

卫星激光通信 MEMS 快速反射镜可靠性研究进展

朱伟鸿^{1,2,3}, 汪 洋^{2,4}, 王栋皓^{2,3}, 刘艺晨^{2,3}, 武震宇^{1,2,3,4*}

- (1. 上海大学微电子学院, 上海 200444;
2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所传感技术国家重点实验室, 上海 200050;
3. 上海微技术工业研究院, 上海 201800;
4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 快速反射镜 (Fast Steering Mirror, FSM) 具有响应快、精度高、分辨率高等优势, 被广泛应用于卫星激光通信、超分辨率成像、高精度激光瞄准等领域, 是捕获、跟踪和瞄准 (Acquisition Tracking and Pointing, ATP) 系统中的核心部件。传统快反镜主要由压电陶瓷和音圈电机驱动, 而基于微机电 (Micro Electro Mechanical System, MEMS) 技术制备的快反镜具有小型化及批量化等优势, 是技术发展的趋势, 但其应用于卫星激光通信领域的可靠性尚未进行全面论证。文中介绍了快反镜的工作原理、环境适应性要求以及国内外快反镜的可靠性水平, 结合致动原理和结构分析了现有快反镜的失效机理、评估方法和可靠性加固技术, 最后指出了高可靠性快反镜的结构和加固技术发展方向, 并通过综合分析验证了 MEMS 快反镜应用于卫星激光通信的可行性。

关键词: 卫星激光通信; 快速反射镜; 微机电系统技术; 环境适应性; 可靠性

中图分类号: TH209 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230179

0 引言

快速反射镜 (Fast Steering Mirror, FSM)(下面简称快反镜) 作为光路收发端之间控制光束方向的精密光电仪器具有高分辨率、高精度、快响应等技术优势, 目前已广泛应用于卫星激光通信、自适应光学成像、高精度激光瞄准等多个领域^[1-3]。尤其在航空航天领域, 要求快反镜在苛刻的太空环境下具有高可靠性, 而对压电陶瓷、音圈电机与 MEMS 快反镜可靠性研究的论文在国内外相对较少。

可靠性是一个系统或部件在规定的条件下, 规定的时间内实现其所需功能的能力, 快反镜的可靠性需要在早期设计阶段就考虑到。从可靠性评估角度来看, 评估快反镜可靠性具有较大挑战, 其具体表现在: 随着快反镜小型化与集成化的发展, 快反镜不仅包含带有镜面的小尺度反射结构, 还具有采集、处理和传

输电信号的微电路。由于快反镜是由几个部分组成的小型化系统, 它潜在的失效模式与机理比集成电路 (Integrated Circuit, IC) 更多, 而失效模式往往取决于快反镜的设计/结构、材料、制造工艺及封装等诸多方面。

为了满足卫星激光通信对快反镜可靠性的要求, 了解快反镜在工作时可能出现的故障, 通过降低其风险以减轻对器件的影响, 必须对快反镜进行深入的可靠性研究。然而, 目前国内外针对快反镜的可靠性设计、可靠性检测与失效分析的相关研究往往存在系统性不足的缺点。基于 MEMS 技术制备的快反镜具有小型化及批量化等优势, 是未来重点发展的方向, 鉴于此文中主要论述 MEMS 快反镜的可靠性问题。

文中首先对应用于卫星激光通信快反镜的可靠性要求进行介绍, 其主要包括可靠性环境试验及标

收稿日期: 2023-03-30; 修订日期: 2023-05-17

基金项目: 中国科学院科学仪器装备研制项目 (YJKYYQ20190026); 上海市产业协同创新项目 (HCXBCY-2021-044)

作者简介: 朱伟鸿, 男, 硕士生, 主要从事 MEMS 快速反射镜封装及其可靠性方面的研究。

通讯作者: 武震宇, 男, 研究员, 博士, 主要从事 MEMS 微纳制造技术和先进传感器等方面的研究。

准;其次,对国内外快反镜的可靠性水平及研究现状进行综述;最后,总结现有快反镜存在的典型的失效机理及其根本原因,并进一步介绍可靠性分析与加固技术,以验证 MEMS 快反镜应用于卫星激光通信的可行性。

1 快反镜可靠性环境试验及标准

在卫星激光通信中,快反镜需要长时间在近轨或太空作业,故对快反镜系统的可靠性要求极高。快反镜的工作环境主要为太空,与地面环境的主要区别在真空度、辐射量以及温度:在 200~500 km 低轨道空间的真空度通常为 10^{-4} Pa,而在 35 800 km 左右的地球同步轨道上的真空度通常为 10^{-11} Pa;低轨的年辐射量通常为 5 krad 左右,高轨的年辐射量通常在 10 krad 左右;地球近轨处温度往往在 $-80\sim 100$ °C 之间变化。快反镜在低轨连续工作寿命应该大于 7 年、在高轨应该大于 12 年,其失效率应该小于 240 fit。

压电陶瓷和音圈电机驱动的快反镜是传统的解决方案, MEMS 传感器和执行器组成的 MEMS 快反镜以其极低的质量和体积、低功耗和与电子设备的紧密集成,在不牺牲功能的前提下减小航天器的体积和质量方面具有极大发展前景。从根本而言,材料、结构、工艺、封装是决定快反镜可靠性的关键因素,前人对此做了很多研究。例如,如何避免污染、防止水汽进入快反镜引起粘附和电气短路与短路;密封封装必不可少^[4-6];为提高快反镜抗冲击能力与长久可靠性,可以在器件内加入抗震结构或吸气剂;为制造没有疲劳和塑性变形的硅悬臂梁,必须确保硅梁上没有金属;为避免由循环应力引起的裂纹扩展导致的疲劳,必须在干燥的环境中工作,最大应变小于屈服强度的 20%^[7-8] 等。

快反镜在激光通信终端扮演着精瞄与提前瞄准的作用,捕获和维持移动卫星激光通信间的主要难点在于极其精确的光束稳定与指向。该部分主要讨论激光通信终端中快反镜历经的环境性要求:机械振动与冲击、真空度、辐射和热冲击对快反镜可靠性的影响,特别是对其光学性能的影响,分别介绍对应的可靠性环境试验主要内容及如何减小或消除其对快反镜的影响。

1.1 机械振动与冲击试验

快反镜在运输、发射、航天器分离等过程中往往伴随着各种机械振动与冲击,一般航天器的振动水平大致为从 5~100 Hz 和从 3~20 g 的正弦振动,冲击水平大致为 500 g,在航天器分离时可能在 0.1 ms 内达到 10 000 g^[9]。针对此所做的可靠性试验常包括:加速度试验、正弦振动试验、随机振动试验与冲击试验,常使用功率放大器与振动台等设备完成上述试验。

传统压电陶瓷与音圈电机驱动的快反镜由于其结构体积较大,故容易受到振动与冲击的影响,需要更加可靠的结构来抵抗机械载荷;基于 MEMS 的快反镜由于其结构微小且质量往往在微克及以下,根据牛顿第二定律 $F=M \times a$ 可知良好设计及封装的 MEMS 快反镜具有很好的冲击抗性。人们发现,创建对称悬挂的几何结构可以通过以圆弯代替尖角来避免应力集中并使得应变最小化, Gasparyan 等人制造出毫米级的悬挂结构,该结构可以在 0.5 ms 脉冲下经受超过 1000 g 的反复冲击^[10]。

对于机械振动载荷,最重要的因素是所施加振动的频率 ω 与 MEMS 结构的固有频率 ω_0 的耦合,如此所施加的机械力 F_0 被放大为:

$$F = F_0 \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)^2 + \frac{\omega^2}{Q^2 \omega_0^2} \right]^{-1/2} \quad (1)$$

因此,应该让 MEMS 快反镜的共振频率高于在运输及发射时的频率,式中 Q 为特定模态下的品质因数,其值小于 1 有利于消除或减小由于耦合效应引起的力放大。

1.2 热真空试验

在 200~500 km 低轨道空间的真空度通常为 10^{-4} Pa,在 35 800 km 左右的地球同步轨道上的真空度通常为 10^{-11} Pa,真空度使得在轨运行快反镜免受湿度的不利影响。热真空试验通常在真空环境下,对超过快反镜工作温度 5~10 °C 的条件下对其进行开关循环或极端温度保持试验。因此具有泄露率合格的真空气密性封装对快反镜在太空工作的可靠性提高非常重要。密封封装对于阻尼也尤为重要,明确的气体压力通常用于实现临界阻尼或过阻尼行为以避免快反镜振幅的非周期性衰变^[11]。另外,受控的气体压力与化学物质也有助于防止电弧击穿与 ESD 现象对器件的

损伤, Paschen 曲线描述了电弧与金属极板间间隙与气体压力的关系^[12]。

1.3 辐照试验

近轨及太空的辐射虽然不会对硅和金属的物理特性, 比如杨氏模量、屈服强度等造成改变, 但是会对快反镜中的驱动和控制电子设备造成损害。辐射损伤通常会导致电子器件发生闭锁或单粒子干扰, 或者光学涂层的持续劣化, 进而导致快反镜光学面型精度变差、反射效率变低。静电放电试验与电磁兼容性试验分别对快反镜抗空间静电放电辐射干扰的能力及抗外来电磁干涉的能力进行研究。

高剂量辐射作用下的主要失效模式为电介质层中电荷的积累, 它能导致器件偏移、短路甚至完全失效。Shea 等人应用一个高电场 (10^8 V/m) 来模拟高辐射强度的作用, 对微镜可能出现的几何变化以及电荷耗散层情况进行详细讨论, 大大降低介质薄膜中捕获的电荷对器件性能的影响: 通过选择性蚀刻改进几何形状, 去除所有无屏蔽介质, 使静电性能不再受捕获电荷的影响, 从而消除了由介电充电引起的倾斜角度漂移的问题。因此, 可以采取类似的结构设计来减轻介质层中的电荷积累, 以进一步增强器件的抗辐射性能^[13]。

1.4 温度循环及热冲击试验

执行卫星激光通信任务的快反镜所遭受的温度冲击十分严重, 一般每天从 $-80\sim 100$ °C 共 16 个周期, 其温度波动的数额取决于工作轨道和具体任务。这会对快反镜组件之间或者快反镜与其封装体间热膨胀系数的匹配程度带来极大挑战。温度循环试验、热冲击试验与高温老练试验可以揭示快反镜对温度敏感程度及影响的可靠性试验。

热冲击能够使芯片键合失效、器件开裂和 MEMS 器件层的分层, 从而导致快反镜故障甚至失效。对于器件分层现象, 一个解决方案是使用具有共同的热膨胀系数的单种材料, 或者使用热膨胀系数相近的材料组装器件。对于温度, 高功率激光往往导致器件的温升, 对此可以通过使用高反射镜涂层来缓解或者将 MEMS 设备与交换气体密封包装以允许对流冷却^[14]。对于 MEMS 快反镜封装, 其工艺已经正从管芯级转移到晶圆级, 这不仅能缩小尺寸降低成本, 更能消除

封装组件中的应力从而使器件具备封装级可靠性。

1.5 小结

快反镜作为捕获、瞄准、跟踪系统中的核心部件, 精瞄与提前瞄准是其在空间激光通信终端的主要作用。精瞄快反镜负责纠正来自于两个干扰源导致的光束错位: 其一, 激光光束穿过大气湍流导致激光波振面产生畸变, 破坏了空间光场的相干性, 进而产生光束偏移、相位起伏、光强变化等光学效应; 其二, 卫星自身的平台振动、姿态漂移与空间摄动力导致光束的抖动与偏移; 考虑到光束传播时间与两卫星间的相对运动, 发射卫星需要准确计算目标角度, 该角度往往非常小, 这需要提前瞄准快反镜具有精确光束指向的能力^[15]。因此, 快反镜不仅需要通过机械振动与冲击、热真空、辐照、温度循环及热冲击等环境性试验, 还应关注试验前后快反镜光学特性, 如: 光学面型精度、光学反射效率和控制精度的变化情况^[16]。

2 国内外快反镜可靠性研究现状

该部分根据不同驱动原理, 分别介绍了传统压电陶瓷、音圈电机驱动的快反镜以及基于 MEMS 工艺的静电、电磁与压电驱动的快反镜, 并进一步介绍了国内外各种驱动原理下快反镜的可靠性水平及研究进展。

2.1 传统快反镜

传统快反镜的解决方案为压电陶瓷快反镜与音圈电机快反镜: 利用材料的逆压电效应提供驱动力的压电陶瓷快反镜拥有小体积、大驱动力、高分辨率、快响应等优点, 但其不足在于抵抗冲击能力较差、压电陶瓷存在介电与迟滞等非线性特性、往往需要放大结构来拓展位移等; 利用通电导体在磁场中受到洛伦兹力的方式提供驱动力的音圈电机快反镜具有大行程、低驱动电压、高承载力等优点, 但其不足在于容易受到环境温度与磁场干扰而影响器件性能, 响应频率往往低于压电陶瓷快反镜^[17-21]。

董美香卫星光通信实验组所使用精瞄装置中的主要器件是快速偏转镜, 其由压电陶瓷 (PZT) 作为驱动元件、殷刚柔性铰链作为传动结构、应变片作为位移测量传感器, 它的透视图与装配图见图 1。影响快反镜工作寿命有内外两部分因素, 其中外部因素包括

电场、频率和温度等,内部因素主要为压电陶瓷与柔性铰链结构。董美香的工作主要探究了内部因素对快反镜可靠性的影响,根据叶型柔性铰链寿命估计模型得出铰链工作循环次数为 $10^{21.4}$,由此得出压电陶瓷是决定快反镜寿命的关键。进一步对压电陶瓷介电特性与迟滞特性进行了实验表征,以温度与电压作为加速因子对快反镜进行了恒定应力加速寿命试验,得到快反镜在 50 V 电压, 27 °C 工作温度及 400 Hz 频率下工作循环次数为 10^{11} ,即为 39.64 年;在 120 V 电压及 120 °C 工作温度时到达失效平均时间约为 3.5 年^[22]。

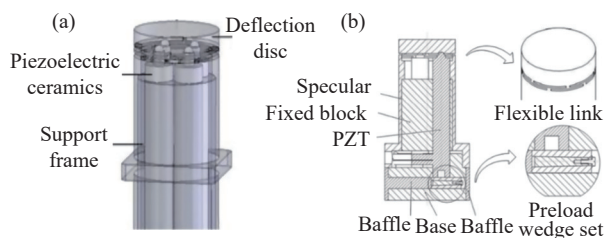


图 1 (a) 压电陶瓷快反镜透视图; (b) 装配图^[22]

Fig.1 (a) Perspective; (b) Assembly drawing of piezoelectric ceramic FSM^[22]

Shin 等人利用双扭法 (Double torsion, DT) 探究周期性电压驱动下压电陶瓷裂纹拓展以研究压电陶瓷的寿命,使用 Paris 公式分析实验结果,得出不同电压下裂纹增长率与电位移强度因子的关系^[23]。德国 Physik Instrumente 公司对温度、驱动电压与湿度对压电陶瓷寿命的影响展开了深入的研究。其研制的 PICMA 多层压电陶瓷致动器经历 100 亿次循环寿命测试没有发生失效,试验后制动器行程退化比初始值仅小 4%;其带有横向槽的压电堆叠设计最小化应力与湿度对压电陶瓷的影响;另外,低工作电压与柔性铰链设计使得 PI 公司的快反镜具有极高的可靠性^[24]。

通过两条柔性铰链正交控制两轴旋转,音圈电机与柔性铰链相结合是大角度快反镜设计的最优方案,其高可靠性在于非接触式驱动方式使其不易受振动工作环境的干扰,PI 公司 20 世纪 90 年代以来就致力于各种地面任务及太空任务^[25-26]。桂潇怡等人对快反镜的大角度、高动态特性以及抗震动干扰进行了研究;音圈电机与柔性铰链在结构上支持了快反镜的大角度、在保证面型精度的前提下通过拓扑优化使得镜体的转动惯量减小,并使椭圆形快反镜的两轴转动惯量差小于 10%,使系统具备高动态特性、提出了使用

MEMS 加速度计测量基座振动,采取自适应前馈补偿的控制方法大大提升了大角度快反镜在振动工作环境下的稳定性。根据试验结果,快反镜静态精度优于 1",小信号带宽高于 200 Hz,对角振动抑制达 -47 dB^[27]。

2.2 静电驱动 MEMS 快反镜

静电驱动是利用电荷间的库仑力使带电体之间产生静电作用力进而实现驱动,具有低功耗、速度快、工艺兼容性好等优点,其不足在于驱动力较低、扫描范围较小。该技术较为成熟,应用较为广泛,如美国 Mirrorcle Technologies 独特的无万向节双轴快反镜。

静电驱动的 MEMS 快反镜由于其结构,它常见的失效机理包括机械性断裂、磨损、粘附、污染、电气短路与断路。其中过大的振动或冲击负载容易导致结构的断裂,受到外界应力干扰导致内部结构的碰撞或循环载荷导致的疲劳容易造成磨损甚至断裂,由于静电力的作用容易导致结构横向与垂直方向的粘附,外界环境的颗粒容易造成污染。另外,多层材料在温度循环应力下容易出现界面疲劳并最终导致器件分层^[28-29]。

刘杰等人研制的小型卫星激光通信终端 SG10-1 是国内首次最小 (0.7 U)、最轻 (0.75 kg)、功耗最低 (7 W),并且上天验证成功的激光通信终端,2020 年 11 月 6 日发射至今仍在运行,其使用的 MEMS 快反镜选用美国 Mirrorcle Technologies 公司型号为 S46749 的产品,镜面安装面最大直径 7.5 mm、驱动电压 90 V、双轴最大工作角度 1.2°、响应频率 550 Hz^[30-31]。美国 Mirrorcle 公司探究了温度对静电驱动无万向节双轴快反镜器件的影响,展示了在 200 °C 高温下快反镜稳定工作能力,结果表明器件对升高的环境温度仅显示出轻微的敏感性;在高功率激光束的照射下,高镜面反射率能够更好抑制由高功率激光所引起的器件温升。其器件结构以及实验装置见图 2,电阻加热台由计算机控制,使用热电偶连接到器件芯片附近,封装采用 DIP-24 封装,使用低功率激光器和位置敏感检测器检测镜面运动^[32]。另外,西北工业大学也研究了高低温对静电驱动微镜的影响,通过高低温存储及温度冲击试验对微镜可靠性进行研究,其结果表明低温对微镜外框架振幅影响较大,达 12.3%;低温存储致水汽凝结易导致器件发生粘结与电气开路等失

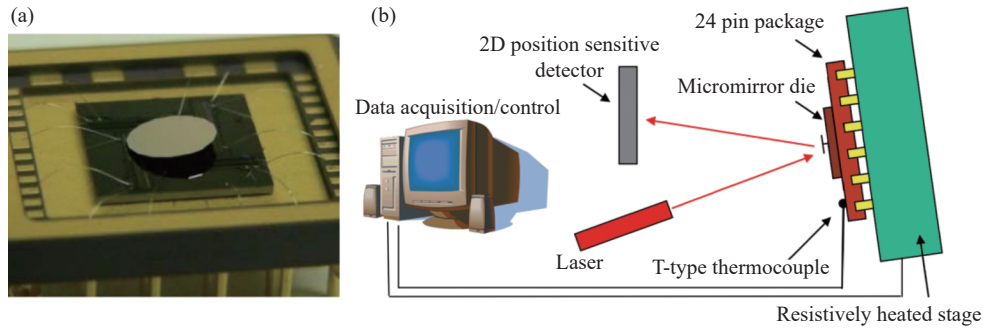


图 2 (a) 静电驱动 MEMS 快反镜结构; (b) 实验装置^[32]

Fig.2 (a) Electrostatically driven MEMS FSM structure; (b) Experimental setup^[32]

效模式^[33-34]。

2.3 电磁驱动 MEMS 快反镜

电磁驱动通过在线圈上施加电流来实现驱动, 磁体产生的磁场同时产生扭矩和力。其工作原理为: 在微镜周围的线圈中流动的电流产生一个基于弗莱明定律的洛伦兹力, 该力驱动微镜产生倾斜角度, 并通过激光在镜面的反射进行扫描。其偏转角度较大, 但功耗相对较高、模块尺寸较大。

电磁驱动的 MEMS 快反镜由于其内部需要配置永磁铁, 故其极易受到外界磁场的干扰。同时, 外界温度的变化也会对永磁铁提供的磁场强度造成影响: 温度越高, 磁性越小, 达到居里温度 (Curie temperature, T_c) 后, 磁性消失。其常见的失效模式为振动或冲击下的机械性断裂, 很多研究对此做了试验。Lani 等人对电磁驱动的 MEMS 快反镜 (见图 3(a)) 进行了热分析与机械分析: 前者进行了 $-40\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 温度循环与 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 加速电寿命评估了快反镜的寿命, 根据阿伦尼乌兹公式推算出在室温下运行的电磁 MEMS 快反镜寿命至少为 10 年, 预计失效机制更多地 在 0.5 eV 范围的活化能以内; 后者评估了系统对机械应力的抵抗力, 进行机械振动与冲击试验后, 快反镜全部通过 X 、 Y 轴向测试, 关于 Z 轴的机械冲击, 使用 Yoshida

Seiki PST-300 摆冲击测试机 (见图 3(b)) 进行测试, 机械冲击脉冲为半旋形, 持续时间为 0.1 ms : 实验结果显示 250 g 是典型的耐受冲击抗力^[35]。

2.4 压电驱动 MEMS 快反镜

压电驱动利用压电材料的逆压电效应, 通过施加的电压来产生微小位移。使用不同压电材料的 MEMS 快反镜其可靠性问题不尽相同, 锆钛酸铅 (PZT) 与氮化铝 (AlN) 是压电 MEMS 快反镜常用的压电材料。PZT 具有较强且稳定的压电性能、各向异性大、居里温度高、介电常数小, 目前市场上使用最为广泛的压电材料, 压电陶瓷驱动的快反镜大都使用 PZT 材料, 其不足在于 PZT 设备成本较高, 薄膜材料具有介电特性及迟滞特性等非线性因素, 并且包含有害的物质 (如: 铅)。

Bevilacqua 等人通过高温工作寿命试验 (High Temperature Operating Lifetime, HTOL) 和高温偏置试验 (High Temperature Bias, HTB) 对压电 PZT 快反镜进行了可靠性测试, 并表征了器件性能结果^[36]。特别的是, 通过对 HTB 测试混合效应的分析, 这些测试通过对底部电极进行正偏置, 然后进行 HTOL 测试, 其中顶部电极正偏置, 同时保持底部接地, 证明了反极化中的高温偏置应力对缓解由器件正常工作引起的驱动功率漂移十分有益。

AlN 具有自发极化特性, 同时拥有高电阻率、高热导率、高稳定性, 可以适应高温工作环境, 具有良好的化学稳定性, 其固有缺点在于沿 c -轴方向生长的 AlN 薄膜的压电系数较小 ($d_{33}=5\sim 6\text{ pm/V}$)。为了突破这个问题, 一种有效的方法是通过向其掺杂以提升其压电性能, 铝钪氮 ($\text{Al}_{1-x}\text{Sc}_x\text{N}$) 应运而生, $\text{Al}_{1-x}\text{Sc}_x\text{N}$ 相较于 AlN, 其压电性能的显著提升, 图 4

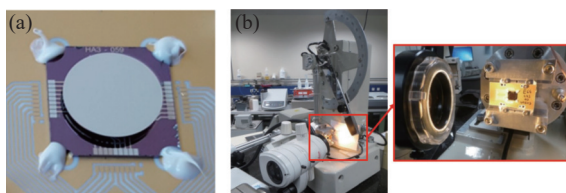


图 3 (a) 电磁驱动 MEMS 快反镜结构; (b) 实验装置^[35]

Fig.3 (a) Electromagnetically driven MEMS FSM structure; (b) Experimental setup^[35]

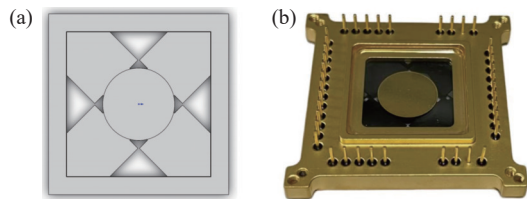


图 4 中国科学院上海微系统所研制的压电 MEMS 快反镜。(a) MEMS 快反镜芯片; (b) 封装模块

Fig.4 Piezoelectric MEMS FSM manufactured by SIMIT. (a) MEMS FSM; (b) Packaged MEMS FSM

为中国科学院上海微系统所研制的快反镜^[37]致动器所使用的压电层就是 $Al_{0.90}Sc_{0.10}N$, 芯片尺寸为: $25\text{ mm}\times$

$25\text{ mm}\times 0.6\text{ mm}$, 反射镜镜面直径为 10 mm , 封装中适当的内部压力级的密封提高了 MEMS 组件的机械稳健性, 并保护它们免受外界颗粒影响。目前该款快反镜已通过最大 p-p 位移 20.7 mm 的鉴定级正弦振动试验与 14.34 grms 量级的鉴定级随机振动试验。

2.5 小结

压电陶瓷与音圈电机作为传统快反镜的解决方案, 其理论研究与工程化水平较为深入; MEMS 快反镜相较于传统快反镜具有更小的体积与质量, 具备小型化、低成本、批量化等优势, 是未来发展的方向。

表 1 总结了快反镜典型性能参数及其特点:

表 1 快反镜典型性能参数及其特点

Tab.1 Typical performance parameters and features of FSM

Performance parameters		Quality/g	Mirror size/mm	Optical angle/mrad	Control bandwidth/Hz	Advantages	Disadvantages
Traditional FSM	Voice coil motors	~600	20-80	20-70	75-300	High angle, high accuracy	Great power consumption, large volume
	Piezoelectric ceramics	~400	20-100	3-10	150-1 000	Fast response speed, High resolution	Hysteresis characteristics
MEMS FSM	Electrostatic					Integrated, low power consumption, miniaturization	Small mirror size
	Electromagnetic Piezoelectric	~10	<10	3-40	100-1 500		

3 可靠性分析及其加固技术

3.1 有限元分析

为了提高 MEMS 器件的可靠性, 同时缩短开发和测试时间, 从失效物理的角度进行可靠性设计需要融入到产品设计过程的早期阶段。高效、准确的数值模拟作为一种重要的工具, 变得越来越重要。

有限元法是应用于产品设计和开发的一种强有力的数值技术。有限元法使结构变形的可视化, 其应用领域已遍及各类物理场的分析, 如电场、磁场、温度场、声波场等, 从力学线性到非线性的分析, 从单一场到若干场的耦合分析, 在有限元的帮助下, 工程师可以在设计制造之前构造、细化和优化他们的设计。四大有限元分析软件包括 ABAQUS、ADINA、ANSYS、MSC, COMSOL Multiphysics 也是常用的有限元分析软件, 有限元程序主要分为三个主要部分: 前处理、有限元分析及后处理。

许天资等人利用 MSC.Fatigue 软件和疲劳强度理论针对空间相机反射镜组件在随机振动试验过程中存在的疲劳问题进行了随机振动疲劳寿命的仿真分析, 得到反射镜组件的寿命最小处在柔性支撑结构的十字筋处, 最小的疲劳寿命为 $80\ 235\text{ s}$ ^[38]。苏州希景电磁 MEMS 微镜在进行随机振动与冲击试验前也利用 COMSOL 软件进行了有限元仿真分析, 仿真结果表明 $1\ 189\text{ Hz}$ 对应的“活塞运动”模态是微镜的危险模态, 应力载荷相同时该模态对应地应力值较大, 容易使得微镜梁结构应力超过硅的屈服强度从而发生断裂失效, 最后试验结果表明: 微镜在 $1\sim 1.4\text{ kHz}$, 32 g 随机振动下发生断裂失效, 冲击耐受水平为 700 g , 试验结果与仿真结果较为吻合^[39-40]。

利用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件对中国科学院上海微系统所研制的压电驱动式 MEMS 快反镜进行随机振动与机械振动冲击仿真, 量级为卫星激光通信终端在运输、发射、航天器分离等过

程中往往伴随着的各种机械振动与冲击水平,符合 JESD22-B103、JESD22-B104 标准的随机振动量级通常为 14.34 g_{rms}、冲击为 500 g,将其设置为仿真所加应力的条件。

通过对 14.34 g_{rms} 随机振动的有限元仿真:其面内最大应力为 2.4 MPa、面外最大应力为 7.3 MPa;对 500 g 冲击仿真结果显示:面内最大应力为 0.07 GPa、面外应力为 0.12 GPa。在同一应力水平下,面内应力值小于面外应力值,图 5 展示了快反镜分别在 14.34 g_{rms} 随机振动与 500 g 冲击时面外应力的分布图。可以看到,受负载时应力主要集中于曲率变化较大处,即快反镜四根致动梁根部及(背部)弹簧处,图中所示应力最大值皆位于弹簧处:由于 14.34 g_{rms} 随机振动水平下最大应力为 7.3 MPa、500 g 冲击水平下最大应力为 0.12 GPa 皆远小于硅的屈服强度,故从仿真上验证了该 MEMS 快反镜应用于卫星激光通信的可行性。

械冲击等,机械谐振激励可能会导致异常的输出信号,因此有时需要在通电状态下对器件进行表征,分离使用环境和所施加的应力对测试是有益的。各失效机理加速因子的设置不尽相同,表 2 总结了快反镜失效机理所对应的加速因子^[41]。

表 2 快反镜常见失效机理及其加速因子

Tab.2 Common failure mechanisms and AFs of FSM

Failure mechanism	Acceleration factors
Fracture	Acceleration, vibration frequency
Creep	Temperature, applied stress and strain
Wear	Load, speed, temperature, Composition of environment
Stiction	Mechanical shocks, vibration, voltage
Cyclic fatigue	Applied stress and strain, temperature, Number of cycles
Electromigration	Current density, temperature
Electrostatic discharge	Charged devices, charged environment, Cosmic rays
Corrosion	Voltage and polarity, temperature

机械可靠性试验主要能够获得器件对于应力的抵抗性水平,快反镜在运输、装配和工作等过程中能否保证机械结构的完整性很大程度上可以通过该类试验得到相关数据;环境舱可靠性试验更多的是在于探究各种应力或环境对器件存储或工作状态下的影响,在保持失效机理不变的前提下通过施加加速应力缩短试验周期、提高试验效率、降低试验成本,以期得到可靠的寿命估计。加速寿命试验涉及到加速寿命模型、加速寿命数据统计推断、加速机理一致性检验等方面。目前,加速寿命试验已广泛在工程实际问题中得到应用^[42]。

按试验应力所加载的方式,加速寿命试验通常可分为恒定应力试验 (Constant-Stress Testing, CST)、步进应力试验 (Step-Up-Stress Testing, SUST) 和序进应力试验 (Progressive Stress Testing, PST) 三种基本类型^[43]。对于加速模型,它是一个寿命与加速因子间关系的模型,不同的失效机理应选择不同的加速模型:采用温度作为加速因子,常选择 Arrhenius 模型;采用电应力(电压、电流、功率等)作为加速因子,常选择逆幂律模型;采用温度循环作为加速因子,选择 Coffin-Manson 模型^[44]。

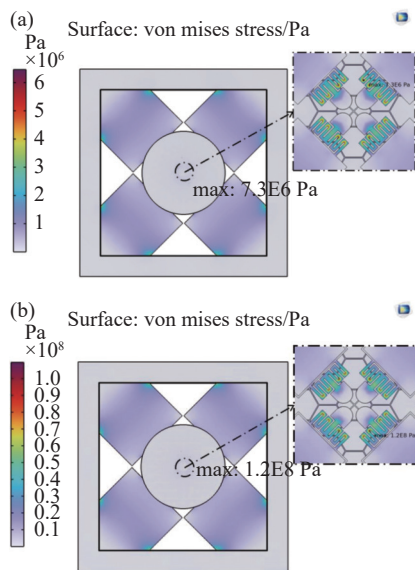


图 5 中国科学院上海微系统所压电 MEMS 快反镜。(a) 14.34 g_{rms} 随机振动仿真;(b) 500 g 机械冲击仿真

Fig.5 Piezoelectric MEMS FSM manufactured by SIMIT. (a) 14.34 g_{rms} random vibration; (b) 500 g shock simulation

3.2 加速寿命试验

加速寿命试验主要可分为两类:环境舱可靠性试验与机械可靠性试验,前者包含有温度循环、高低温存储、恒定湿热存储和腐蚀环境试验等,在试验过程中亦可配合通电操作进行;后者包含有随机振动与机

另外,明确试验样品的失效分布函数才能对加速寿命试验数据进行统计推断,常用的包括指数分布、威布尔分布与对数正态分布。其中,指数分布常适用于浴盆曲线中出现的稳定失效;对数正态分布适用于处理绝大部分失效机理,然而一些如焊料疲劳导致的失效,常用威布尔分布模拟计算^[45]。

3.3 失效判据

失效定义为产品降低到不能满足所规定的要求的状态或丧失其原有功能。一旦出现如断裂、蠕变、磨损等上述失效机理可判定器件失效,另外快反镜的光学面型精度、光学反射效率和控制精度发生 10%~20% 偏差时也往往将其定义为失效,因为此时器件往往无法完成预定任务^[46]。

由于缺乏专业标准,故常用于 IC 组件可靠性评估的失效判据方法也适用于快反镜及 MEMS 器件,但仍存在以下三点挑战:第一,给出一个故障定义通常并不简单,传统的系统级和封装级可靠性测试故障定义是电阻增加到一定阈值以上,但这对于快反镜而言是不可行的,快反镜元件往往比组合的电子器件更早失效;第二,由于快反镜是机械系统,加载也会引起暂时的参数漂移或加载条件发生故障或异常,使故障判据的确定更加复杂;第三,由于快反镜通常与驱动电路相结合,因此在可靠性测试中必须考虑其可靠性以及它们之间的集成性。

3.4 失效分析方法

失效分析方法包括:样品制备的切割、横断面制作;以及 X 射线、声学、光学和扫描电子显微镜 (SEM) 等。前者属于破坏性检测:由于快反镜结构精细, MEMS 结构尺寸小、结构复杂,难以定位被卡住的零件,而采用破坏性的样品制备方法时,可能需要复杂的工艺流程,并可能导致机械应力或将颗粒或污染物引入空腔和表面,从而使故障分析变得困难;后者属于无损检测:快反镜无损检测失效分析方法具有挑战性,其失效分析应结合有限元仿真和电学特性对可能的失效点进行预测建模。

对于破坏性检测,可以用细切片锯和聚焦离子束 (Focused Ion Beam, FIB) 来代替研磨和抛光的过程来制备截面,这种方法对脆性硅的检测更为温和,因为它的目的是检测功能硅基 MEMS 结构,为了进行深入分析,可以通过光学显微镜或扫描电镜对截面进行

观察。Tan 等人用晶圆刀制作了 MEMS 麦克风的横截面,并用 SEM 成像。FIB 是在要求高精度时制备样品的有力工具,其基本工作原理为:通过将 Ga 离子化成 Ga^+ , 利用电场加速,再利用静电透镜聚焦,将高速、高能量的 Ga^+ 打到指定的点^[47]。图 6 是使用氩等离子体 FIB 进行检查、制备和成像的 1 mm 宽的 MEMS 金属粘合界面截面^[48]。

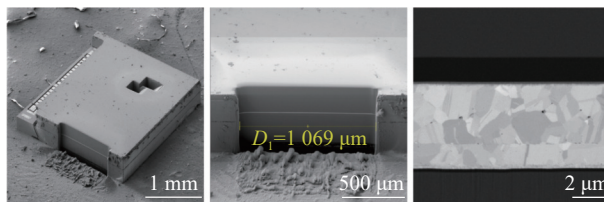


图 6 FIB 制作的 1 mm 金属粘合界面^[48]

Fig.6 1 mm metal bonding interface made by FIB^[48]

对于无损检测,这里介绍一个划痕引起的粘合界面缺陷的例子。快反镜或 MEMS 结构通常包括孔和空气/真空腔,在某种程度上有效地阻碍了声学探测检查,但声学检查仍然可以提供有价值的信息,如图 7(a) 展示了利用超声波显微镜用于失效分析;图 7(b)、(c) 使用光学 InGaAs 相机,它能够提供很好的对比度和更高的穿透深度,但受到非透射层的限制,如照明区域两侧的金属化;红外辐射 (Infrared

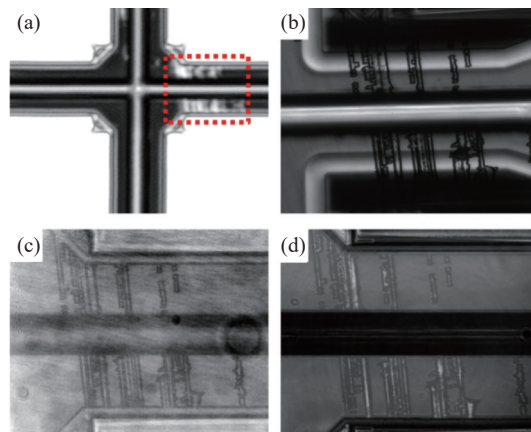


图 7 使用 (a) 超声波显微镜; (b) 透射 InGaAs 相机; (c) 可见 InGaAs 相机; (d) 红外相机拍摄划痕引起粘合界面缺陷

Fig.7 A scratch-induced bonding interface defect imaged by (a) C-SAM, confocal scanning acoustic microscope; (b) InGaAs camera with diascopic illumination; (c) InGaAs camera with episcopic illumination; (d) IR laser confocal microscope

Radiation, IR) 是一个非常有力的工具, 因为(非高掺杂区域)硅对红外辐射是透明的, 使用时需注意硅的高折射率, 如图 7(d) 所示。另外, 硅及其上薄金属氧化物对 X 射线接近透明, 而周围的材料通常能相对较好地吸收 X 射线辐射, 分辨率低于 1 μm , 计算机断层扫描 (Computer Tomography, CT) 的功能可以进一步提高 X 射线系统的分析能力, 使更薄的细节可见。它难以检测到小颗粒, 但是机械断裂或粘结有可能通过 X 射线定位。

3.5 可靠性加固技术

为提高快反镜的可靠性, 密封封装在许多 MEMS 器件的封装中起着至关重要的作用。一方面, 整个封装过程可以被认为是微系统制造中性能、可靠性和成本最关键的部分。在过去的十年中, 封装工艺已经从管芯级转移到晶圆级, 以实现更小的封装尺寸, 提高器件性能, 降低封装成本。目前, 采用单一工艺同时实现对外电气连接和密封的要求越来越受到人们的重视。另一方面, 密封封装隔绝了外界的污染颗粒及水汽, 毫无疑问, 一个好的密封封装很大程度上规避了快反镜常见的失效模式, 如污染、粘附等。

美国 Mirrorcle Technologies 公司也为可靠性加固技术做出了许多尝试: Milanovic 等人介绍了一种新型流体封装, 其证明了 MEMS 快反镜在完全浸入和封装在介电液体中有利于扭矩增加、阻尼增加和光学增益增加, 从而可以显著提高性能。旋转静电梳状驱动器的扭矩乘以液体的相对介电常数约为 2.5。此外, 通过选择合适的流体粘度, 可以降低设备的品质因数, 并将结构阻尼调整到接近临界阻尼。最后, 由于流体的折射率约为 1.5~1.7, 扫描角度能够获得提高; 新型流体封装另一个优势在于: 封装体阻尼可显著增加快反镜的冲击和振动耐受性^[49]。Merz 等人研究并提出了几种包级的方法来增加机械阻尼、冲击鲁棒性和激光功率公差。通过在 MEMS 封装中添加结构, 以限制移动结构周围的气体流动; 用更高密度的气体代替充满空气(或 N_2) 的封装; 增加型腔封装内的压力。可以组合所有三种方法来创建高度优化的封装, 增加快反镜的散热能力来提高 MEMS 快反镜性能。进一步具体研究了使用不同气体以及不同(增加)压力的 MEMS 封装的回填, 以控制阻尼, 从而提高鲁棒性和可用带宽。此外, 研究了特殊机械结构的影响,

这些结构的设计和制造是为了修改包装, 以显著减少移动结构周围的空间体积^[50]。

为提高快反镜的可靠性, 在器件内加入某些新的结构或物质也是可靠性加固的有效方法。Lani 等人在进行对电磁驱动 FSM 的冲击可靠性研究时设计了一个抗震结构, 使得快反镜在面对 Z 轴的冲击从典型的耐受冲击抗力 278 g 增加至 976 g, 该装置在冲击事件中磁铁会与该结构接触并将其减速以避免螺旋弹簧变形太大^[35]。Gu-Stoppel 等人设计了一个 z-阻滞器(见图 8), 在致动器和底部晶片之间形成一个空腔, 其中底部作为致动器 Z 向运动空间, 只允许距离为 250 μm 的 Z 位移, 这使得致动器上的弹簧结构在 10 000 g 的冲击下所受应力从 20 GPa 减小至 2.5 GPa, 提升了快反镜的冲击可靠性^[51]。

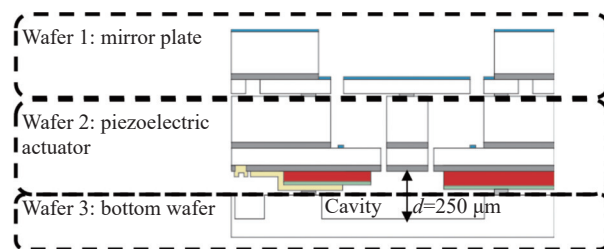


图 8 底层晶圆的加固结构^[51]

Fig.8 Z-stopper in bottom wafer^[51]

3.6 小结

为提升快反镜的可靠性, 有限元分析往往是在设计制造之初就要进行的工作, 它能够缩短开发周期并预见一些可能存在的问题。加速寿命试验对快反镜在轨运行提供合理的寿命评估, 同时寿命试验与可靠性环境测试中失效判据为快反镜的合格与否提供标准。对失效的快反镜进行有损或无损的检测是常用的失效分析方法, 它能够提供快反镜的失效机理并为可靠性加固与优化设计提供指导。

4 结论

文中研究了应用于卫星激光通信快反镜的可靠性技术及其发展趋势。机械振动与冲击、真空度、辐射及热冲击是快反镜应用于卫星激光通信过程中不可避免的环境应力, 试验前后应重点关注快反镜光学面型精度、光学反射效率和控制精度的变化情况。压电陶瓷驱动、音圈电机驱动及由静电、电磁及压电驱

动的 MEMS 是快反镜主要类别;可靠性评估方法通常包括有限元分析、加速寿命试验、失效分析方法;材料、结构、工艺及封装是决定快反镜可靠性的根本性因素,可靠性加固技术是提升快反镜可靠性的关键手段。

基于 MEMS 技术制备的快反镜具有小型化及批量化等优势,拥有极低的质量和体积、低功耗和与电子设备的紧密集成,在不牺牲功能的前提下减小航天器的体积和质量方面具有极大发展前景。综合分析可知晶圆级封装是 MEMS 快反镜封装的发展方向;另外,由于不同驱动方案,快反镜的可靠性问题有很大的不同,因此对于快反镜材料、结构与工艺的选择与研究十分重要,同时可靠性设计可能涉及到权衡,性能与可靠性的取舍可能是未来的讨论方向。

拥有自极化特征、性能稳定的 AlN 材料所制备的器件已经在航天领域得到充分地可靠性验证,同时压电致动的 MEMS 快反镜已经在非航天领域得到相应地可靠性验证,AlN 作为致动器的压电层大大提升了快反镜应用于卫星激光通信的可靠性;通过有限元分析可知,14.34 g_{rms} 随机振动与 500 g 冲击水平下中国科学院上海微系统所研制的快反镜最大应力分别为 7.3 MPa 与 0.12 GPa,远小于硅的屈服强度;该款快反镜已通过鉴定级正弦振动试验与 14.34 g_{rms} 量级的鉴定级随机振动试验;同时封装中适当的内部压力级的密封提高了 MEMS 组件的机械稳健性,并保护它们免受外界颗粒的影响,综上所述 MEMS 快反镜可以满足其卫星激光通信的要求,未来需要进一步航天可靠性验证。

参考文献:

- [1] Germann L M, Braccio J. Fine-steering mirror technology supports 10 nanoradian systems [J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(11): 1351-1359.
- [2] Wassom S R. Low-cost large-angle steering mirror development[C]//Advances in Optomechanics, SPIE, 2009, 7424: 153-164.
- [3] Csencsics E, Schlarp J, Schopf T, et al. Compact high performance hybrid reluctance actuated fast steering mirror system [J]. *Mechatronics*, 2019, 62: 102251.
- [4] Douglass M R. Lifetime estimates and unique failure mechanisms of the digital micromirror device (DMD)[C]//1998 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings, 36th Annual (Cat. No. 98CH36173), IEEE, 1998: 9-16.
- [5] Hofmann U, Janes J, Quenzer H J. High-Q MEMS resonators for laser beam scanning displays [J]. *Micromachines*, 2012, 3(2): 509-528.
- [6] Jacobs S J, Miller S A, Malone J J, et al. Hermeticity and stiction in MEMS packaging[C]//2002 IEEE International Reliability Physics Symposium. Proceedings, 40th Annual (Cat. No. 02CH37320), IEEE, 2002: 136-139.
- [7] Muhlstein C L, Stach E A, Ritchie R O. Mechanism of fatigue in micron-scale films of polycrystalline silicon for microelectromechanical systems [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(9): 1532-1534.
- [8] Muhlstein C L, Brown S B, Ritchie R O. High-cycle fatigue of single-crystal silicon thin films [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, 10(4): 593-600.
- [9] Shea H R. Reliability of MEMS for space applications[C]//Reliability, Packaging, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS V, SPIE, 2006, 6111: 84-93.
- [10] Gasparyan A, Shea H, Arney S, et al. Drift-free, 1 000 g mechanical shock tolerant single-crystal silicon two-axis MEMS tilting mirrors in a 1 000×1 000-port optical crossconnect[C]//Optical Fiber Communication Conference. Optica Publishing Group, 2003: PD36.
- [11] Wang Peixia, Jia Yuqin. Comparative research on linear oscillator in the critical damping and over damping states [J]. *Physics and Engineering*, 2011, 21(2): 11-14. (in Chinese)
- [12] Wallash A J, Levit L. Electrical breakdown and ESD phenomena for devices with nanometer-to-micron gaps[C]//Reliability, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS II, SPIE, 2003, 4980: 87-96.
- [13] Shea H R, Gasparyan A, Chan H B, et al. Effects of electrical leakage currents on MEMS reliability and performance [J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2004, 4(2): 198-207.
- [14] Miner A, Milanovic V. High temperature operation of gimball-less two axis micromirrors[C]//2007 IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, IEEE, 2007: 91-92.
- [15] Yu Siyuan. Satellite Light Communication Aiming Capture Tracking Technology [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [16] Toegemann Y. Steering toward the future: the use of piezo technology for optical intersatellite communication [J]. *IEEE*

- Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2022, 37(9): 54-57.
- [17] Wang Zhen, Cheng Xuemin. Research progress and development trend of fast steering mirror [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(3): 373-379. (in Chinese)
- [18] Lv Shiliang, Liu Jinguo, Zhou Huaide, et al. Design of control system for fast steering mirror of infrared detector based on satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0904005. (in Chinese)
- [19] Xu X, Wang B, Han X. Fast-steering mirror with self-aligning ball bearing supporting structure[C]//6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Design, Manufacturing, and Testing of Smart Structures, Micro-and Nano-Optical Devices, and Systems. SPIE, 2012, 8418: 109-116.
- [20] Zhang Dawei, Feng Xiaomei. The technical principle of voice-coil actuator [J]. *Journal of North University of China(Natural Science Edition)*, 2006, 27(3): 224-228. (in Chinese)
- [21] Zhao Lei, Ji Ming, Wang Jia, et al. Design and simulation of fast steering mirrors connected by universal flexure hinges [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 0218002. (in Chinese)
- [22] Dong Meixiang. Research on operating life characteristics of fast steering mirror in satellite optical communication[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [23] Shin D C, Kim T G, Kim D W. Influence of cyclical electric load on crack growth in piezoelectric ceramics under a constant mechanical load [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2020, 34: 1623-1628.
- [24] Sherrit S, Bao X, Jones C M, et al. Piezoelectric multilayer actuator life test [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2011, 58(4): 820-828.
- [25] Wiens R C, Maurice S, Robinson S H, et al. The SuperCam instrument suite on the NASA Mars 2020 rover: Body unit and combined system tests [J]. *Space Science Reviews*, 2021, 217: 1-87.
- [26] Anderson R B, Forni O, Cousin A, et al. Post-landing major element quantification using SuperCam laser induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2022, 188: 106347.
- [27] Gui Xiaoyi, Li Weipeng, Zhen Xintao, et al. Composite control of fast steering mirror based on MEMS accelerometer [J]. *Aerospace Control*, 2018, 36(2): 30-36. (in Chinese)
- [28] Gall K, Dunn M L, Zhang Y, et al. Thermal cycling response of layered gold/polysilicon MEMS structures [J]. *Mechanics of Materials*, 2004, 36(1-2): 45-55.
- [29] Liu Jiakai, Qi Xinglin, Wang Bo. Influence law of thermal stress on the delamination of MEMS components [J]. *Electronic Components And Materials*, 2013, 32(3): 84-87. (in Chinese)
- [30] 南京英田光学工程股份有限公司. 基于MEMS光束控制的小卫星平台激光通信终端: CN 112636815B[P]. 2021-06-04.
- [31] 南京英田光学工程股份有限公司. 基于立方星平台的超小型激光通信终端: CN 215344577 U[P]. 2021-06-07.
- [32] Miner A, Milanovic V. High temperature operation of gimbal-less two axis micromirrors[C]//2007 IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics. IEEE, 2007: 91-92.
- [33] Qiao Dayong, Shi Longfei, Cao Yanyu, et al. Temperature reliability test of MEMS scanning mirror [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2014, 33(12): 146-148. (in Chinese)
- [34] Cao Lanyu. The reliability and failure study of MEMS scanning mirror[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016. (in Chinese)
- [35] Lani S, Marozau Y, Dadras M. Reliability evaluation of a MEMS scanner[C]//MOEMS and Miniaturized Systems XVI, SPIE, 2017, 10116: 33-43.
- [36] Bevilacqua M F, Casuscelli V, Costantini S, et al. High temperature operating lifetime test on piezo-MEMS devices[C]//2021 IEEE 6th International Forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI), IEEE, 2021: 452-456.
- [37] Yu Zihao, Wang Lihao, Wang Yang, et al. Research progress of fast steering mirror for satellite laser communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(15): 1500003. (in Chinese)
- [38] Xu Tianzi, Xin Hongwei, He Xin. Random vibration fatigue analysis for mirror component of space camera [J]. *Optical Technique*, 2013(6): 549-552. (in Chinese)
- [39] Fang X Y, Li X Y, Hu K M, et al. Destructive reliability analysis of electromagnetic MEMS micromirror under vibration environment[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 28(5): 1-8.
- [40] Fang X Y, Hu K M, Yan G, et al. Shock destructive reliability analysis of electromagnetic mems micromirror for automotive LiDAR [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2021, 31(1): 134-142.
- [41] Stark B. MEMS reliability assurance guidelines for space applications[R]. California, United States: NASA Pasadena Jet Propulsion Laboratory, 1999.
- [42] Zhang Chunhua, Wen Xisen, Chen Xun. Accelerated life testing: an introductory review [J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(4):

- 485-490. (in Chinese)
- [43] Zhao Yu, Yang Jun, Ma Xiaobing. Reliability Data Analysis Tutorial[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2009: 171-172. (in Chinese)
- [44] Hartzell A L, da Silva M G, Shea H R. MEMS Reliability[M]. En Yunfei, Jia Yubin, Huang Qinwen, translated. Beijing: Electronic Industry Press, 2012: 14 -15. (in Chinese)
- [45] Mao Shisong, Wang Lingling. Accelerated Life Test [M]. Beijing: Science Press, 1997: 11-14. (in Chinese)
- [46] Hugi S, Maillard T, Baillus A, et al. Fine steering mirror based on piezo actuators: a point ahead mechanism (PAM30) for deep space optical communication module of the psyche mission[C]// International Conference on Space Optics—ICSO 2020, SPIE, 2021, 11852: 2329-2343.
- [47] Tan H, Moyal E, Yap H H, et al. A controlled, mechanical method for MEMS decapsulation[C]//2017 IEEE 24th International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA), IEEE, 2017: 1-4.
- [48] Application example: Physical failure analysis in a MEMS motion sensor: 1 mm-wide crosssection performed with the TESCAN S8000 X[EB/OL]. (2022-12-15)[2023-03-30]. <https://www.tescan.com/redefining-large-area-fib-crosssectioning-with-the-new-tescan-s8000-x-plasma-fib-sem/>.
- [49] Milanovic V, Kasturi A, Yang J. Novel fluidic packaging of gimbal-less MEMS mirrors for increased optical resolution and overall performance[C]//Micro-and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications VIII. SPIE, 2016, 9836: 560-571.
- [50] Merz P, Quenzer H J, Bernt H, et al. A novel micromachining technology for structuring borosilicate glass substrates[C]// Transducers'03 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Digest of Technical Papers (Cat. No. 03 TH8664), IEEE, 2003, 1: 258-261.
- [51] Gu-Stoppel S, Senger F, Wen L, et al. A design and manufacturing platform for AlScN based highly linear quasi-static MEMS mirrors with large optical apertures[C]//MOEMS and Miniaturized Systems XX, SPIE, 2021, 11697: 106-115.

Research progress of reliability of MEMS fast steering mirror for satellite laser communication

Zhu Weihong^{1,2,3}, Wang Yang^{2,4}, Wang Lihao^{2,3}, Liu Yichen^{2,3}, Wu Zhenyu^{1,2,3,4*}

(1. School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

3. Shanghai Industrial Technology Research Institute, Shanghai 201800, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract:

Significance Fast steering mirror (FSM) is widely utilized in satellite laser communication, super-resolution imaging, high-precision laser aiming and other fields for its quick response, high precision and high resolution. The acquisition tracking and pointing (ATP) system relies heavily on FSM. The main challenge of satellite laser communication is the extremely precise beam stabilization and pointing for maintaining laser communication between moving satellites. In order to overcome this problem, satellite laser communication terminals must rely on the tilt mirror device called FSM to guide and stabilize these laser beams. Traditional FSM is primarily driven by piezoelectric ceramics and voice coil motors. However, thanks to the disadvantages of size and weight of traditional FSM, FSM based on micro electro mechanical system (MEMS) technology is becoming the perfect solution. There are three types of MEMS FSM with electrostatic, electromagnetic and piezoelectric driver. Besides fulfilling the deflection and speed requirements for steering the communication beams, FSM on satellite must also fulfill rigorous space qualification requirements. It is worth mentioning that the reliability of MEMS FSM as novel device applied to satellite laser communications urgently needs further research, but there is less

comprehensive research work on this topic.

Progress There is no universal rule for what it means to be "space qualified", so the reliability environmental tests and standards need specify individually space qualification tests and protocols for FSM used in satellite laser communication. It includes vibration and shock test, vacuum test, radiation tolerance and thermal test. These tests address the main environmental stresses on systems during launching and operation in space. Fine aiming and advance targeting are the main roles of FSM in space laser communication terminals. Therefore, FSM not only needs to pass the above environmental tests, but also should pay attention to the changes in the optical characteristics before and after the test, such as optical surface flatness, optical reflectivity and control accuracy. Traditional FSM driven by piezoelectric ceramics (Fig.1) and voice coil motors has already withstood many performances and reliability testing for tip-tilt systems used in laser intersatellite communication. It is relatively mature and has already been working on track. However, MEMS FSM driven by electrostatic (Fig.2), electromagnetic (Fig.3) and piezoelectric (Fig.4) has advantages (Tab.1) of highly integrated, low power consumption and miniaturization, and is a very promising approach in the future. Actuators based on AlN material with self-polarizing characteristics and stable performance have been fully verified in the aerospace field, and the piezoelectric actuated MEMS FSM has been also verified in the non-space field. Finite element analysis (Fig.5) is often performed at the beginning of the design and manufacturing process to study the reliability of FSM, which can shorten the development cycle and anticipate some potential problems. Accelerated life tests with accelerating factors (Tab.2) provide a reasonable lifetime assessment of FSM in orbit, while failure criteria (Tab.2) in life tests and reliability environment tests provide verification for the qualification of FSM. The failure analysis method (Fig.6-7) is commonly used to inspect the failed FSM with or without damage, which can provide the failure mechanism of FSM and guide the reliability reinforcement and design optimization (Fig.8).

Conclusions and Prospects The working principle, environmental adaptability and the reliability requirements of FSM are introduced in this study. The failure mechanism, evaluation method and reliability reinforcement methods of the existing FSM based on different actuation principles and structures are also reviewed. Finally, the improvement of the construction and reinforcing technology of MEMS FSM is discussed and the application for satellite laser communication is proved to be viable, through comprehensive analysis and simulation. In summary, the MEMS FSM can meet most requirements of satellite laser communication, and further verification of aerospace reliability is needed in the future.

Key words: satellite laser communication; fast steering mirror; micro electro mechanical system; environmental adaptability; reliability

Funding projects: Research and Development Project of Scientific Research Instruments and Equipment of the Chinese Academy of Sciences (YJKYYQ20190026); Shanghai Industrial Coordinated Innovation Project (HCXBCY-201-044)