

用低温金属电镀技术制造与封装的 惯性微型电学开关

马 薇¹ Yitshak Zohar¹ 王 文^{2,†}

(1 香港科技大学机械工程系, 香港)

(2 香港科技大学电机电子工程系, 香港)

摘要: 运用光刻胶为注模的多次互不干扰金属电镀技术实现了惯性微型电学开关的低温制造与封装. 电镀技术的低温过程可使微型开关直接成形于预先制作好的含有电子信号处理电路的基底上, 加上同样借助于低温金属电镀技术的基于整个硅晶片的倒装封装, 直接形成环绕各个器件的密封腔体. 这一技术最终将使得模块化生产成为现实. 微型开关的高度和它的密封腔的高度可以分别控制. 电子信号可以通过金属互连线进入密封腔体. 为了便于设计, 建立了一个既简单又相对准确的“弹簧-质量块”模型. 以此设计的惯性开关, 即使在未封装的常温、常压条件下, 均可工作 10^9 次以上. 本文对密封腔体的强度和密封性, 以及金属互连线的可靠性, 都作了详细的检测, 各项指标均达到其各自的标准.

关键词: 惯性微型开关; 阈值加速度; 电镀; 封装; 共晶焊料熔接; 密封性.

EEACC: 2180B

中图分类号: TN820.8+3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)06-1239-06

1 引言

感应加速度变化的惯性电学开关被广泛地应用于玩具、附件、汽车及其他工业领域^[1]. 以微加工工艺制造的惯性开关具有体积小、成本低及批量生产等优点. 如果惯性开关的制造过程和信号处理电路的制造过程相容, 就可以通过一个连续的微加工过程集成出来^[2]. 这样不仅能够简化微系统的生产过程, 而且还会提高产品的性能和产量. 为了给这一包含机械运动组件的微系统提供安全、有效的运动空间, 使用腔体环境可控的密封空腔封装手段是必不可少的^[3]. 但比起纯粹电子器件的封装技术, 目前针对微系统的封装技术还是比较复杂和昂贵的.

本文报道一种通用的低温工艺, 可直接在含有微电子信号处理电路的基底上, 制造和封装一系列微机械结构. 当然, 这些微机械结构是金属的, 也就是导电的. 惯性驱动的微型电学开关就是其中的一

个代表.

以光刻胶为注模^[4]的低温金属电镀技术^[5]可以形成较厚的结构膜(结构的高度), 这是传统的平面微加工工艺所达不到的. 这一工作曾有人报道过^[6], 其意义在于可将微机械结构成形于含有信号处理的微电子电路的有效基底上. 目前, 我们已将其应用于惯性微型电学开关的制造^[7,8], 同时开发了基于整个硅晶片的封装技术^[8]. 封装技术同样借助电镀工艺, 分别在“顶盖晶片”和含有微机械及其他组件的“器件晶片”上做出金属的密封圈. 然后“倒装”顶盖晶片, 使之与器件晶片键合^[9]. 密封圈的高度决定了腔体的高度. 借助互不干扰的多次电镀技术, 器件晶片上的相应密封金属层(counter sealing metal, CSM)的制造可完美地融合在器件制造的流程里.

为了准确地设计出特定的惯性开关, 我们建立了一个既简单又相对精确的“弹簧-质量块”模型来描述其力学行为. 用有限元工具做出的数值分析和其后的落锤及振动台试验都证明了这一模型的可靠

马 薇 博士, 从事 post-CMOS 工艺的开发及 MEMS 器件的设计与制造.

Yitshak Zohar 教授, 从事微流体理论的研究及 MEMS 工艺的开发.

王 文 教授, 从事显示技术及 MEMS 技术的研究与开发.

† 通信作者, Email: eemwong@ee.ust.hk

2004-10-21 收到, 2005-02-27 定稿

性.制得的惯性开关,即使在未封装的常温、常压条件下,均可工作一亿次以上.

封装的键合强度用 Dage 4000T 键合测试机检测.失效前的临界剪切应力约为 30MPa,超过 MIL-STD-883D,方法 2019.5 所规定的最小值.焊料与 CSM 之间的界面是经常发生剥离的地方.为了真实地反应封装腔体的气密性,检测使用了粗检和细检两种方法,测试的结果符合气密性的标准.

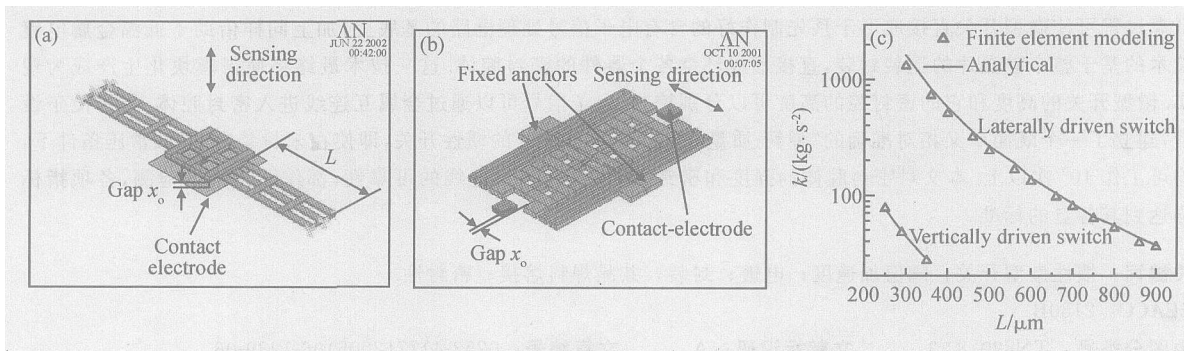


图 1 惯性微型电学开关的设计 (a) 纵向驱动; (b) 横向驱动; (c) 有效弹簧系数的理论与数值模拟结果

Fig. 1 Designs of the micro-switches (a) Vertically driven; (b) Laterally driven; (c) Analytical and simulated results of the effective spring constants

这一“弹簧-质量块”系统可以表示为具有有限质量 m 的质量块与一个无质量的、弹簧系数为 k 的弹簧.在力 F 的作用下,其控制方程为:

$$m \ddot{x} = -\dot{x} - kx + F \quad (1)$$

其中 \dot{x} 为阻尼系数.

当受到冲击力时,质量块被瞬间加速.这种情况下,我们可以定义一个“阈值速度” v_t .如果忽略阻尼的影响, v_t 可以通过能量守恒原理从方程(1)导出:

$$v_t = \sqrt{\frac{k}{m}} x_0 \quad (2)$$

纵向驱动的开关可以视为一根两端固支的梁,中心有一质量为 m 的质量块,其有效弹簧系数可表示为:

$$k = \frac{192EI}{L^3} \quad (3)$$

其中 E 为杨式模量; I 为梁在感应方向的有效转动惯量; L 为梁的长度.

横向驱动的开关选择了依次相连的曲形环式弹簧(图 1(b)).这一设计可以舒缓结构膜的残余应力,从而降低了它对开关机械特性的影响.另一优势是可以以一个相对比较紧凑而小巧的设计来得到充

2 惯性微型电学开关的设计

惯性微型电学开关的设计选用“弹簧-质量块-弹簧”的桥形结构.设计分为两种:(1)纵向驱动(图 1(a)),感应方向与基底的平面垂直.(2)横向驱动(图 1(b)),感应方向与基底的平面平行.

分大的位移.其有效弹簧系数可以将每一根梁对此的贡献汇总而得:

$$k = \frac{192EI}{(2n-1)L_{\text{suspen}}^3 + L_{\text{fix}}^3} \quad (4)$$

其中 n 为曲形环的个数; L_{fix} 为固定梁的有效长度; L_{suspen} 为其余梁的有效长度.

我们使用有限元软件 ANSYS 研究了微型开关的行为.理论所得的和数值模拟所得的结构有效弹簧系数非常吻合(图 1(c)).据此,我们按照方程(3)和(4)设计了不同阈值速度的纵向或横向驱动的惯性开关.

3 制造工艺

要实现纵向和横向驱动的惯性开关,以及为将来封装用的相应密封金属层,整个过程需要 9 次光刻.考虑到其稳定和电阻低的特性,选择了电镀金作为开关的结构材料.图 2 显示了制造过程的关键步骤.图 2(a)~(f)代表“器件晶片”的流程,图 2(g)~(j)代表“顶盖晶片”的流程.

首先在硅片上生长 0.2 μm 绝缘氧化层.然后溅射 30nm 的钛及 200nm 的金并刻蚀出电路引线(图

2(a)), 随后铺设低温 SiO₂ 作为顶部的绝缘层.

其后在器件晶片上进行的是溅射和刻蚀作为电镀互连及密封壁处 CSM 种子层的钛钨/铜复合层. 选择金属铝作为牺牲层. 牺牲层分两次溅射. 第一层为 0.5μm, 刻蚀成小孔阵列, 使得电镀时质量块在此位置形成抗粘附的小突起. 第二层有 2μm, 是主牺牲层, 它的厚度决定了纵向驱动器件上下电极之间的间距 x₀. 此外, 这层铝还为分离的电镀金的种子层提供一个连续的导电衬底. 同时刻蚀这两层铝, 打开梁两端的固支点, 以及互连点和密封壁处. 随后, 使用剥离技术铺设了电镀金的种子层钛钨/金 (30nm/100nm) (图 2(b)).

= 1 2) 进行显影. 光刻最小线条为 8μm.

电镀过程从电镀铜开始. 电镀液是 LeaRonald 公司的 Copper Gleam 2001. 室温下使用 40mA/cm² 的电流密度电镀出 5μm 厚的 CSM (图 2(c)). 为了形成惯性开关, 使用 Neutronex 309 电镀液在 50 条件下进行金的电镀. 电镀速度约为 3.6μm/h.

第一层光刻胶的注模用以电镀纵向驱动开关的 5μm 厚的梁, 也就是弹簧 (图 2(d)). 第二层注模用以电镀 20μm 厚的金, 形成纵向驱动开关的质量块和整个横向驱动开关的结构 (图 2(e)). 除去光刻胶后, 再用磷酸基的铝腐蚀液除去牺牲层铝, 就得到最终的开关 (图 2(f)). 图 3(a), (b) 是已完成的器件的扫描电镜照片.

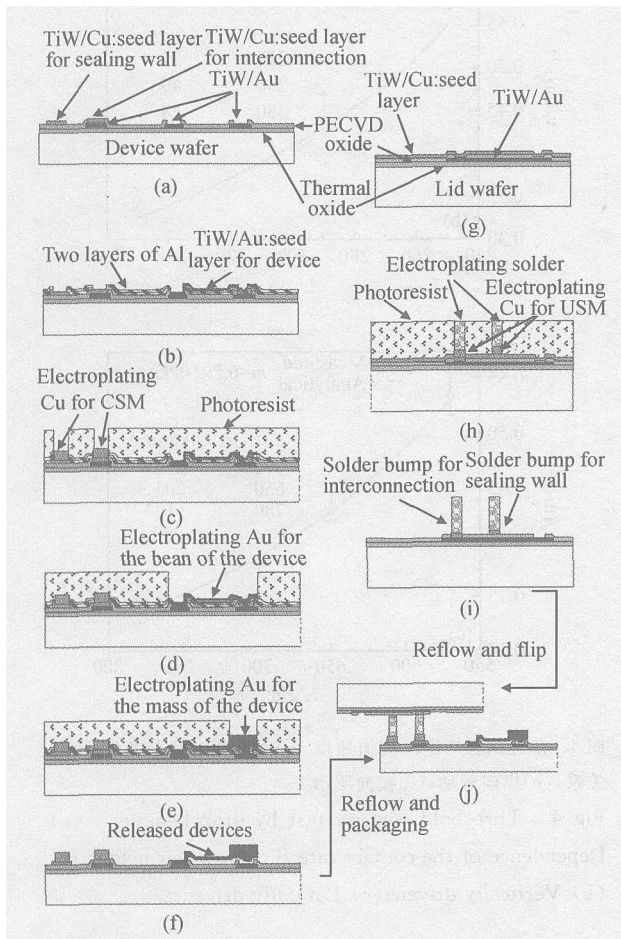


图 2 惯性电学开关制造与封装的关键步骤

Fig. 2 Schematic process flow for the fabrication and packaging of inertia micro-switches

Clariant 公司的 AZ U TP92 是一种同时具有高浓度和高透明度的光刻胶, 我们用它作为电镀金的注模. 在传统的甩胶机上, 以 700r/min 的转速可以铺设 30μm 厚的胶. 用碱性显影液 (AZ400K H₂O

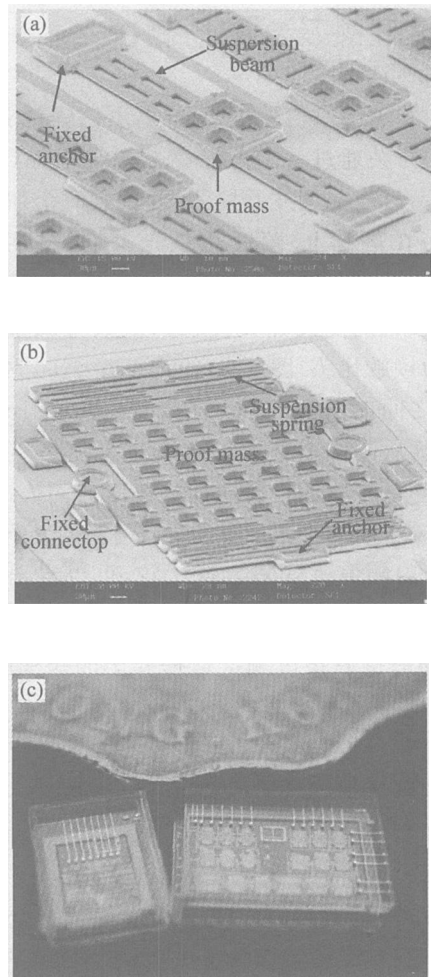


图 3 制造与封装完的器件 (a) 纵向驱动; (b) 横向驱动; (c) 玻璃为顶盖而封装的芯片

Fig. 3 Fabricated and packaged devices (a) Vertically driven; (b) Laterally driven; (c) Devices packaged using glass lids

顶盖晶片分别选用普通硅片和玻璃. 在溅射了种子层钛钨/铜复合层后(图 2(g)), 先电镀 5~7 μm 厚的铜作为柱下金属层(under-bump metal, UBM), 随后电镀锡/铅(Sn₆₃ Pb₃₇) 共熔焊料, 形成互连线和密封壁(图 2(h)). 密封壁的高度一定要高于开关的高度. 将 Shipley 公司的 Ronetch PS 与硫酸和水混合液及双氧水分别去掉种子层钛钨/铜. 此后将样片放入炉腔内进行焊料回流, 使焊料和 UBM 的界面处形成牢固的金属连接(图 2(i)). 此时可以倒装顶盖晶片使之与器件晶片键合, 完成密封封装. 整个回流键合过程中, 最高温度只有 220 $^{\circ}\text{C}$, 不会损害预先做好的电子器件. 图 3(c) 是封装好的芯片.

4 惯性开关及封装的测试

惯性开关的阈值速度 v_t 可以用落锤试验确定. 被测试的开关通过一个 1k Ω 的限流电阻接到 3V 的电压源上. 信号由示波器检测. 开关和一个加速度计同时固定在落锤上. 落锤从预先设定的高度 H 落下, 碰撞时开关接触的信号和加速度计的信号都被记录下来. 我们定义开关接触的次数与试验下落次数之比为接触比 B . 图 4(a) 绘出一个纵向驱动器器件 B 和 H 之间的关系. 可以看到, 当 H 从 1cm 升到 2cm 时, B 从 0 逐渐升到 1. 我们定义使 B 为 0.5 的高度 H 落下的落锤在碰撞前的速度为阈值速度 v_t . 图 4(b), (c) 分别给出了纵向和横向驱动开关实测和分析而得阈值速度的数据比较, 可以看出两者吻合得很好.

振动台试验用以测试惯性开关的频率响应. 同样, 开关和一个加速度计均被固定在振动台上. 在简谐信号的驱动下, 相应的接触比率 B 被定义为每振动周期的平均接触次数(图 5(a)), 图 5(b) 绘出了 B 和谐振频率 f 之间的关系. 对于纵向驱动和横向驱动的开关, 其相应的 B 的最大值(定义为 B_{max}) 分别为 1 和 2. 共振频率即为频率响应中 B_{max} 处的中心值. 可以看到, 纵向驱动和横向驱动的开关的共振频率分别为 6.2 和 7.9kHz. 两者都在设计值的 7% 的误差范围内. 最大值的 1/2 处的 B 值所对应的频率之间的范围定义为带宽. 由此可知横向驱动开关的带宽为 0.4kHz, 比纵向驱动的 1.0kHz 要小. 考虑到纵向驱动开关因压膜效应而产生较大的阻尼, 这一结果是合理的.

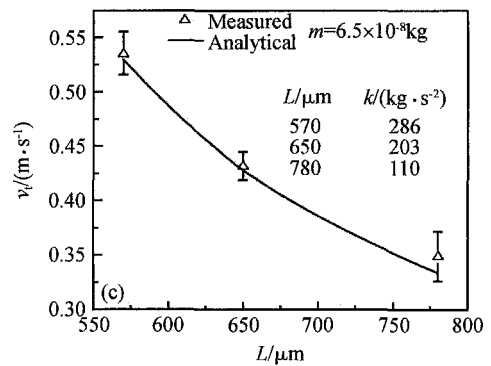
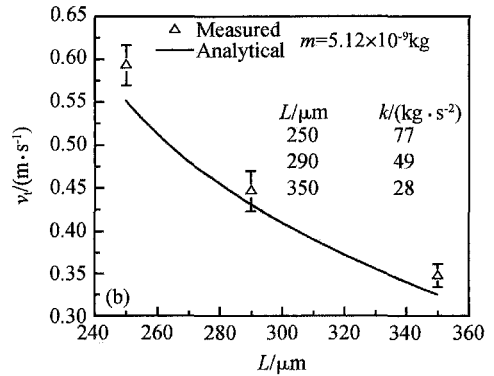
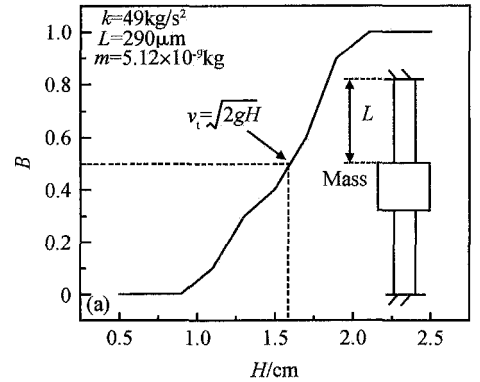


图 4 落锤试验测量的阈值速度 (a) 接触比 B 与高度 H 的关系; (b) 纵向驱动; (c) 横向驱动
 Fig. 4 Threshold velocity test by drop hammer (a) Dependence of the contact rate B on hammer height H ; (b) Vertically driven; (c) Laterally driven

封装的键合强度用 Dage 4000 T 剪切试验测试机测定. 剪切力作用在器件和顶盖芯片键合的界面处. 剪切头的速度为 0.1mm/s. 设计的密封壁的宽度从 50 到 450 μm 不等. 剪切应力即为剪切力除以键合面积. 定义使焊料开始屈服的最小值为临界剪切应力(图 6(a)), 测得的剪切应力约为 30MPa, 与键合面积无关(图 6(b)). 剥离通常发生在焊料和 CSM 的界面处.

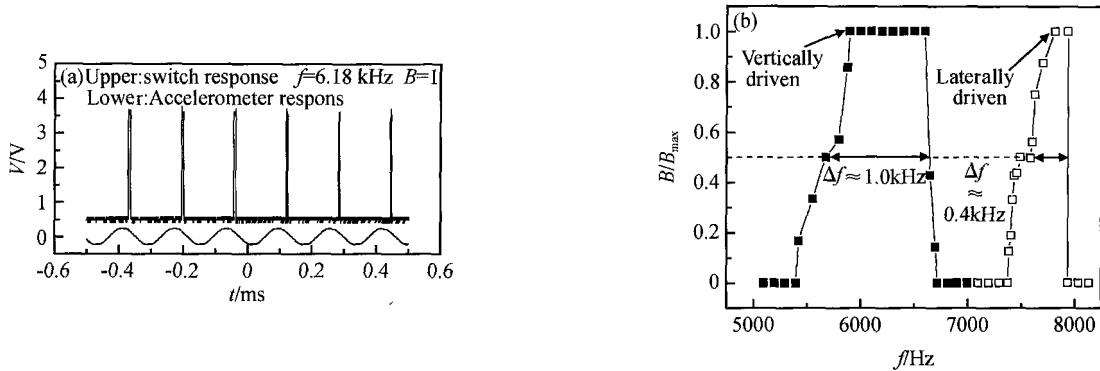


图 5 振动台试验 (a) 纵向驱动开关在驱动为谐振频率时的响应; (b) 开关接触比与振动台频率的关系

Fig. 5 Shaker test (a) Response of vertically driven switch on natural frequency; (b) Dependence of switch contact rate on shaker frequency

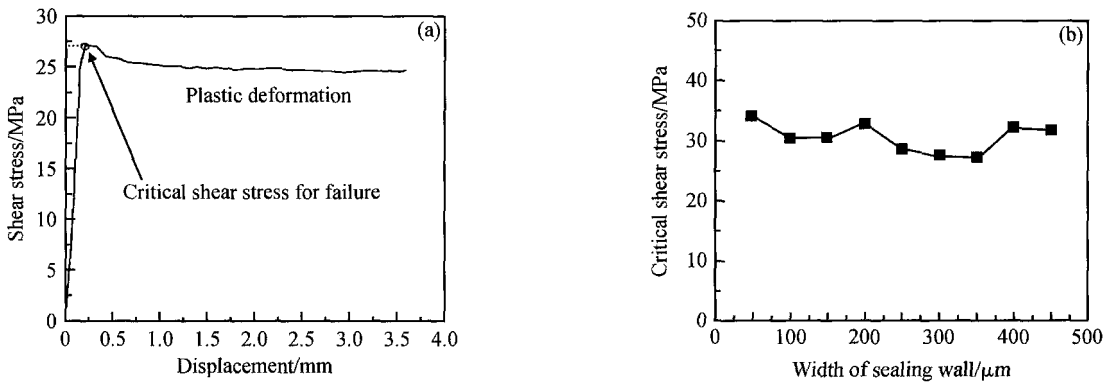


图 6 焊料键合强度的测试 (a) 300μm 密封壁的应力-位移曲线; (b) 临界剪切应力与密封壁宽的关系

Fig. 6 Solder bonding strength test (a) Typical stress-displacement characteristic of a 300μm wide sealing wall; (b) Critical shear stress versus width of sealing wall

对密封腔的气密性做了细检和粗检两种测试. 首先进行细检, 按照 MIL-STD-883, 方法 1014 进行. 将封装好的样片放入具有 3 个大气压的纯氦环境中 6h 后, 用氦气检测仪检测其氦气泄漏率. 测得的结果列于表 1. 可以看到, 密封腔的气密性满足其相应的标准.

表 1 密封腔气密性的细检结果

Table 1 Fine leak test results of the sealed cavity hermeticity

密封腔体积/L	泄漏率/(mbar · L · s ⁻¹)	标准/(mbar · L · s ⁻¹)
0.5 × 10 ⁻⁶	(1.81 ~ 2.97) × 10 ⁻⁹	3.41 × 10 ⁻⁷
1.1 × 10 ⁻⁶	(2.35 ~ 5.92) × 10 ⁻⁹	3.47 × 10 ⁻⁷
1.5 × 10 ⁻⁶	(1.92 ~ 6.01) × 10 ⁻⁹	3.26 × 10 ⁻⁷

粗检要在细检过后进行. 粗检是将顶盖芯片为玻璃的样片直接放入水中. 检测结果没有发现有水进入密封腔体内.

互连电阻可用范德堡电桥测得(图 7), 测量电

流加在电极 1 和 A 上, 相应的电压可从电极 2 和 B 上测得, 测得电阻约为 12 .

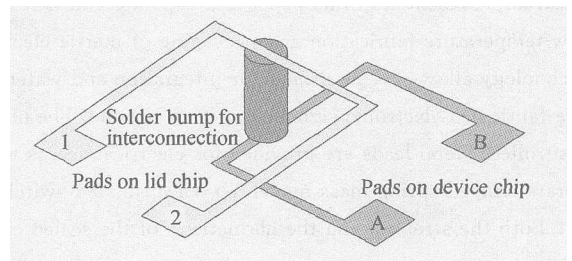


图 7 范德堡电桥测量互连电阻的示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the Van der Pauw structure for interconnection resistance measurement

5 总结

使用铺设光刻胶为注模的多次互不干扰的低温金属电镀技术, 包括金、铜和铅锡焊料实现了惯性微型电学开关的制造, 并将其密封封装. 其低温过程

(< 220)可使开关集成于预先制作好的含有电子信号处理电路的基底上. 开关的高度和它的密封腔的高度可以分别控制, 电子信号可以通过低电阻的金属互连线进入密封腔体. 测得键合的临界剪切应力约为 30MPa. 对腔体的密封性进行了粗、细两种方法的检测, 均符合要求. 惯性开关按照一个简单但是准确的“弹簧-质量块”模型设计, 落锤试验和振动台试验分别检测了设计结构.

参考文献

- [1] Michaelis S, Timme H J, Wycisk M. Additive electroplating technology as a post-CMOS process for the production of MEMS acceleration-threshold switches for transportation applications. *J Micromech Microeng*, 2000, 10:120
- [2] Zhang Zhengyuan, Wen Zhiyu, Xu Shiliu. RF MEMS switch on poly-silicon substrate. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23:914
- [3] Gillo K. Overview of new packages, materials and processes. *International Symposium on Advanced Packaging Materials*, 2001:1
- [4] Loechel B. Thick layer resists for surface micromachining. *J Micromech Microeng*, 2000, 10:108
- [5] Ruythooren W, Attenborough K, Beerten S. Electrodeposition for the synthesis of microsystems. *J Micromech Microeng*, 2000, 10:101
- [6] Engelmann G, Ehrmann O, Simon J. Fabrication of high depth-to-width aspect ratio microstructures. *MEMS '92*, 1992:93
- [7] Ma W, Zohar Y, Wong M. Design and characterization of inertia-activated electrical micro-switches fabricated and packaged using low temperature photoresist molded metalelectroplating technology. *J Micromech Microeng*, 2003, 13:892
- [8] Ma W, Li G, Zohar Y. Fabrication and packaging of inertia micro-switch using metalelectroplating technology. *MEMS '03*, 2003:610
- [9] Tilmans H A C, Van de Peer M D J, Beyne E. The indent reflow sealing (IRS) technique — a method for the fabrication of sealed cavities for MEMS devices. *J Microelectromech Syst*, 2000, 9(2):206

Fabrication and Packaging of an Inertia Electrical Micro-Switch Using Low Temperature Metal-Electroplating Technology

Ma Wei¹, Yitshak Zohar¹, and Wong Man^{2,†}

(1 Department of Mechanical Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hongkong, China)

(2 Department of Electrical and Electronic Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hongkong, China)

Abstract: Presented in this paper is a separate and non-interfering photoresist-molded, metal-electroplating technology for the low-temperature fabrication and packaging of inertia electrical micro-switch. The low temperature process of the electroplating technology allows eventual modular integration and wafer-level packaging of the micro-switches on active substrates containing pre-fabricated electronic signal-processing circuits. The height of the inertia micro-switch and that of its cavity are independently controlled. Metal leads are provided for electrical access to the sealed cavities. The switches are designed using a simple but accurate lumped spring-mass model. Un-encapsulated switches making over 100 million contacts are demonstrated in room ambient. Both the strength and the hermeticity of the sealed cavity are tested and reported.

Key words: inertia micro-switch; threshold acceleration; electroplating; packaging; eutectic solder-bonding; hermeticity
EEACC: 2180B

Article ID: 0253-4177(2005)06-1239-06

Ma Wei PhD. She is engaged in research on post-CMOS process, design and fabrication of MEMS devices.

Yitshak Zohar professor. He is engaged in research on microfluid theory and MEMS process.

Wong Man male, professor. He is engaged in research on display technique and MEMS.

† Corresponding author, Email: eemwong@ee.ust.hk

Received 21 October 2004, revised manuscript received 27 February 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics