

文章编号: 2095-4980(2021)01-0162-05

微机电系统加速度计辐射效应

刘珉强, 杜川华*, 许蔚, 朱小锋, 许献国

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 综述了微机电系统(MEMS)加速度计辐照效应与辐照机理国内外现状, 阐释了其加固技术研究的必要性。介绍了不同类型 MEMS 加速度计的辐射敏感性及材料的辐射退化机理、不同材料的辐射损伤表现及硅材料的辐射效应; 重点分析了 MEMS 加速度计国内外辐照试验研究, 最后给出了 MEMS 加速度计辐射加固研究方向的建议。

关键词: 微机电系统加速度计; 辐射效应; 辐射加固

中图分类号: TN307

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019399

MEMS accelerator and its radiation effects

LIU Minqiang, DU Chuanhua*, XU Wei, ZHU Xiaofeng, XU Xianguo

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

Abstract: Radiation effects and radiation mechanism of Micro Electromechanical Systems(MEMS) accelerator are summarized, which indicates the importance of MEMS radiation effect and hardening techniques study. The radiation sensitivities of different types of MEMS accelerator are introduced, as well as the degradation mechanism of radiation effects, radiation damage of different materials and Si radiation effect. The international radiation experiments about MEMS accelerator are emphatically analyzed, and the trends of radiation hardness of MEMS accelerator are put forward.

Keywords: Micro Electromechanical Systems accelerator; radiation effects; radiation hardness

随着 MEMS 技术的不断成熟, 以及电子学系统发展对器件小型化的要求, 作为 MEMS 技术的重要分支, MEMS 加速度计已成为惯性器件小型化的主要方向。当 MEMS 加速度计在恶劣空间辐射环境工作时, 会导致加速度计性能劣化, 甚至故障(失效)。通常认为电子学系统对辐射敏感, 实际上有些由电场控制机械运动的器件和材料受辐照易改性的器件对辐射也很敏感^[1]。因此, 为确保 MEMS 加速度计的安全、可靠和有效, 有必要开展其辐射效应和损伤机理研究。

国外在 MEMS 加速度计的辐射效应和辐射机理方面开展了大量的工作, 美国 Sandia 国家实验室于 2014 年开展了一项为期 3 年的 MEMS 微加速度计抗辐照加固研究, 结果表明: “现在商用 MEMS 加速度计无法满足抗辐照加固的需求, 而器件在辐照条件下失效的根本原因现在还不太明确, 想要从本质上提升微加速度计的抗辐照能力, 必须深入理解 MEMS 加速度计的内部材料级效应, 包括绝缘层充电效应和位移损伤效应, 在此基础上, 最终设计出一款具有抗辐射性能的 MEMS 加速度计”。

国内 MEMS 器件的抗辐射加固研究仍处于辐射效应和损伤机理研究阶段, 亟需进行 MEMS 加速度计辐射损伤机理和加固技术系统研究, 提高其在辐射环境下工作的可靠性, 以满足工程应用迫切需求。

本文总结了不同类型 MEMS 加速度计的辐射敏感性, 介绍了材料的辐射损伤机理与辐射对 MEMS 制备材料硅的影响, 最后对 MEMS 加速度计国内外辐照试验结果进行了总结, 着重对 MEMS 加速度计 ADXL150 的损伤机理进行了分析, 并给出 MEMS 加速度计表头抗辐射加固建议。

收稿日期: 2019-10-16; 修回日期: 2019-12-02

基金项目: 国家级预先研究基金资助项目(6140A24020105; 6140A24030311)

作者简介: 刘珉强(1992-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为核技术及应用。email:931998724@qq.com

*通信作者: 杜川华 email:chhdu@sina.com

1 MEMS 加速度计的应用及辐射敏感性

由于驱动原理(静电电容、电磁、压阻/压电、电热、光学敏感)和制备材料(硅、陶瓷/玻璃、金属、光刻胶、橡胶硅)的选择很多^[2],导致 MEMS 加速度计多种多样,表 1 总结了不同 MEMS 加速度计的辐射敏感性。表中“+”代表辐射抗性;“-”代表辐射敏感性。

表 1 MEMS 加速度计分类及其辐射效应敏感性
Table1 Classification of MEMS accelerometers and their sensitivity to radiation effects

material	physical principle				
	capacitive(electrostatic)	electromagnetic	piezoresistive/piezoelectric	electrothermal	optical sensing
Si	Non-Ionizing Energy Loss(NIEL): ++	NIEL: ++	NIEL: +	NIEL: ++	NIEL: ++
	Ionizing: --	Ionizing: ++	Ionizing: -	Ionizing: ++	Ionizing: ++
class/ceramics	NIEL: ++	NIEL: ++	NIEL: +	NIEL: ++	NIEL: +
	Ionizing: --	Ionizing: ++	Ionizing: -	Ionizing: ++	Ionizing: ++
metal	NIEL: ++	NIEL: ++	NIEL: +	NIEL: ++	NIEL: ++
	Ionizing: --	Ionizing: ++	Ionizing: -	Ionizing: ++	Ionizing: ++
SU-8	NIEL: +	NIEL: +	NIEL: +	NIEL: +	NIEL: +
	Ionizing: --	Ionizing: ++	Ionizing: -	Ionizing: ++	Ionizing: ++
silicon rubber	NIEL: -	NIEL: -	NIEL: -	NIEL: -	NIEL: -
	Ionizing: --	Ionizing: +	Ionizing: -	Ionizing: +	Ionizing: +

2 材料的辐射损伤机理

2.1 材料的辐射退化过程

材料在高能粒子的照射下会引起损伤,高能粒子的能量损伤机制非常复杂,但从结果上进行分类,可分为:原子位移(由于碰撞,材料原子发生移动)和电离(产生电子-一空穴对)。图 1 阐释了不同粒子辐射导致电子元器件损伤类型,大多数粒子既产生非电离能损,又产生电离能损。

非电离能损:高能粒子(或能量足够高的光子)与原子碰撞,将能量传递给原子,致使在晶格中处于平衡态的原子发生位移,产生空位或缺陷(又称位移损伤),如图 2 所示。

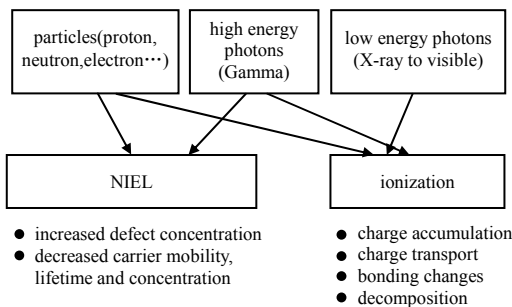


Fig.1 Radiation effects of materials
图 1 材料的辐射效应

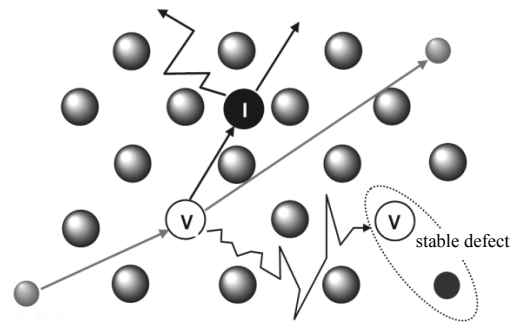


Fig.2 Diagram of displacement damage
图 2 位移损伤示意图

电离能损:粒子与物质相互作用,将能量传递给原子核外电子,使其摆脱原子核的束缚,产生电子-一空穴对。电子和空穴都可以增加介质的导电性(甚至是绝缘体),但由于电子与空穴的迁移率不同,空穴在绝缘体中被俘获,使电子元器件退化,且此过程存在累积效应。此外需注意,偏压不同,最终的辐射效应会有区别。

2.2 不同材料的辐射损伤效应

根据材料的导电性能不同,可以将材料分为金属、半导体和绝缘体,这些材料的辐射损伤表现不同^[3]:

- 1) 金属在太空环境中可被认为具有耐辐射性,而在核反应堆的堆芯,足够高的中子通量显著减小金属的机械强度,使金属变得易碎;
- 2) 位移损伤会使半导体的电参数和机械性能发生变化,电参数的变化具体表现在少数载流子寿命的减少、纯掺杂浓度 n 变小和载流子迁移率降低;
- 3) 位移损伤会使光学绝缘体材料产生损伤,对电学或结构绝缘体材料影响很小,电离效应会急剧减小绝缘体电阻、累积陷阱电荷。

2.3 硅材料的辐射效应

2003 年, Clark L Alfred 的研究成果表明: 辐照后硅的密度没有明显变化^[4]。此外, 由于硅的弹性模量是影响 MEMS 加速度计的重要参数, Alfred 采用模拟分析的方法, 对尺寸为 800 μm×40 μm×10 μm 的共振梁器件进行了中子辐照对硅弹性模量影响的研究, 结果如表 2 所示。从表中可以看出, γ 射线的辐照对硅材料弹性系数没有影响, 而中子辐照会对硅材料弹性系数造成一定的影响, 但这种影响很小。

表 2 辐射对硅材料力学性能的影响

Table2 Radiation effects on mechanical properties of silicon materials

neutron(1 MeV,1×10 ¹⁴ n/cm ²)		γ-ray(1 Mrad)
Δl/l(modulus of elasticity)	ΔE/E(stress)	Δl/l
2.5×10 ⁻⁸	-0.15×10 ⁻⁶ -5×10 ⁻⁶	about 0

3 MEMS 加速度计的辐照试验研究

3.1 辐射效应试验

国外公开 MEMS 器件辐射测试结果总结^[5-11]如表 3 所示: 钴源辐照的 MEMS 加速度计其失效机理均为绝缘层充电效应, 失效剂量阈值均在 200 Gy(Si)以上; 65 MeV 质子辐照失效的机理为绝缘层充电效应, 但 155 MeV 质子的辐照失效机理为基准电路的质子位移损伤。

表 3 国外 MEMS 器件的辐射测试数据

Table3 Radiation test data of MEMS devices abroad

MEMS device	actuation type	mininum dose for failure	radiation type	failure mode
ADXL 150 ^[5]	electrostatic (comb-drive)	27 krad(Si)	Co-60	not investigated
ADXL 150 ^[5]	electrostatic (comb-drive)	no failures seen	infrared laser,5.5 nJ(SEE)	not investigated
ADXL 50 ^[6]	electrostatic (comb-drive)	25 krad(Si)	Co-60	dielectric charging in device
ADXL 50 ^[6]	electrostatic (comb-drive)	>50 krad(Si)	SEM localized e-beam 30 keV	dielectric charging in device
ADXL 50 ^[6]	electrostatic (comb-drive)	100 krad(Si)	5.5 MeV protons	dielectric charging in device
ADXL 50 ^[6]	electrostatic (comb-drive)	100 krad(Si)	155 MeV protons	proton displacement in reference circuit
ADXL 150 ^[7-8]	electrostatic (comb-drive)	20 krad(Si)	65 MeV protons and heavy ions	dielectric charging in device
Colibrays accelerometer ^[6]	electrostatic (sandwich-drive)	4-8 krad	protons at 200,150,100, and 60 MeV	test with control electronics
Sercalo 1×2 optical switch ^[9]	electrostatic (comb-drive)	>22.5 krad (Si)	Co-60	no failures seen
Boston micromachines CoPoly-Si micromirrors array ^[10]	electrostatic (parallel-plate)	3 Mrad (Si)	Co-60	no failures seen
Rockwell Scientific Co RF switch ^[11]	electrostatic (parallel-plate)	30 krad(GaAs)	Co-60	dielectric charging in device(strongly geometry dependent)

国内对梳齿式微加速度计实验室样品进行过质子辐照试验: 试验时用厚金箔挡住 ASIC(Application-Specific Integrated Circuit)电路, 只照射 MEMS 部分, 辐照采用 3 MeV 的质子, 辐照注量率为 1.39 × 10⁹ p·cm⁻²·s⁻¹, 结果如图 3 所示, 加速度计 1 在注量达到 2.9 × 10¹² p/cm² 时发生跳变, 而加速度计 2 在注量达到 1.08 × 10¹² p/cm² 时就开始发生漂移。分析结论为: 加速度计性能劣化源于表头中的绝缘层充电效应, 加速度计中硅梳齿电容的电荷累积改变了介质的介电常数, 甚至影响到梳齿电容的电场分布, 而加速度计基于电荷放大器原理进行检测, 因此介电常数或电场分布的改变都会导致零偏发生突变或渐变。

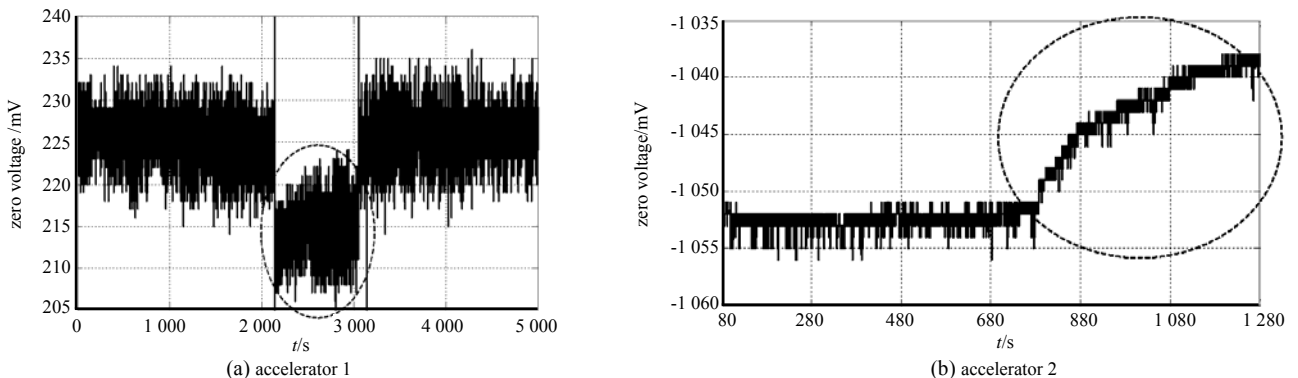


Fig.3 Proton irradiation test results of comb-drive microaccelerometer

图 3 梳齿式微加速度计质子辐照试验结果

对样品梳齿式加速度计、跷跷板加速度计进行过整表钴源辐照试验，辐照剂量率为 0.04 Gy(Si)/s，辐照全程加电，记录结果如图 4 所示。跷跷板式加速度计在 88 Gy 左右开始急剧跳变，梳齿式加速度计在 96 Gy 左右开始急剧跳变，分析结论为：加速度计急剧跳变主要由体硅 CMOS 检测电路性能劣化甚至失效引起；急剧跳变前，两种结构的加速度计的零位漂移主要由表头结构的绝缘层充电效应引起。

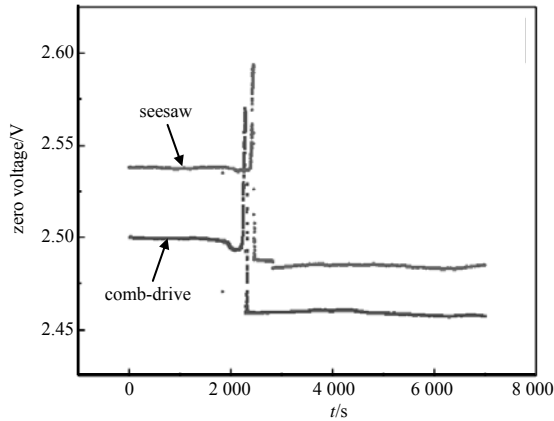


Fig.4 Radiation test results of seesaw and comb types microaccelerometer
图 4 跷跷板式与梳齿式微加速度计辐照试验结果

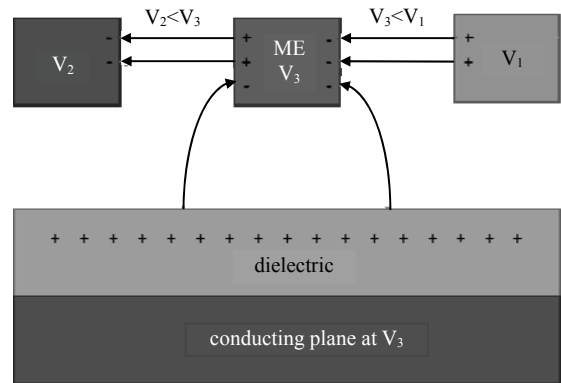


Fig.5 Radiation degradation principle of the comb-drive microaccelerometer
图 5 梳齿式微加速度计辐照退化原理

3.2 辐射效应机理分析

1996 年~1998 年，美国 ADI 公司对表面梳齿式微加速度计进行了一系列的辐照试验，分析认为其退化机理^[4,6,8]为多晶硅梳齿下面的绝缘层存在充电效应，如图 5 所示：辐射在绝缘体中产生电子空穴对，形成正电荷累积，绝缘层电荷在可移动质量块(Movable Electrode, ME)的两侧分别感应出负电荷，导致质量块与两端固定极板之间的电场发生改变，引起质量块移动，最终导致传感器的输出电压发生偏移。A R Knudson 等^[6]证明，质子辐照 ADXL50 微加速度计时，输出电压将产生一个漂移误差，并且指出是绝缘层充电效应导致输出电压漂移。绝缘层中的俘获电荷改变了微加速度计敏感芯片内部的电场，若已知绝缘层俘获电荷面密度，敏感芯片内部结构参数已知，则可以利用 ANSYS 计算出附加的静电力，从而得到辐射效应引起的加速度变化^[1]。

3.3 辐射效应加固的建议

由于 MEMS 加速度计存在绝缘层的充电效应，其绝缘层中的电荷累积会生成感生电场，进而影响梳齿电容的电场分布，从而引起辐射加速度（辐射引入的加速度变量），致使 MEMS 加速度计输出发生漂移，所以抑制 MEMS 加速度计的辐射加速度可以从以下几方面考虑：

- 1) 从结构上，可以改变几何设计，移除可移动极板附近的绝缘体或加大绝缘体与极板之间的距离；
- 2) 从电荷导出角度，可以在绝缘体上接入导体，从而达到绝缘体累积电荷消除的效果^[8,12]；
- 3) 从材料特性角度，可以改用正电荷俘获密度更低的绝缘体材料。

4 结论

通过上文分析，得出以下认识：

- 1) MEMS 加速度计表头在钴源或质子等辐照下失效机理为绝缘层存在充电效应，产生的正电荷积累影响了加速度计内部电场，随着正电荷的不断积累，最终完全失效；
- 2) MEMS 加速度计总剂量辐照薄弱环节在于体硅 CMOS 工艺检测电路；
- 3) 现阶段的研究成果表明：中子辐照对硅材料的弹性系数影响极小，即 MEMS 加速度计耐中子辐照；
- 4) 针对 MEMS 加速度计的绝缘层充电效应，加固建议为：改变几何设计，导出绝缘层氧化物中电荷或采用低电荷俘获密度绝缘体材料。

参考文献：

[1] 郑英彬. MEMS 器件的辐射效应[R]. 绵阳,四川:中国工程物理研究院电子工程研究所, 2007. (ZHENG Yingbin. Radiation effects of MEMS devices[R]. Mianyang,Sichuan,China:Institute of Electronic Engineering of CAEP, 2007.)