

文章编号 1004-924X(2012)05-1076-08

## 应用双埋层 SOI 工艺制备低 $g$ 值微惯性开关

王 超\*, 吴嘉丽, 陈光焱

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 采用双埋层 SOI(Silicon-On-Insulator)材料, 结合 KOH 腐蚀工艺、电感耦合等离子体(ICP)刻蚀工艺、阳极键合以及喷雾式涂胶工艺, 研制了一种基于平面矩形螺旋梁的低  $g$  值微惯性开关。利用二氧化硅 KOH 腐蚀/ICP 刻蚀自停止的特点, 平面矩形螺旋梁厚度的精度为  $\pm 0.46 \mu\text{m}$ 。分析了双埋层 SOI 材料的电学特性, 采用等电位技术, 实现了双埋层 SOI 与上下两层硼硅玻璃的阳极键合。采用玻璃无掩模湿法腐蚀技术, 在玻璃封盖底部设计制作了大小为  $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$  的防粘连凸台, 解决了芯片在清洗干燥过程中的粘连问题。采用 ICP 刻蚀用硅衬片方法, 解决了 ICP 刻蚀工艺中高温导致的金硅共晶合金问题。实验验证显示, 提出的方法效果较好, 芯片成品率得到较大提高, 为大批量地研制低  $g$  值微惯性开关提供了可靠的工艺基础。

**关键词:** 低  $g$  值微惯性开关; 双埋层 SOI; 等电位; 防粘连; 硅衬片

**中图分类号:** TM564; TN305 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122005.1076

## Manufacture of low- $g$ micro inertial switch utilizing SOI with double buried layers

WANG Chao\*, WU Jia-li, CHEN Guang-yan

(*Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: wchao.lzms@gmail.com*

**Abstract:** A low- $g$  micro inertial switch based on the planar rectangular helical spring was developed by utilizing a SOI (Silicon-On-Insulator) wafer with double buried layers and the manufacturing technology including KOH etching, Inductance Coupled Plasma (ICP) etching, anodic bonding and spray coating. Based on the self-stop technique for KOH etching and ICP etching of the buried layers, the precision of the spring thickness was controlled to be  $\pm 0.46 \mu\text{m}$ . The electrical property of the SOI wafer was analyzed. The anodic bonding between borosilicate glass and SOI wafer was successfully carried out utilizing the uniform electric potential technique, and an anti-stiction structure with a size about  $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$  was fabricated using the maskless pyrex-etching in the process of wafer cleaning and drying. Finally, a silicon-base was used to solve the Au-Si eutectic problem resulted from high temperature during ICP etching process. Experiments show that the chip yield is greatly increased by optimizing the fabrication process and the fabrication process can support the production of low- $g$  micro inertial switches in batches.

收稿日期: 2012-01-20; 修订日期: 2012-02-15.

基金项目: 国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金资助项目 (No. 11076024); 中国工程物理研究院科学技术发展基金资助项目 (No. 2009B0403044)

**Key words:** low- $g$  micro inertial switch, SOI with double buried layers, uniform electric potential, anti-sticking, silicon-base

## 1 引言

低  $g$  值惯性开关是一种感受惯性加速度,执行开关机械动作的精密惯性装置,大多采用典型的“弹簧-质量-阻尼”结构,其闭合阈值为  $1\sim 30 g$  ( $g$ :标准重力加速度,  $1g=9.8\text{ m/s}^2$ ),在汽车安全气囊和航空航天等领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。低  $g$  值惯性开关所感知的惯性加速度信号是准静态的、频率近乎为零,在实验室里这种信号一般由基于离心原理的离心机试验设备产生。基于传统精密机械加工的低  $g$  值惯性开关<sup>[2]</sup>在汽车和机械等领域已得到成熟的应用,但由于其存在零件多、装配复杂、体积大等缺点,难以适应复杂环境的应用需求。基于现代半导体工业的 MEMS 技术具有体积小、重量轻、成本低、批量生产等传统精密机械加工方式难以实现的优点,随着 MEMS 技术的不断发展以及先进制造技术的不断完善,采用 MEMS 技术研制低  $g$  值微惯性开关具有重要的研究价值。

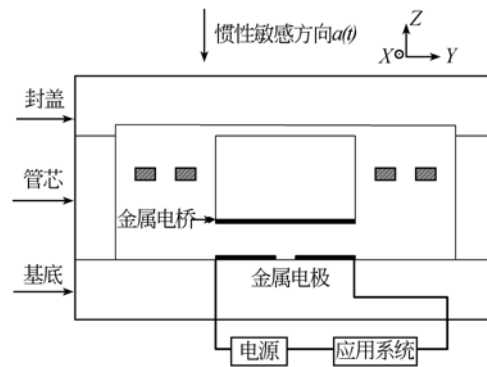
MEMS 加工工艺技术主要包括表面硅工艺、体硅工艺和 UV-LIGA 工艺等等。体硅工艺主要以单晶硅作为器件的结构材料,其关键工艺技术包括 KOH 腐蚀、ICP 刻蚀、阳极键合等。单晶硅是理想的弹性材料,具有较好的力学性能和稳定性,在精密惯性器件上具有较好的应用价值。同时,体硅工艺因工艺技术成熟易行,被广泛应用于多种 MEMS 器件的制作。但是,基于普通单晶硅片的 MEMS 工艺技术可以对晶圆平面内结构参数实现较高精度的控制,而对厚度方向上结构参数控制精度较差。当 MEMS 器件的性能对这些结构参数较为敏感时,将大大增加工艺难度。绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)技术<sup>[3]</sup>基于顶层硅和背衬底之间氧化埋层具有 KOH 腐蚀/ICP 刻蚀自停止的特点,利用顶层硅作为 MEMS 器件主体结构,较好地提高了器件在厚度方向上的尺寸精度,在微加速度计<sup>[4]</sup>、射频 MEMS<sup>[5]</sup>、热光开关<sup>[6]</sup>等 MEMS 器件上得到了广泛的应用。基于这一思想,本文针对一种基于平面矩形螺旋梁的低  $g$  值微惯性开关的结构特点,提出基于双

埋层 SOI 的加工工艺方案。双埋层 SOI 是一种 3 层单晶硅和 2 层二氧化硅相叠分布的特殊 SOI 材料,其中中间的单晶硅层用作平面矩形螺旋梁结构。利用上下 2 层二氧化硅埋层 KOH 腐蚀/ICP 刻蚀自停止的特点,可以将平面螺旋梁厚度的加工精度控制在  $\pm 0.5\ \mu\text{m}$  范围内。通过对关键工艺技术进行研究和分析,解决工艺难题,进一步优化改进工艺方案,可为大批量地研制微惯性开关提供可靠的工艺基础。

## 2 结构原理

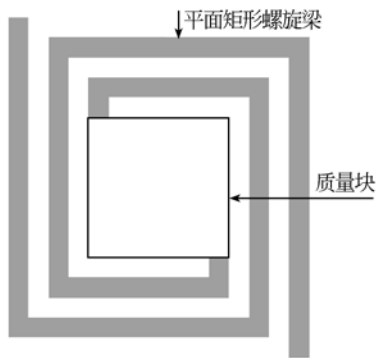
基于平面矩形螺旋梁的低  $g$  值微惯性开关<sup>[7]</sup>采用双触点结构,如图 1 所示,由封盖、管芯和基底 3 部分组成。管芯为惯性敏感单元,是整个结构的核心部件,包括悬空的感知惯性加速度的质量块,和 2 根结构完全相同的平面矩形螺旋梁,3 者组成“弹簧-质量”结构。带有浅槽的封盖用于限制质量块的反向运动,保护“弹簧-质量”结构。由于硅材料的导电性较差,故在质量块底面上溅射了一层金属作为金属电桥,以减小惯性开关的导通电阻。

惯性开关的工作原理为:在惯性敏感方向上的惯性加速度作用下,可动质量块向固定基底运动,当加速度达到闭合阈值时,质量块底面上的金属电桥与基底上的 2 个金属电极同时接触,开关为应用系统提供导通电阻信号。平面矩形螺旋梁



(a) 低  $g$  值微惯性开关截面示意图

(a) Cross-section schematic of low- $g$  micro inertial switch



(b) 管芯内部“弹簧-质量”结构示意图

(b) Structure schematic of spring-mass

图 1 基于平面矩形螺旋梁的低  $g$  值微惯性开关结构示意图Fig. 1 Structure schematic of low- $g$  micro inertial switch based on planar rectangular spiral beam

位于质量块厚度方向上的中性平面内,在 OXY 平面内具有较大的刚度,因此即使在 OXY 平面内具有较大的惯性加速度,当惯性敏感方向上的惯性加速度达到闭合阈值时,金属电桥与 2 个金属电极仍能实现同时接触,具有较好的抗横向干扰的性能。

### 3 工艺试验

管芯“弹簧-质量”结构作为整个结构的核心部件属于准三维结构,由于平面矩形螺旋梁位于质量块厚度方向上的中性平面内,使其成为微惯性开关整个工艺流程中的最大难点。UV-LIGA 工艺<sup>[8]</sup>以金属镍或铜为结构材料,采用厚胶紫外光刻、微电铸工艺及牺牲层技术,可实现三维结构的制作。但受光刻胶胶膜图形和具体工艺参数的影响,微电铸得到的结构的表面平整性和厚度均匀性较差,存在针孔、积瘤等缺陷,另外,由于结构的机械强度和内应力等问题,造成成品率较低、产品性能的分散性较大。多层高深宽比硅台阶深刻蚀方法<sup>[9]</sup>作为一种硅微结构的三维加工技术,可实现在垂直于硅片表面方向上的折线加工,但由于台阶边缘刻蚀长草、深度方向上的加工精度较差等原因,难以获得较好的平面矩形螺旋梁结构。为攻克这些挑战,应用 EVG 专利的喷雾式涂胶

工艺<sup>[10]</sup>提供了一种可行的解决方案。喷涂工艺采用一个低压超声喷雾器,在旋转速度较慢的基片表面上喷洒细小的光刻胶液滴,因此能够在形貌起伏很大的表面均匀地涂布光刻胶,并保持与传统旋转涂胶法相当的光刻胶使用量。因此,本文将 EVG108 设备的喷雾式涂胶工艺应用于低  $g$  值微惯性开关的制作,并通过流片试验对工艺方案的可行性进行论证。

本文所用双埋层 SOI 材料 3 层单晶硅的厚度依次为  $135\ \mu\text{m}$ (顶层)、 $30\ \mu\text{m}$ (结构层)、 $285\ \mu\text{m}$ (底层),其中厚度为  $30\ \mu\text{m}$  的结构层用于制作平面矩形螺旋梁结构。微惯性开关的结构尺寸为:质量块  $1\ 800\ \mu\text{m} \times 1\ 800\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ ,平面矩形螺旋梁宽为  $100\ \mu\text{m}$ ,厚度为  $30\ \mu\text{m}$ ,梁间间隙宽度为  $100\ \mu\text{m}$ ,梁的总节数为 8,质量块与基底之间的初始间距为  $150\ \mu\text{m}$ 。

低  $g$  值微惯性开关的制作包括硅管芯、玻璃基底和玻璃封盖 3 部分,其中硅管芯的制作工艺过程如图 2 所示。首先,将双埋层 SOI 硅片常规清洗处理后,热氧化生成厚度约为  $2\ \mu\text{m}$  的  $\text{SiO}_2$  氧化层。双面光刻出图形,HF 溶液腐蚀去除图形区域的  $\text{SiO}_2$  氧化层。去除光刻胶后,以  $\text{SiO}_2$  氧化层为掩模进行 KOH 各向异性腐蚀,正面腐蚀至  $\text{SiO}_2$  绝缘埋层时腐蚀自停止,另一面腐蚀至指定深度,如图 2(a)所示;接着,采用喷涂工艺在深槽内光刻出图形,HF 溶液腐蚀去除图形区域的  $\text{SiO}_2$  氧化层。去除光刻胶后,以  $\text{SiO}_2$  氧化层为掩模进行 ICP 刻蚀,当刻蚀至  $\text{SiO}_2$  绝缘埋层时刻蚀自停止,如图 2(b)所示;腐蚀去除螺旋梁上表面的  $\text{SiO}_2$  氧化层后,在基片另一面采用超声剥离工艺制作金属电桥,如图 2(c)所示;接着,基片与带有深槽的玻璃封盖进行阳极键合后,在基片另一面光刻出图形,以光刻胶为掩模进行 ICP 刻蚀,当刻蚀至  $\text{SiO}_2$  绝缘埋层时刻蚀自停止,同时刻蚀穿透,形成悬空的“弹簧-质量”结构,如图 2(d)所示;依次腐蚀去除光刻胶掩模层和螺旋梁下表面的  $\text{SiO}_2$  氧化层后,基片与带有金属电极的玻璃基底进行阳极键合,实现芯片的圆片级封装,如图 2(e)所示。

玻璃封盖的工艺过程为:在硼硅玻璃上双面溅射 Cr/Au 并双面旋涂光刻胶,单面光刻出图形后腐蚀去除图形区域的 Cr/Au,然后以光刻胶和

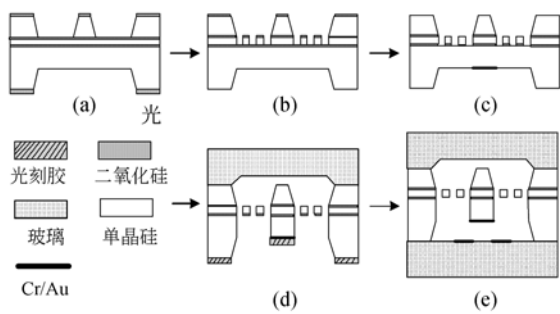


图 2 低 g 值微惯性开关制作工艺示意图

Fig. 2 Fabrication process diagram of low-g micro inertial switch

Cr/Au 为双层掩模,采用 HF/HCl 混合溶液腐蚀出深度约 80 μm 的槽,最后腐蚀去除光刻胶和 Cr/Au 掩模层,完成带有浅槽的玻璃封盖的制作。

选取 Cr/Au 作为微惯性开关的金属电极材料,其中 Au 的主要作用是增强电极的导电性,减小惯性开关的导通电阻,Cr 层在玻璃与 Au 层之间起黏附层作用。玻璃基底的工艺过程为:在硼硅玻璃上单面光刻出图形后,采用 BHF 溶液腐蚀出深度约 100 nm 的浅槽;然后,利用真空离子溅射的方法,依次溅射黏附层 Cr(厚度约 80 nm)和导电层 Au(厚度约 80 nm);最后采用金属剥离工艺,完成带有金属电极的玻璃基底的制作。

低 g 值微惯性开关基于普通单晶硅片的工艺流程与图 2 所示工艺类似,但由于没有 SiO<sub>2</sub> 绝缘埋层 KOH 腐蚀/ICP 刻蚀自停止的作用,平面矩形螺旋梁厚度的加工精度为 ±5 μm。同时,单晶硅片内部的晶格缺陷随着 KOH 溶液各向异性腐蚀深度的增大而逐渐扩大,最终在螺旋梁表面形成腐蚀坑,严重影响螺旋梁的表面质量。采用双埋层 SOI 材料,基于二氧化硅 KOH 腐蚀/ICP 刻蚀自停止的特点,可以较好地解决上述问题。

#### 4 结果讨论与改进

基于喷雾式涂胶工艺,利用如图 2 所示的工艺方案,基本实现了低 g 值微惯性开关的制作,初步论证了工艺方案的可行性。但在流片试验中,也暴露出芯片粘连、金硅共晶合金、双埋层 SOI 与硼硅玻璃阳极键合效率低等问题,器件的成品率较低。为解决这些问题,本文采用防粘连

凸台结构、ICP 刻蚀用硅衬片方法、双埋层 SOI 等电位技术,对低 g 值微惯性开关的工艺方案进行优化改进。

##### 4.1 防粘连凸台结构

在如图 2(d)所示的硅管芯制作工艺中,在 ICP 刻蚀穿通形成悬空的“弹簧-质量”结构后的清洗干燥过程中,由于平面矩形螺旋梁的刚度在 (0.1~1) N/m 的数量级<sup>[11]</sup>,在液体表面张力的作用下,质量块有可能与玻璃封盖底部发生粘连现象。而当粘连现象发生时,由于质量块与玻璃封盖底部的接触面积约 4 mm<sup>2</sup>,在分子间范德华力的作用下,很难从玻璃基底上分离质量块,大大降低器件的成品率。采用蒸发干燥法<sup>[12]</sup>、干法释放牺牲层技术<sup>[13]</sup>、CO<sub>2</sub>临界点干燥法<sup>[14]</sup>等方法在一定程度上可以避免在清洗干燥过程中的粘连问题,但在微惯性开关的使用过程中,随机性的振动或冲击加速度仍有可能造成质量块与玻璃封盖的粘连,降低器件的工作可靠性。结合微惯性开关加工工艺的特点,本文提出玻璃无掩模湿法腐蚀技术,在玻璃封盖的底部设计加工了大小为 200 μm×200 μm 的防粘连凸台。通过减小质量块与玻璃封盖底部的实际接触面积,成功解决了芯片粘连问题。

玻璃封盖优化改进后的工艺过程为:首先,在硼硅玻璃上双面溅射 Cr/Au 并双面旋涂光刻胶,单面光刻出图形后腐蚀去除图形区域的 Cr/Au,然后以光刻胶和 Cr/Au 为双层掩模,采用 HF/HCl 混合溶液腐蚀出深度约 20 μm 的槽,如图 3(a)所示;然后,去除光刻胶后继续双面旋涂光刻胶并单面光刻出图形,去除图形区域的 Cr/Au,然后以光刻胶和 Cr/Au 为双层掩模,采用 HF/HCl 混合溶液腐蚀出深度约 80 μm 的槽,如图 3(b)所示;最后腐蚀去除光刻胶和 Cr/Au 掩模层,完成带有防粘连凸台的玻璃封盖的制作,电镜照片如图 4 所示。

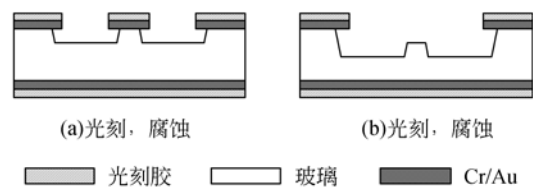


图 3 玻璃封盖制作工艺示意图

Fig. 3 Fabrication process diagram of glass cover

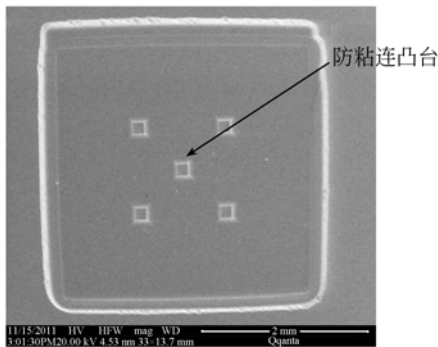


图 4 带有防粘连凸台的玻璃封盖电镜照片

Fig. 4 SEM photo of glass cover with anti-sticking convex

#### 4.2 ICP 刻蚀用硅衬片方法

在如图 2(d) 所示的硅管芯制作工艺中, ICP 刻蚀穿通后, 可在质量块表面发现金硅共晶合金现象, 即金属电桥 Cr/Au 与基底单晶硅形成金硅合金, 如图 5 所示。经检测, 质量块表面的导电性较差, 金属电桥不再具有导电的功能。

由于金硅共晶点的温度为  $363\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[15]</sup>, 分析认为这是在 ICP 刻蚀工艺的过程中质量块表面出现了局部高温。首先, 从热量生成的角度分析, 在 ICP 刻蚀工艺中, 等离子体对材料的刻蚀包括物理刻蚀和化学刻蚀 2 部分<sup>[16]</sup>, 其中物理刻蚀是通过加速粒子对基片表面的撞击, 用动能破坏基片表面原子间共价键能量, 将原子轰击出基片表面, 达到刻蚀目的。因此, 物理刻蚀的过程将产生较大的热量。定义刻蚀面积比 = 刻蚀面积 / 芯片面积, 经统计分析发现, 刻蚀面积比为 25% 和 37% 的芯片出现共晶合金现象的数量大于 90%, 而刻蚀面积比为 17% 的芯片未出现共晶合金现象。其次, 从热量耗散的角度分析, ICP 工艺是对硼硅玻璃-双埋层 SOI 键合片进行的刻蚀, 其中, 硼硅玻璃的导热系数为  $0.012\text{ W}/(\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C})$ , 远远小于单晶硅的导热系数  $1.57\text{ W}/(\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。因此, 在 ICP 工艺过程中产生的大量热量难以通过硼硅玻璃耗散出去, 因而在质量块表面出现局部高温, 导致共晶合金现象。

由于微惯性开关结构的设计很难通过减小刻蚀面积比控制热量的产生, 因此, 本文提出用硅衬片方法完成 ICP 刻蚀。将硅衬片和硅基片通过光刻胶粘连在一起进行 ICP 刻蚀, 加快了热量的耗散速率, 避免了质量块表面出现局部

高温。在 ICP 刻蚀穿通后, 通过丙酮去胶取下硅基片, 最后与玻璃封盖、玻璃基底进行阳极键合, 完成微惯性开关的制作。通过优化工艺流程, 成功解决了金硅共晶合金问题。离心试验测试表明, 微惯性开关的导通电阻约为  $8\ \Omega$ , 满足应用系统的要求。

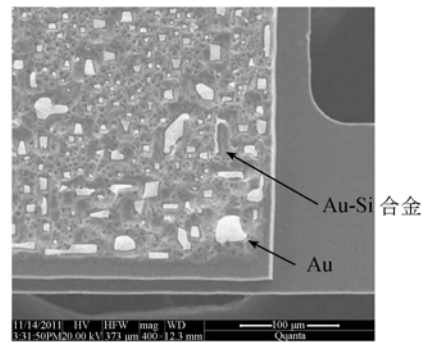


图 5 ICP 刻蚀穿通后的金硅共晶合金表面

Fig. 5 Au-Si eutectic alloy of ICP etching penetrating

#### 4.3 双埋层 SOI 等电位技术

由于 2 层二氧化硅的分压作用, 双埋层 SOI 在与硼硅玻璃进行阳极键合时需要更高的键合电压和更长的键合时间<sup>[17]</sup>。为了提高键合成功率, 本文采用双埋层 SOI 等电位技术, 利用微惯性开关的加工工艺, 通过 KOH 腐蚀、ICP 刻蚀以及剥离工艺, 在双埋层 SOI 片内加工出如图 6 所示的结构。其中 Cr/Au 采用真空离子溅射的方法制作, 作为电连接层跨过结构层和 2 层二氧化硅连接顶层和底层的单晶硅, 在电学性能上将双埋层 SOI 转化为普通的单晶硅片, 从而降低了双埋层 SOI 与硼硅玻璃的键合难度。该辅助键合的工艺结构与微惯性开关同时完成工艺制作, 与利用 SOI 硅片材料外缘倒角结构制作电连接层<sup>[18]</sup>的方法相比, 在加工工艺上具有更好的可操作性。

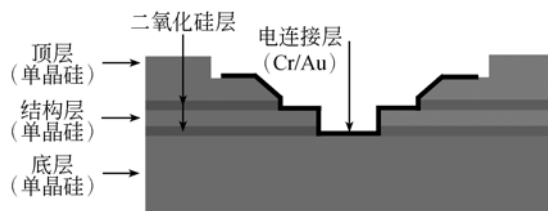


图 6 双埋层 SOI 等电位技术示意图

Fig. 6 Equipotential technology diagram of double buried layer SOI

低  $g$  值微惯性开关采用常压封装的方式,阳极键合试验中使用的设备为 Karl SUSS SB6e 键合机,键合工艺条件为:热板温度为  $350^{\circ}\text{C}$ ,键合电压为  $700\text{ V}$ ,对双埋层 SOI-硼硅玻璃施加  $60\text{ kPa}$  压力,键合机腔体内气体环境为常压  $\text{N}_2$ 。采用该工艺条件,实现了双埋层 SOI 与玻璃封盖、玻璃基底的阳极键合。键合片剖面的电镜照片如图 7 所示,可以看出键合效果良好。

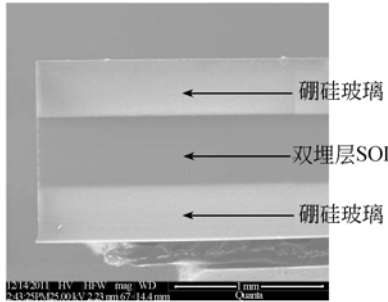


图 7 双埋层 SOI 与硼硅玻璃键合片剖面电镜照片  
Fig. 7 SEM photo of double buried layer SOI and borosilicate glass bonding tablets

#### 4.4 工艺改进方案

采用 ICP 刻蚀用硅衬片方法以及双埋层 SOI 等电位技术,低  $g$  值微惯性开关优化改进后的制作工艺方案如图 8 所示,其中工艺(a)和工艺(b)与图 2 所示的工艺(a)和工艺(b)相同。图 8(c)所示工艺为:采用超声剥离工艺在基片背面制作金属电桥,在基片正面制作双埋层 SOI 等电位技术中的电连接层;图 8(d)所示工艺为:采用 ICP 刻蚀用硅衬片方法进行 ICP 刻蚀,穿通释放“弹簧-质量”结构;图 8(e)所示工艺为:清洗干净的硅管芯依次与带有防粘连凸台的玻璃封盖、带有金属电极的玻璃基底进行阳极键合,完成芯片的圆片级封装。需要指出的是,在该工艺改进方案中,不再存在由于清洗干燥导致的芯片粘连问题,但玻璃封盖上的凸台结构在微惯性开关的使用过程中仍将具有防粘连的作用。因此,尽管采用玻璃无掩模湿法腐蚀技术制作防粘连凸台结构增加了工艺的复杂度,本文认为该工艺改进仍具有一定的必要性。

采用如图 8 所示优化改进后的工艺方案,完成了低  $g$  值微惯性开关的制作。试验结果表明,防粘连凸台结构、ICP 刻蚀用硅衬片方法以及双埋层 SOI 电位技术等改进措施的效果较好,成功

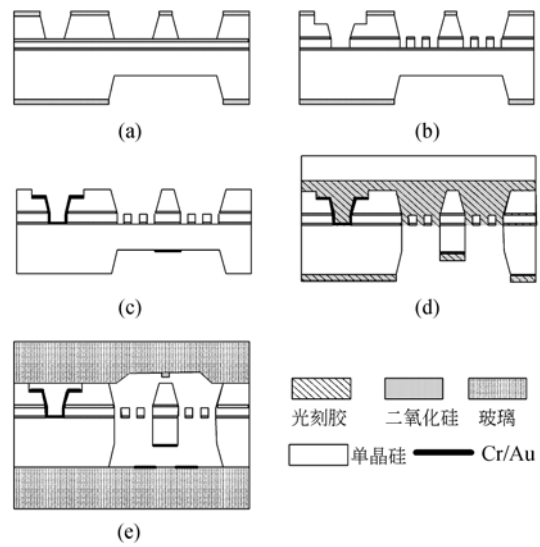


图 8 低  $g$  值微惯性开关优化改进后的制作工艺示意图  
Fig. 8 Improved fabrication process of low- $g$  micro inertial switch

解决了芯片粘连、金硅共晶合金、键合效率低等问题,器件的可制造性得到较大提高。图 9 为微惯性开关圆片级封装照片,芯片大小为  $7\text{ mm} \times 7\text{ mm} \times 1.3\text{ mm}$ 。图 10 为采用喷雾式涂胶工艺在

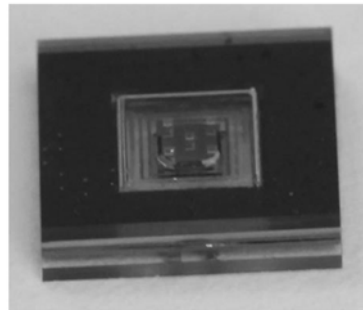


图 9 微惯性开关圆片级封装照片  
Fig. 9 Wafer level packaged inertial switch

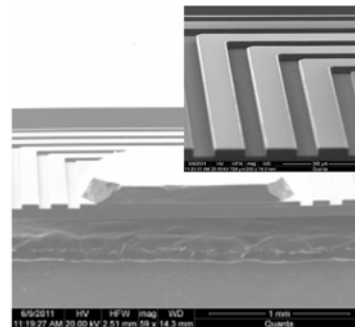


图 10 平面矩形螺旋梁结构电镜照片  
Fig. 10 SEM of planar rectangular spiral beam

深度约 135  $\mu\text{m}$  的深槽内制作的平面矩形螺旋梁电镜照片,可以看出,平面矩形螺旋梁的表面形貌较好,扫描电子显微镜测试结果表明螺旋梁厚度的精度为 $\pm 0.46 \mu\text{m}$ 。

## 5 结 论

为提高结构尺寸的加工精度,利用二氧化硅 KOH 腐蚀/ICP 刻蚀自停止的特点,研制了一种基于双埋层 SOI 的低  $g$  值微惯性开关。利用 KOH 腐蚀工艺、ICP 刻蚀工艺、喷雾式涂胶工艺、阳极键合等关键工艺技术,结合双埋层 SOI 等电位技术,完成了微惯性开关的制作。采用玻璃无掩模湿法腐蚀技术,通过减小质量块与玻璃封盖

底部的实际接触面积,解决了芯片在清洗干燥过程中的粘连问题,有效地提高了芯片成品率。针对 ICP 刻蚀穿通后在质量块表面出现的金硅合金问题,通过对造成局部高温的影响因素分析,提出 ICP 刻蚀用硅衬片方法,加快热量耗散速率,有效地解决了金硅合金问题。低  $g$  值微惯性开关制作工艺较为复杂,采用双埋层 SOI 材料提高器件的结构尺寸精度,通过优化工艺流程解决关键工艺技术问题,从而提高了器件的可制造性和成品率,为大批量、低成本地研制低  $g$  值微惯性开关提供了可靠的工艺技术基础。

致谢:感谢电子工程研究所传感器与执行器中心 MEMS 工艺组同志在加工工艺方面给予的帮助和支持。

## 参考文献:

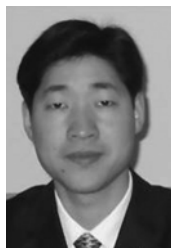
- [1] CHEN G Y, WU J L, ZHAO L, *et al.*. Low- $g$  micro inertial switch based on Archimedes' spiral[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6): 1257-1261.
- [2] WANG H X, ZHAO J. Inertial switch with bistable permanent magnetic structure[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2009, 7(2): 137-141.
- [3] 海涛,刘光辉,周真,等. SOI 传感器的现状和发展趋势[J]. *传感器技术*, 2003, 22(5): 125-128.  
HAI T, LIU G H, ZHOU ZH, *et al.*. State of the art and trends of SOI sensor[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2003, 22(5): 125-128. (in Chinese)
- [4] SU S X P, YANG H S, AGOGINO A M. A resonant accelerometer with two-stage microleverage mechanisms fabricated by SOI-MEMS technology [J]. *Sensors Journal, IEEE*, 2005, 5(6): 1214-1223.
- [5] GUAN L P, SIN J K O, LIU H T, *et al.*. A fully integrated SOI RF MEMS technology for system-on-a-chip application[J]. *Electron Devices, IEEE Transactions On*, 2006, 53(1): 167-172.
- [6] LI Y P, YU J Z, CHEN SH W. Rearrangeable nonblocking SOI waveguide thermo-optic  $4 \times 4$  switch matrix with low insertion loss and fast response[J]. *Photonics Technology*, 2005, 17(8): 1041-1135.
- [7] 王超,陈光焱,吴嘉丽. 基于 MEMS 技术的低  $g$  值微惯性开关的设计与制作[J]. *传感技术学报*, 2011, 24(5): 653-657.  
WANG CH, CHEN G Y, WU J L. Design and fabrication of low- $g$  micro inertial switch based on MEMS technology[J]. *Chinese of Sensors and Actuators*, 2011, 24(5): 653-657. (in Chinese)
- [8] 黄新龙,熊璞,陈光焱,等. UV-LIGA 技术制作微型螺旋形加速度开关[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(5): 1152-1158.  
HUANG X L, XIONG Y, CHEN G Y, *et al.*. Fabrication of micro spiral acceleration switch using UV-LIGA technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1152-1158. (in Chinese)
- [9] 王阳元,武国英,郝一龙,等. 硅基 MEMS 加工技术及其标准工艺研究[J]. *电子学报*, 2002, 30(11): 1577-1584.  
WANG Y Y, WU G Y, HAO Y L, *et al.*. Study of silicon-based MEMS technology and its standard process [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(11): 1577-1584. (in Chinese)
- [10] ICHIKI M, ZHANG L, YANG Z, *et al.*. Thin film formation on non-planar surface with use of spray coating fabrication[J]. *Microsystem Technologies*, 2004, 10(5): 360-363.
- [11] 王超,陈光焱,吴嘉丽. 用于低  $g$  值微惯性开关的低刚度平面微弹簧设计与制作[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3): 620-627.  
WANG CH, CHEN G Y, WU J L. Development of planar micro-spring with low stiffness in low  $g$

- n micro inertial switch[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 620-627. (in Chinese)
- [12] 郭鑫,杨鹏飞,张海岩,等.热驱动微型电场传感器干燥技术[J].*传感技术学报*,2010,23(6):243-249.  
GUO X, YANG P F, ZHANG H Y, *et al.*. The drying techniques for thermally driven MEFS[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 23(6): 243-249. (in Chinese)
- [13] WITVROUW A, BOIS B D, MOOR P D. *et al.*. A Comparison between wet HF etching and vapor HF etching for sacrificial oxide removal[C]. *Proc. SPIE*, 2000, 4174: 130-141.
- [14] 赵珉,陈宝钦,牛洁斌,等.电子束抗蚀剂图形结构的倒塌与粘连[J].*微纳电子技术*,2011,48(1):63-68.  
ZHAO M, CHEN B Q, NIU J B, *et al.*. Collapse and adhesion of the electron resist pattern structure [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2011, 48 (1): 63-68. (in Chinese)
- [15] 刘兵武,张兆华,谭智敏,等.用于 MEMS 器件的单面溅金硅共晶键合技术[J].*半导体技术*,2006,31(12):896-899.  
LIU B W, ZHANG ZH H, TAN ZH M, *et al.*. Au-Si eutectic bonding technology for MEMS device [J]. *Semiconductor Technology*, 2006, 31 (12): 896-899. (in Chinese)
- [16] 周敬然,张海英,瞿鹏飞,等. ICP 刻蚀在微加速度传感器制作中的应用[J].*微纳电子技术*,2010,47(11):713-717.  
ZHOU J R, ZHANG H Y, QU P F, *et al.*. Application of ICP etch in the fabrication of micro-accelerometer sensors [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2010, 47 (11): 713-717. (in Chinese)
- [17] 贾孟军.硅微机械加速度开关技术研究[D].上海:中国科学院研究生院(上海微系统与信息技术研究所),2006.  
JIA M J. *MEMS switches technique for acceleration detection*[D]. Shanghai: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [18] YAMAMOTO T, KATO T, MATSUI N, *et al.*. Capacitive accelerometer with high aspect ratio single crystalline silicon microstructure using the SOI structure with polysilicon-based interconnect technique, MEMS'2000, Miyazaki, Japan, 2000:23-27.

#### 作者简介:



王超(1985—),男,四川苍溪人,研究实习员,2008年于北京大学物理学院获得学士学位,现主要从事 MEMS 惯性器件的设计和加工技术研究。E-mail: wchao.lzms@gmail.com



陈光焱(1975—),男,四川泸县人,硕士,副研究员,1998年于重庆大学获得学士学位,2002年于重庆大学获得硕士学位,主要从事惯性传感器、微机电系统(MEMS)等方面的研究。E-mail: cgyiee@126.com



吴嘉丽(1957—),女,安徽太和人,高级工程师,1980年毕业于华南理工大学,主要从事微电子、MEMS 工艺技术研究。E-mail: wujl1231@sina.com

(本栏目编辑:马健)