.
- [32] GUO Junhui,YANG Yujie. A passive hydrogel-based inertial switch integrated with micromachined L-C resonator[C]// 2012 IEEE the 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems(MEMS). Paris,France:IEEE, 2012:515–518. doi:10.1109/MEMSYS.2012.6170176.

作者简介:

熊 壮(1984–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为惯性 MEMS 器件设计与工艺技术. email: xiong.zhuang@caep.cn.

张凤田(1977–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为惯性 MEMS 器件设计与测控技术.

谢 晋(1989–), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为 MEMS 器件工艺技术.

张照云(1984–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为 MEMS 器件工艺技术.

杨 杰(1981–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为 MEMS 器件设计与工艺技术.

赵宝林(1979–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为惯性 MEMS 器件设计与测控技术.