材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.01.011

面向 Micro-IMU 的 MEMS 三维可折叠系统的设计与研制

李志伟[1,2]，张卫平[1,2*]，谷留涛[1,2]

（上海交通大学 1. 微米/纳米加工技术国家级重点实验室；2. 电子信息与电气工程学院，上海 200240）

摘　要： 提出了一种面向微惯性测量单元(Micro-IMU)应用的微电子机械系统(MEMS)三维可折叠结构，其主要组成部分包括绝缘层上硅(SOI)基底、聚酰亚胺柔性链、金属线以及MEMS多环陀螺仪。文章基于有限元仿真技术，分析了可折叠结构及器件的可行性。基于SOI一体化MEMS技术，将核心传感器的制作工艺与折叠结构工艺相结合，在结构中搭载单轴圆盘多环谐振微陀螺，利用柔性铰链实现结构的三维折叠以及各个传感器之间的电互连，实现单轴惯性传感器的集成，制备出体积为1 cm^3、质量为250 mg的搭载多环谐振微陀螺的三维可折叠系统。

关键词： 微惯性测量单元；折叠MEMS；SOI；聚酰亚胺；圆盘谐振陀螺

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2021)01－0061－05

Design and Fabrication of 3D MEMS Foldable System for Micro-IMU

LI Zhiwei[1,2], ZHANG Weiping[1,2], GU Liutao[1,2]

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Micro/Nano Fabrication;
2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, CHN)

Abstract: A 3D micro-electromechanical systems (MEMS) foldable structure for Micro-IMU application is proposed, which is composed of SOI substrate, polyimide flexible chain, metal wires and MEMS multi-ring gyroscope. In this paper, the feasibility of foldable structure and sensors is analyzed based on finite element method. Based on SOI integrated MEMS technology, the fabrication process of core sensor and foldable structure technology are integrated. The structure is equipped with a single-axis disk multi-ring MEMS gyroscope, and the flexible hinge is used to realize the 3D folding of the structure and the electrical interconnection between the sensors. A 3D foldable system with a volume of 1 cm^3 and a mass of 250 mg was fabricated.

Key words: micro IMU; folded MEMS; SOI; polyimide; DRG

0　引言

惯性导航系统利用惯性传感器来实现对物体位置和运动的检测，主要包括陀螺仪和加速度计。早期惯性导航系统的应用通常局限于航空航天、国防和空间探索等领域，但是目前已在手机、笔记本电脑、智能手表等消费电子产品中广泛使用。为了完整检测物体的运动，惯性导航系统必须沿三个轴测量旋转和线性加速度，这需要一个六轴惯性测量单元(IMU)。由于有导航需求的便携式设备的数量不断增加，对IMU微型化的要求也越来越高，微惯性测量单元(Micro-IMU)成为了研究热点[1-4]。

目前用于减小惯性导航系统整体尺寸的方法大

收稿日期：2020－11－26.

基金项目：国家重点实验室基金项目(614280504010317)；上海专业技术服务平台项目(19DZ2290103).

* **通信作者：**张卫平　**E-mail:** zhangwp@sjtu.edu.cn

致可分为三种。第一种是多个单轴传感器的印刷电路板(PCB)模块的集成,这种方法可以制备高性能单轴传感器,但进一步缩小尺寸非常困难。第二种方法是在一块基底上制造多轴传感器,这种方法可以实现器件的微型化,但是多轴传感器往往比较复杂,工艺难度较大,同时不同敏感轴之间存在信号的串扰,信号解耦存在较大难度。第三种方法是利用芯片堆叠来制备惯性导航系统,这种方法可以实现器件的多层集成,有效减小器件尺寸,但也存在缺陷:整个集成系统的温度稳定性很大程度上依赖于系统的散热,由于叠层中存在多个器件单元,从顶部到底部的导热性将非常差,并会导致每个模具中的热差异,同时由于系统底部互连的密度大,信号之间会产生电串扰[5-9]。

本文提出了一种利用三维折叠实现惯性传感器集成的结构设计和工艺流程方案。多个单轴的高性能惯性传感器在晶圆上实现平面内的制作,而后通过折叠组装为三维立方体结构。这种方法在不影响器件性能的前提下实现了器件的微型化集成,缩小了系统的尺寸。系统采用一体化集成 MEMS 工艺完成制备,对多个传感器和折叠结构平行加工,缩短了工艺流程,减少了工艺误差。

1 结构设计

本文所设计的面向 Micro-IMU 的 MEMS 陀螺三维可折叠系统的展开结构如图 1 所示,该结构主要包含六个互相分立的 SOI 基底,在其中五个基底上分别放置一个圆盘多环谐振微陀螺,六个分立的 SOI 基底通过聚酰亚胺柔性链相互连接,聚酰亚胺柔性链上排布有金属线。由于陀螺器件的特征尺寸较小,考虑到高深宽比刻蚀的问题,器件不宜太厚,采用 SOI 的 device 层作为 MEMS 陀螺的结构层较为合适,同时 SOI 的 handle 层硅具有良好的机械性能,其杨氏模量和密度的比值远高于其他常用结构材料,可以为整个结构提供机械支撑,六个 SOI 基底的大小均为 1 cm×1 cm。为了保证折叠完成后结构的稳定性,在基底的周围分布有叉指状的机械闩锁,这些闩锁会在折叠时相互套卡从而对折叠结构进行固定。为进一步增强稳定性,可以用粘接剂或者采用焊接闩锁的方式实现各个基底的固定。

本文中,可折叠结构搭载的惯性传感器为平面圆盘多环谐振式微陀螺。圆盘多环谐振陀螺由于具有高度对称性、灵敏度高、抗冲击性能好等优点而成为微机械陀螺领域的研究热点[10]。本文所设计的圆盘多环谐振微陀螺环与环之间通过均匀排布的辐条连接,辐条交错排布,可降低结构刚度,最内圈环与中心锚点相连接,中心锚点固定于基底之上,最外圈环的外围分布着电极。通过监测最外圈环与电极之间的电容变化来进行角速度信号的检测。

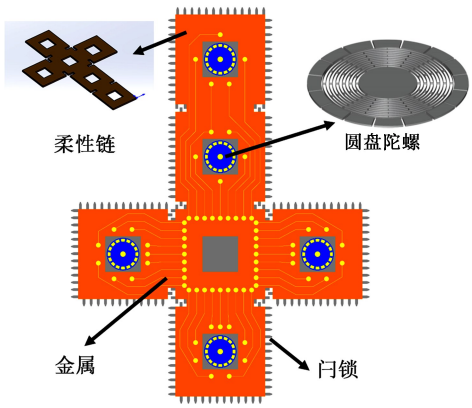
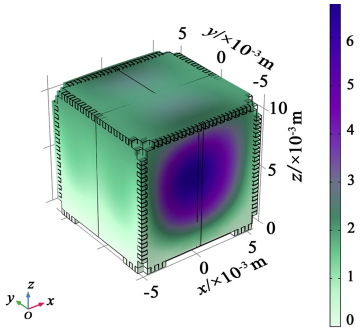


图 1 三维可折叠系统展开结构图

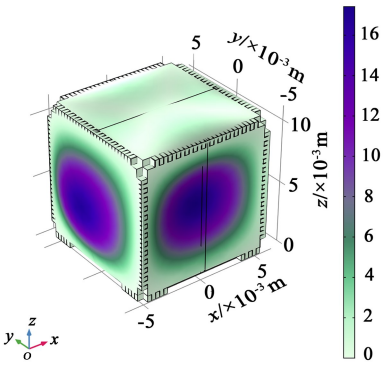
聚酰亚胺柔性铰链将六个分立基底连接,聚酰亚胺稳定结合在基底上,并依靠其良好的柔性实现了结构从二维平面到三维空间的折叠。在每个基底的中心位置,预留有 4 mm×4 mm 的器件区域,这部分区域 SOI 的 device 层硅裸露出来,同时,由于聚酰亚胺有良好的绝缘性,将金属导线分布于聚酰亚胺之上,可以实现各个基底之间的电信号互连,金属导线的宽度设计为 100 μm,焊盘直径为 250 μm。所有金属线一端延伸至靠近各个基底器件区域的圆形焊盘,一端延伸至同一个基底,以便于最终将所有电信号线集中引出进行倒装焊封装。

2 仿真分析

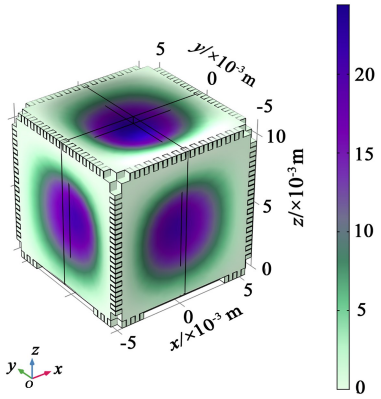
为进一步验证结构的稳定性,本文利用 Solidworks 软件对可折叠结构进行了建模,利用 COMSOL 有限元仿真软件对折叠结构进行了模态分



(a) 一阶模态,43 kHz



（b）　二阶模态，46 kHz

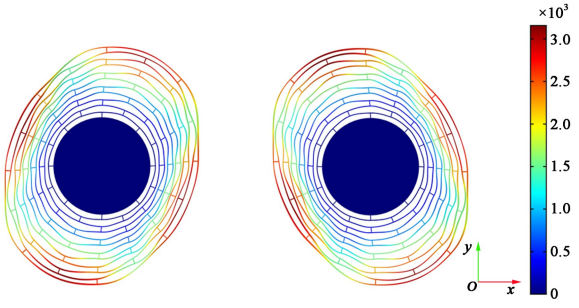


（c）　三阶模态，64 kHz

图 2　折叠结构的有限元模态仿真

析。折叠结构前三阶振动模态的振型如图 2 所示。有限元仿真分析结果表明，第一、二、三阶振动模态的频率分别约为 43，46 和 64 kHz，而 Micro-IMU 一般适用场景的环境噪音振动频率约为 10 kHz，因此一般的工作场景不会使折叠立方体达到其固有频率而破坏结构。

为了保证折叠结构所搭载的 MEMS 多环陀螺仪正常工作，本文还进行了多环陀螺的有限元仿真，多环谐振子的四波腹振动模态如图 3 所示。根据有限元仿真结果，多环陀螺的工作频率为 22.1 kHz，与折叠结构的固有频率相差较大，不会产生干扰。



（a）　驱动模态　　（b）　检测模态

图 3　多环陀螺的四波腹振型仿真结果

3　MEMS 工艺设计及制备

本文采用基于 SOI 片的 MEMS 加工工艺来制备可折叠结构。选用的 SOI 片尺寸为 10.16 cm（4 inch），包括 40 μm 厚的硼掺杂 p 型 device 层、2 μm 厚的二氧化硅埋氧层以及 450 μm 厚的 handle 层。聚酰亚胺柔性链、多环陀螺结构以及金属导线制作在 SOI 的正面（device 层），为了实现结构的折叠，在 SOI 背部利用深反应离子刻蚀（DRIE）技术得到叉指状闩锁及折叠处的空隙。具体的工艺流程设计如图 4 所示。

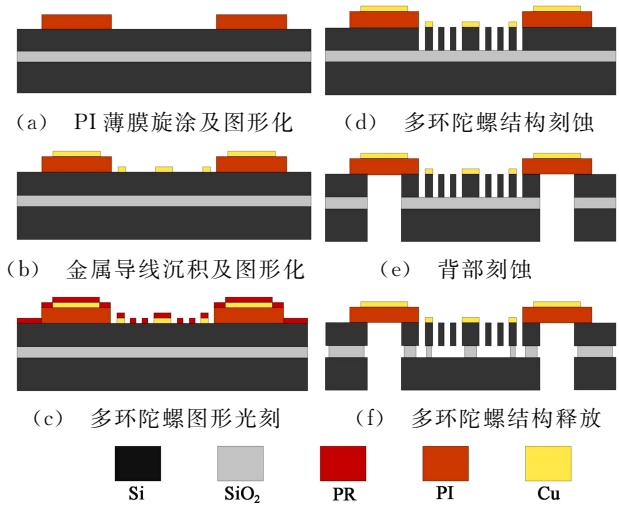


图 4　折叠结构的 MEMS 工艺流程

柔性链在结构中连接各个分立的侧壁，起到辅助折叠的作用，并且能够支持各个侧壁之间的电信号互联，其制备是整个工艺流程的关键。聚酰亚胺（Polyimide，PI）具有较低的杨氏模量，有很高的断裂伸长率和较好的抗拉强度，固化之后的 PI 具有良好的防水性和化学惰性，能够耐酸耐腐蚀，对温度的敏感度也很低，热稳定性好。同时 PI 有很好的绝缘性和较低的介电常数，能够在其表面实现金属导线的分布。

本文所设计工艺流程第一阶段为柔性链的制作（如图 4(a)）。在 SOI 器件层表面旋涂 PI，通过亚胺化使 PI 获得稳定的物理和化学性质。亚胺化之后的 PI 和衬底的结合力显著加强，能够承受 400 ℃高温而不分解，同时与绝大多数的化学试剂不发生反应。本文 PI 亚胺化的温度变化曲线如图 5 所示。接着用反应离子刻蚀（RIE）技术完成 PI 的图形化，实现预留器件区域的开窗以及可折叠柔性链的制作。图形化完成后的 PI 膜如图 6 所示。

工艺流程的第二个阶段为金属层的制作(如图4(b))。本文将陀螺的电极与PI上金属导线的制作工艺结合起来。在已经实现图形化的PI表层沉积一层100 nm厚的种子层金属Cu,为了增强金属层与基底的结合力,在沉积Cu之前先沉积20 nm厚的Cr作为粘接层。接着在金属层表面进行光刻,使得需要布置金属线以及陀螺电极的区域的种子层裸露出来。之后进行电镀,露出种子层金属的区域在富含铜离子的电镀液中会继续生长Cu,电镀完成之后去除光刻胶,采用离子束刻蚀的方式去除种子层铜,而金属线和电极区域的铜绝大部分被保留下来,从而实现陀螺电极和金属导线的一体化制作。制作完成后的金属层如图7所示。

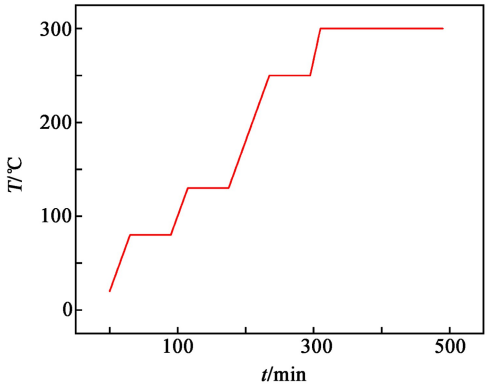


图5 PI的亚胺化温度曲线

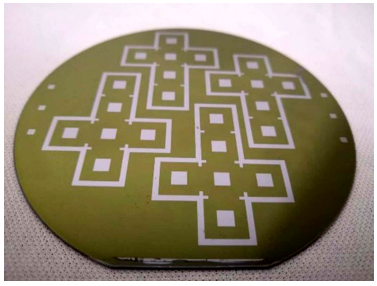


图6 图形化完成后的PI膜

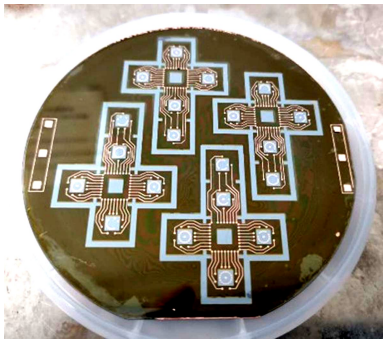


图7 电镀后的金属层

接下来在器件预留的区域进行陀螺图形的光刻(如图4(c)),多环结构通过光刻将图形从掩模板上转移到SOI预留的器件区域。然后通过DRIE技术刻蚀SOI器件层硅(如图4(d)),利用二氧化硅埋氧层作为刻蚀的截止层,从而实现对器件层硅的充分刻蚀,刻蚀深度等于SOI器件层的厚度,图8为刻蚀完成后多环陀螺的SEM图。

本文工艺的最后阶段为背部刻蚀和陀螺的释放(如图4(e),(f))。通过背部刻蚀,可折叠结构的平面展开结构从SOI上分离出来,并且得到用于固定的闩锁和折叠处的间隙结构,从而实现整机的折叠。背部刻蚀需要将整个SOI片刻穿,刻蚀分三个阶段进行:首先利用DRIE技术刻蚀handle层硅,接着利用ICP-RIE技术刻蚀二氧化硅埋氧层,最后完成device层硅的反应离子刻蚀。陀螺结构的最终释放需要通过湿法腐蚀的方式实现,腐蚀液为BOE缓冲液,利用中心锚点和多环结构尺寸的差异,当多环下方的氧化硅已经完全反应结束时,中心锚点下方的氧化硅绝大部分都完好保留,从而实现多环结构的释放。刻蚀完成后及最终折叠后的面向Micro-IMU的MEMS三维可折叠系统如图9所示。

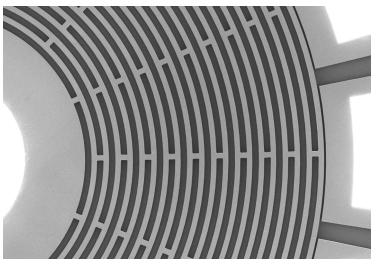
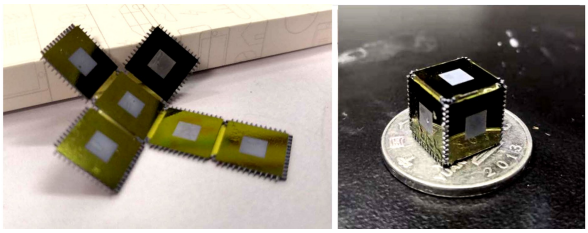


图8 多环陀螺刻蚀完成后的SEM图



(a) 背部刻蚀完成后 (b) 折叠后

图9 折叠MEMS结构

4 结论

本文提出了一种通过折叠来实现Micro-IMU中三个单轴陀螺仪的集成方式,将平面内的单轴惯性传感器利用柔性铰链的连接进行三维折叠,在保证不影响器件性能的前提下缩小了IMU系统的尺寸,并且允许实现惯性传感器在晶圆阶段的一体化制作,缩短了工艺周期,减少了工艺误差,提高了结构精度。这种方法为需要多轴敏感的传感器集成提

供了一种新的思路，而不仅仅局限于惯性传感器的集成。通过基于 SOI 的一体化集成 MEMS 工艺，成功制备了搭载有圆盘多环谐振陀螺的 MEMS 三维可折叠系统，整个系统尺寸为 1 cm^3，整机质量仅为 250 mg。

参考文献：

[1] Giansanti D, Maccioni G, Macellari V. The development and test of a device for the reconstruction of 3-D position and orientation by means of a kinematic sensor assembly with rate gyroscopes and accelerometers [J]. IEEE Trans. on Biomedical Engin., 2005, 52(7): 1271-1277.

[2] Yazdi N, Ayazi F, Najafi K. Micromachined inertial sensors [J]. Proc. of IEEE, 1998, 86(8): 1640-1659.

[3] Liu J, Shi Y, Zhang W. Micro inertial measurement unit based integrated velocity strapdown testing system [J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2004, 112(1): 44-48.

[4] Ayazi F. Multi-dof inertial MEMS: From gaming to dead reckoning[C]// Proc. of IEEE Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conf., 2011: 2805-2808.

[5] Chae J, Kulah H, Najafi K. A monolithic three-axis micro-G micromachined silicon capacitive accelerometer [J]. J. of Microelectromechanical Systems, 2005, 14(2): 235-242.

[6] 夏　艳. 3D 集成的发展现状与趋势[J]. 中国集成电路, 2011, 20(7): 28-33.
Xia Yan. Present situation and development of 3D integration [J]. China Integrated Circuit, 2011, 20(7): 28-33.

[7] Efimovskaya A, Lin Y W, Shkel A M. Origami-like 3-D folded MEMS approach for miniature inertial measurement unit[J]. J. of Microelectromechanical Systems, 2017, 26(5): 1-10.

[8] Dellea S, Giacci F, Longoni A, et al. Large full scale, linearity and cross-axis rejection in low-power 3-axis gyroscopes based on nanoscale piezoresistors[C]// Proc. of IEEE Inter. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems, 2015.

[9] 李男男，邢朝洋. 惯性微系统封装集成技术研究进展[J]. 导航与控制, 2018, 17(6): 31-37.
Li Nannan, Xing Chaoyang. Development of inertial micro-system packaging and integration technology[J]. Navigation and Control, 2018, 17(6): 31-37.

[10] 杜宜璋，常洪龙，苑伟政，等. 多环谐振微机械陀螺的研究现状及发展趋势[J]. 导航与控制, 2019, 18(4): 1-10.
Du Yizhang, Chang Honglong, Yuan Weizheng, et al. Research status and development trend of multiring resonant micromechanical gyroscope[J]. Navigation and Control, 2019, 18(4): 1-10.

作者简介：

李志伟(1997－)，男，山西吕梁人，硕士研究生，主要研究方向为 MEMS 惯性器件集成；

张卫平(1971－)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事先进微型机器人与微型无人机、先进微纳惯性技术、微机电系统(MEMS)、精密仪器、电路控制与嵌入式系统及其集成技术的研究。

(上接第 29 页)

[5] Hosack H H, Hynecek J. Clock controlled anti-blooming for virtual phase CCD's: US, EP19820300746[P]. 1985-02-15.

[6] Furukawa A, Matsunaga Y, Suzuki N, et al. An interline transfer CCD for single sensor 2/3″ color camera[R]. IEDM Tech. Dig., 1980: 346-349.

[7] Oda E, Ishihara Y, Teranishi N. Blooming suppression mechanism for an interline CCD image sensor with a vertical overflow drain[R]. IEDM Tech. Dig., 1983: 501-504.

[8] Akiyama I, Kohno A, Teranishi N. Noise characteristics of an interline CCD image sensor[C]// Proc. Conf.: TV SOC. Japan, 1983: 57-58.

[9] 杨　洪，李　立，吕玉冰，等. 一种内线转移可见光 CCD 光电特性模拟分析[J]. 半导体光电, 2014, 35(5): 773-776, 781.
Yang Hong, Li Li, Lv Yubing, et al. Simulation of photoelectric characteristics of interline transfer CCD [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(5): 773-776, 781.

[10] Van de Steeg M J H, Peek H L, Bakker J G C, et al. A frame-transfer CCD color imager with vertical antiblooming [J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1985, ED-32: 1430-1438.

[11] Albert J P Theuwissen. Solid-State Imaging with CCDs[M]. Kluwer Academic Publishers, 1995.

作者简介：

杨　洪(1982－)，男，2009 年毕业于电子科技大学微电子与固体电子学专业，高级工程师，从事 CCD 器件的设计研究工作。