

文章编号 1004-924X(2018)05-1133-07

无源 MEMS 压力开关的设计与制备

刘益芳^{*}, 陈丹儿, 戴婷婷

(厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 为了克服传统机械式和电子式压力开关的体积大、制作工艺复杂以及不易与后续电路集成等缺点, 论文采用具有金属引线台阶覆盖能力的玻璃浆料封装技术进行了无源 MEMS 压力开关的设计和制备。设计的无源 MEMS 压力开关的整体结构方案主要包括硅盖板上的压力敏感膜、硅岛、上电极和微阻挡凸台以及玻璃基底上的玻璃浆料和下电极。通过仿真优化了压力敏感膜、硅岛和上下电极的关键尺寸。经过三次湿法腐蚀工艺流程制得了双阻挡凸台、硅岛和感压膜片。通过玻璃浆料热压工艺将硅盖片、玻璃基底和金属引线三者键合成一体, 工艺结果显示双阻挡凸台的高度和感压膜片的厚度很好地控制在 $8\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}$, 而且经测试, MEMS 压力开关的阈值压力为 125 kPa。

关键词: MEMS 压力开关; 结构设计; 湿法腐蚀; 玻璃浆料封装

中图分类号: TH765.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182605.1133

Design and fabrication of passive MEMS pressure switch

LIU Yi-fang^{*}, CHEN Dan-er, DAI Ting-ting

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

^{*} Corresponding author, E-mail: yfliu@xmu.edu.cn

Abstract: In order to overcome the shortcomings of traditional mechanical and electronic pressure switches, such as the production process is complex and it is difficult to integrate with the follow-up circuit, bulky and so on, the design and preparation of passive MEMS pressure switch were developed by using glass frit encapsulation technology with metal lead coverage in this paper. The overall structure of the passive MEMS pressure switch was designed to include the pressure sensitive film, the silicon island and the upper electrode on the silicon cover and the micro-barrier bumps, the glass paste and the lower electrode on the glass substrate. The key dimensions of pressure sensitive film, silicon islands and upper and lower electrodes were optimized by simulation. After three wet etching processes, double barrier bump, silicon island and pressure sensitive film were fabricated. The silicon cover, the glass substrate and the metal lead were then bonded together as a whole by glass frit thermal-pressure bonding process. The results show that the height of the double-barrier bumps and the thickness of the pressure-sensitive film are well controlled at $8\ \mu\text{m}$ and $50\ \mu\text{m}$, respectively. And the threshold pressure of the MEMS pressure switch is 125 kPa.

Key words: Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) pressure switch; structural design; wet etching; glass frit encapsulation technology

收稿日期: 2017-09-15; 修订日期: 2017-11-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61404111)

1 引言

传统的机械式压力开关在工作过程中容易引起可活动部件卡涩,导致误动作或拒动作。而且,机械式压力开关体积大,不易与后续电路集成。与机械式压力开关相比,电子式压力开关寿命长,精度高,抗冲击和振动,压力测量范围大,长期稳定性好。但由于微处理器的存在,易受电磁干扰,制备工艺复杂,成本高。随着微电子机械系统(MEMS)的发展与成熟,一些学者开始研究利用 MEMS 技术和工艺来制备 MEMS 压力开关^[1]。无源 MEMS 压力开关将传统的宏观压力开关电气属性和 MEMS 器件属性合并,在保留传统机械式压力开关工作可靠性的同时,实现小体积、轻质量、低功耗、便于与 IC 电路集成等特点,顺应了机械电子设备越发微型化、集成化的发展趋势。

针对压力测量的压力传感器发展已经相当成熟,但是,除了射频微机械开关^[2-5]外,对 MEMS 压力开关的研究数量较少,其始于上个世纪九十年代。1990 年,DW De Bruin 等人设计了一款 MEMS 压敏开关,在刻蚀的硅膜片上制作 21 个金属开关触点阵列^[6]。由于触点数量较多,厚度不一,作用于不同压力条件时不能预先知道哪些触点会导通,因此在制备过程中要对压力阈值进行不断地标定。Kai Hiltmann 等人从硅膜片本身机械强度和满足安全开关性能的硅片延展率两个角度,对微机械膜片开关的最小尺寸进行了实验探究^[7],但最终制得的压力开关的金属触点电接触问题有待提高。2003 年,Kai Hiltmann 的团队创新性地将硅膜片直接封装到传统印刷电路板上,组成混合开关^[8],但封装方式有待于进一步探索。张谦等人于 2012 年发明了一种基于 MEMS 技术的压力开关^[1],金属电极采用蒸镀的工艺制备,材料可为铝、金、铜或银,通过引线和导电柱完成与外界的电气连接,电极引出方式较为复杂。

虽然 MEMS 压力开关的研究取得了一定的进展,但开关研制过程中仍然存在电接触问题和封装问题等。设计更持久耐用,更少粘附,更小相互扩散趋势的金属化方案,是未来的发展目标。金属引线的存在对封装方式提出了很大挑战,例如微机电系统中常见的铝引线,在高温下容易与 Si 形成合金,也容易与 SiO₂ 发生反应,从而破坏

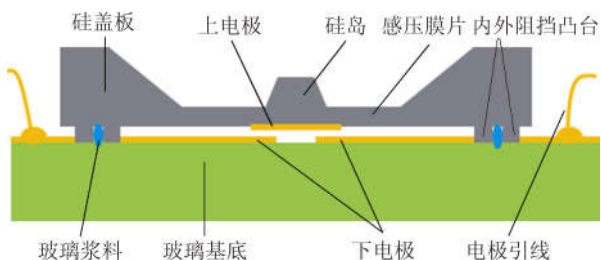
器件的稳定性和可靠性^[9-10]。选择封装的键合方式的时候必须考虑与金属引线工艺的兼容性。

为此,考虑到材料的电阻率、硬度和接触力等性能以及结合实际溅射工艺条件,本文采用金(Au)作为下电极材料,铜(Cu)作为上电极材料。一软一硬的金属电极,可以保证可靠接触并降低材料粘附失效的可能。此外,采用对界面兼容性好、金属引线台阶覆盖能力强以及键合材料适应性广的玻璃浆料键合技术进行无源 MEMS 压力开关的带引线直接封装。

2 无源 MEMS 压力开关的结构设计

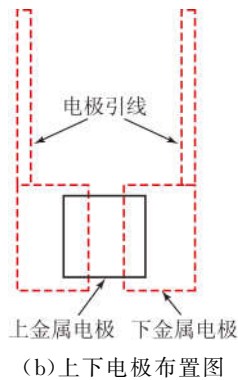
本压力开关拟应用在航空航天和军工领域,工作阈值压力拟为 90 kPa,使用温度为 -40 °C ~ 80 °C,单刀单掷,弹性元件厚度误差 ±2 μm,具备压力敏感功能和控制电路通断功能。

压力开关的整体结构如图 1 所示,主要包括硅盖板,玻璃基底和金属电极。在晶圆片上刻蚀出感压膜片和硅岛结构,用于感受和传递压力变化。为了便于观察键合界面形貌和器件内部结构,选用透明的 BF33 玻璃作为基底。上下电极分别溅射在硅盖板和玻璃基底上,当压力超过设定值时上下金属电极桥接,电路导通,向外输出信号。在这个过程中,无需诸如静电力等外界驱动源给开关输入能量,开关仅在感测压力的作用下发生张合的动作,则称无源 MEMS 压力开关。玻璃浆料作为晶圆结构层和玻璃基底之间的中间键合层覆盖住金属引线,通过热压键合将硅片、玻璃基底和金属引线紧密封接在一起。玻璃浆料的内外两侧设计有微阻挡凸台,用于避免多余玻璃浆料的泛滥流动以及精确控制封接中间层的厚度^[11-12]。



(a) MEMS 压力开关整体方案简图

(a) Cross-sectional sketch of MEMS pressure switch



(b) Arrangement of the upper and lower electrodes

图 1 MEMS 压力开关的结构以及电极布置图

Fig. 1 Structure of the MEMS pressure switch and the arrangement of the electrodes

2.1 触点电极尺寸的设计

基于金属电极溅射工艺的实际特点,电极厚度越大,越容易因为应力而剥落,本文设定上下金属电极的厚度均为 $1\ \mu\text{m}$ 。压力开关的目标尺寸控制在 $8\ \text{mm}\times 8\ \text{mm}$ 以内,减去预计封接尺寸 $3\ \text{mm}$,感压膜的横向尺寸不超过 $5\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$ 。取上电极尺寸 $1.4\ \text{mm}\times 1.4\ \text{mm}$,下电极尺寸 $1.2\ \text{mm}\times 1.8\ \text{mm}$,它们的布置方式如图 1(b)所示。为进一步缩减器件尺寸,电极引线从同一侧引出,线宽为 $0.2\ \text{mm}$,厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 。

2.2 压力敏感结构的设计

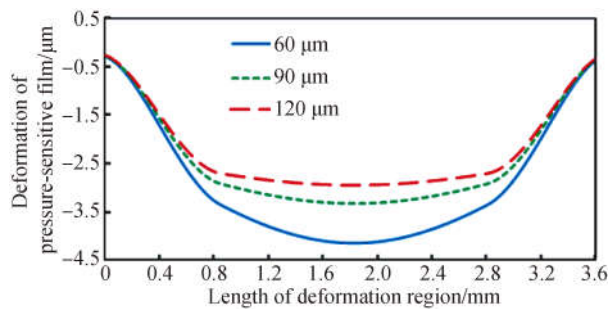
玻璃浆料封接层厚度为 $8\ \mu\text{m}$,减去上下金属电极的厚度,则感压膜的变形量要求为 $6\ \mu\text{m}$ 。所以,在工作阈值压力为 $90\ \text{kPa}$ 时,感压膜片达到 $6\ \mu\text{m}$ 的挠度变形量,中心平动区域超过上电极尺寸即 $1.4\ \text{mm}\times 1.4\ \text{mm}$,同时,最大等效应力不超过硅的许用应力 $300\ \text{MPa}$ 。初步设定硅盖板的横向尺寸为 $8\ \text{mm}\times 8\ \text{mm}$,感压膜的横向尺寸为感压膜的横向尺寸为 $4\ \text{mm}\times 4\ \text{mm}$ 。根据满足小挠度变形理论的单晶硅膜片应力要求^[13], $4\ \text{mm}\times 4\ \text{mm}$ 的压力敏感膜,其膜厚应大于 $25\ \mu\text{m}$,则取感压膜片厚度为 $50\ \mu\text{m}$ 。

(1) 硅岛高度

固定感压膜边长 $4\ \text{mm}$,硅岛边长 $2\ \text{mm}$ 。设置硅岛高度分别为 $60\ \mu\text{m}$ 、 $90\ \mu\text{m}$ 、 $120\ \mu\text{m}$,其挠度变形曲线如图 2(a)所示。由仿真结果可知:硅岛的高度尺寸越大,感压膜片的平动特性更好,但挠度形变量相对减小。

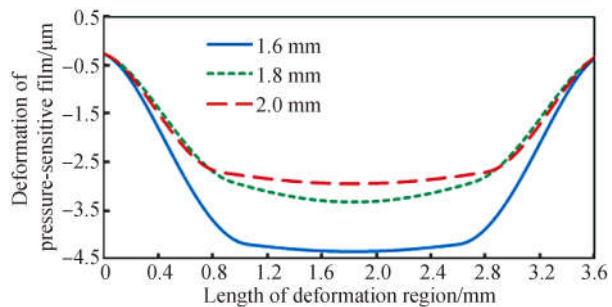
(2) 硅岛边长

固定硅岛厚度为 $120\ \mu\text{m}$,感压膜边长 $4\ \text{mm}$ 。设置硅岛边长分别为 $1.6\ \text{mm}$ 、 $1.8\ \text{mm}$ 、 $2\ \text{mm}$,挠度曲线仿真结果如图 2(b)所示。从中可以看出,减小硅岛的边长,可以增加形变量,同时平动区域面积略有减小。硅岛边长是决定挠度变形的一个重要参数。



(a) 不同硅岛高度对应的挠曲线图

(a) Deformation varies with the height of the silicon island



(b) 不同硅岛边长对应的挠曲线

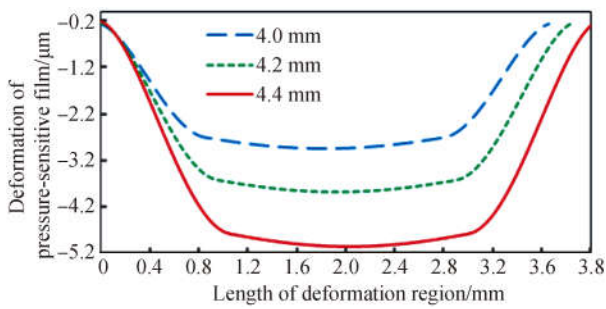
(b) Deformation varies with the length of the silicon island

图 2 不同硅岛高度和边长下的感压膜的挠度

Fig. 2 Deformation of pressure-sensitive film at different height and length of silicon island

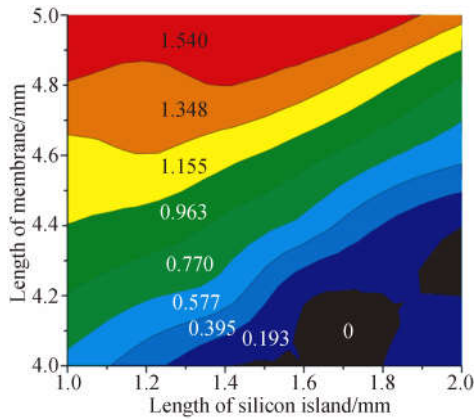
(3) 感压膜片边长

固定硅岛高度为 $120\ \mu\text{m}$,硅岛边长 $2\ \text{mm}$ 。设置感压膜片的边长分别为 4 、 4.2 、 $4.4\ \text{mm}$,其挠度变形曲线如图 3(a)所示。随着膜片边长的增加,膜片的变形量有了很大提高,说明膜片边长是一个重要的调控参量。同时,膜片边长对挠度变形量的影响权重大于硅岛高度和硅岛边长,膜片边长增加 10% 挠度形变量增大了 $2\ \mu\text{m}$,而硅岛高度需增加一倍,硅岛边长需增加 25% ,才能达到同样的挠度形变量。



(a)不同膜片边长对应的挠曲线图

(a) Deformation varies with length of membrane



(b)不同膜片边长及硅岛边长条件下感压膜片变形量达到 $6 \mu\text{m}$ 的平动区域直径统计分布图

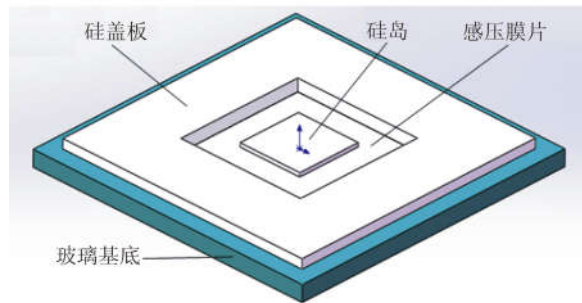
(b) Diameter distribution when deformation of pressure sensitive membrane reaches $6 \mu\text{m}$ at different lengths of membrane and silicon island

图 3 感压膜的挠度随着膜片边长的变化趋势以及感压膜的平动区域直径统计图

Fig. 3 Deformation of pressure sensitive membrane varies with length of membrane and diameter distribution of translational area

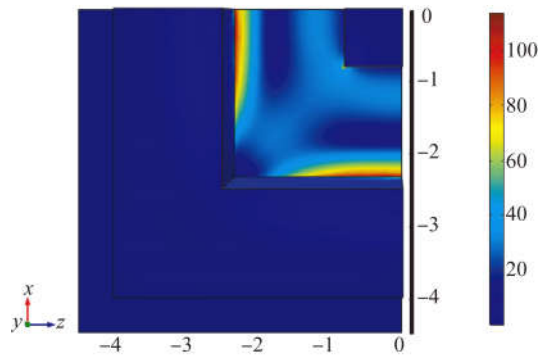
根据上述结果,要获得目标挠度变形量以及平动区域,必须在初步尺寸(感压膜边长 4 mm, 硅岛边长 2 mm)的基础上,增大膜片边长,或者减小硅岛边长和高度。硅岛高度为 $120 \mu\text{m}$ 时,膜片整体平动性能好。因此,先将硅岛高度固定为 $120 \mu\text{m}$,研究感压膜片挠度变形量随膜片边长和硅岛边长的变化趋势。仿真统计数据如图 3(b) 图所示。可以看出,当膜片边长为 5.0 mm, 硅岛边长在 1.0~1.8 mm 之间变化时,感压膜片变形量达到 $6 \mu\text{m}$ 的平动区域直径大于 1.4 mm, 满足设计要求。则选定膜片边长 5.0 mm, 硅岛边长 1.6 mm。

当压力敏感结构感压膜为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 50 \mu\text{m}$ 以及硅岛为 $1.6 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm} \times 120 \mu\text{m}$, 如图 4(a) 所示。由于结构的对称性,取其 1/4 进行仿真优化,如图 4(b) 所示,以此组尺寸参数进行仿真分析可知最大等效应力点出现在感压膜片四条边的中点上,接近 120 MPa, 在许用安全范围内。如图 4(c) 所示,感压膜片挠度变形量达到 $6 \mu\text{m}$ 的平动区域直径为 1.54 mm, 其变形区域实际为近圆形。



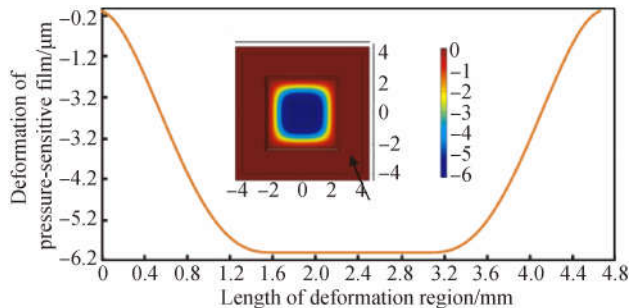
(a)带硅岛结构的仿真模型

(a) Simulation model with silicon island structure



(b)等效应力分布图

(b) Von Mises stress



(c)挠曲线变化图

(c) Deformation of pressure-sensitive membrane

图 4 仿真模型、等效应力以及挠度变化图

Fig. 4 Simulation model, Von Mises stress and deformation curve

3 无源 MEMS 压力开关的制备

感压膜片和双阻挡凸台是 MEMS 压力开关的核心结构,工艺设计重点围绕如何在硅盖板上制备微米量级的膜片和双阻挡凸台进而构成整个压力开关而展开的,其工艺流程如图 5 所示。

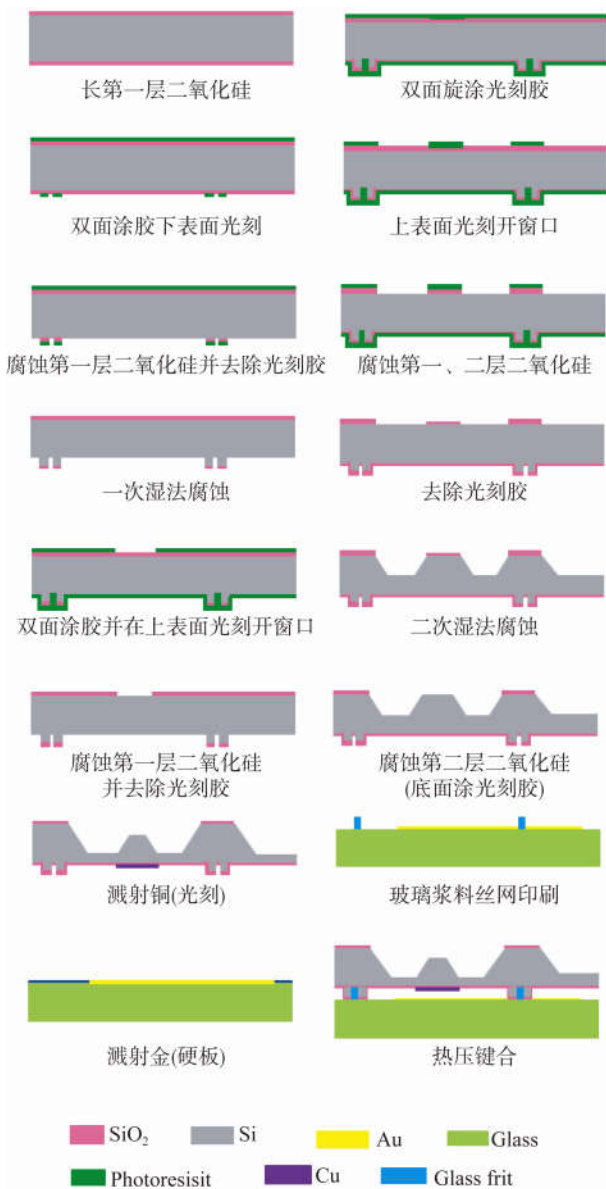


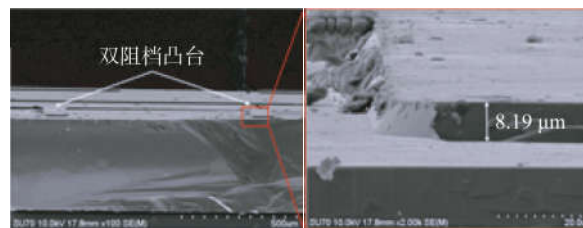
图 5 无源 MEMS 压力开关的工艺流程图

Fig. 5 Process flow diagram of passive MEMS pressure switch

硅盖板的制备主要是通过三次湿法腐蚀工艺^[14],分别形成了双阻挡凸台、硅岛和感压膜片。

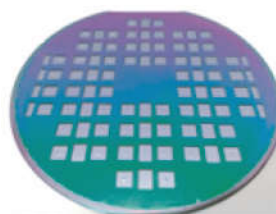
金属电极 Cu 和 Au 分别采用了光刻和硬板的方式进行制备。Cu 电极溅射在硅盖板上双阻挡凸台一侧,因双阻挡凸台的高度为 $8\ \mu\text{m}$,所以 Cu 电极的图案化制备采用光刻-溅射-剥离的方法进行。Au 电极溅射在玻璃基底上,考虑到厚为 $2.5\ \text{mm}$ 的玻璃基底在键合后不易划片,因此先将 4 寸玻璃片划成小单元,再采用不锈钢硬板作为掩膜层进行 Au 电极的溅射。

双阻挡凸台腐蚀后的截面图如图 6(a)、(b)所示,其平均厚度为 $8.19\ \mu\text{m}$,与设计值 $8\ \mu\text{m}$ 很接近。感压膜片和硅岛结构的腐蚀结果的正面视图如图 6(c)、(d)所示,厚度方向的横截面图如图 6(e)所示。硅岛结构在腐蚀后呈山丘形状,顶端没有足够大的面积,厚度约为 $108.6\ \mu\text{m}$,边长约为 $1\ \text{mm}$,与设计目标(厚度 $120\ \mu\text{m}$,边长 $1.6\ \text{mm}$)存在较大误差。虽然硅岛结构的尺寸与设计目标不符,但从仿真分析可知,在选用合适的膜片厚度和边长之后,硅岛高度对膜片的挠度变形已经没有明显的调控作用,因此硅岛腐蚀结果对开关性能影响不大,对其实际尺寸的变化也可忽略不计。感压膜片的厚度截面图如 6(f)所示,感压膜片的平均厚度为 $50.1\ \mu\text{m}$,满足后续实验要求。



(a) 双阻挡凸台截面图
(a) Cross-section of double blocking bumps

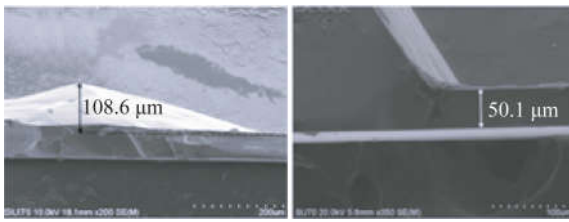
(b) 双阻挡凸台放大图
(b) Close-up picture of double blocking bump



(c) 感压膜片和硅岛结构的整体正面视图
(c) Whole view of pressure sensitive membrane and silicon island



(d) 感压膜片-硅岛 SEM 截面图
(d) Cross-section of pressure sensitive membrane and silicon island



(e) 硅岛厚度截面图 (f) 感压膜片厚度截面图
(e) Thickness of silicon island (f) Thickness of pressure sensitive membrane

图 6 双阻挡凸台、感压膜片和硅岛结构湿法腐蚀结果
Fig. 6 Wet etching results of double blocking bumps, pressure sensitive membrane and silicon island

热压键合时,将制作了上金属电极、感压膜片以及硅岛结构的硅盖板和制作了上金属电极以及丝网印刷上玻璃浆料并预烧结后的玻璃基底用去离子水清洗,在 100 °C 烘箱中烘 60 min,放入不锈钢硬板中对准贴合,硅盖板在下,玻璃基板在上,最后放在 AWB04 芯片键合机承片台上进行热压键合。

4 无源 MEMS 压力开关性能测试

对封装后的压力开关进行性能参数测试,测试系统如图 7 所示,包括压力气源、真空泵、压力控制仪 (GE Druck PACE6000,精度为 0.01% FS)、真空测试腔 (自制)、直流电源 (GWINSTEK GPD-3303S)、数字万用表和各種管路、线路。压力控制仪连接真空泵及高压气源,控制测试腔内的压力,压力开关两个电极引线接入测试腔可伐针,可伐针外部连接数字万用表和电源。

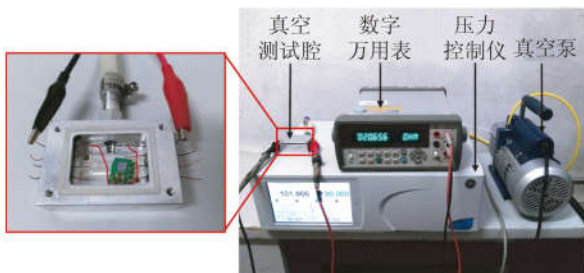


图 7 压力开关测试系统

Fig. 7 Test system of MEMS pressure switch

按照设计指标,压力开关在大气环境中 (101 kPa) 应处于超行程状态,触点电极导通,可以测量开关电阻值。然而封装完的压力开关器件在大气环境中没有阻值信号输出,说明压力膜片在

大气环境下未贴合上。因此,对压力开关施加正压进行测量。从 100 kPa 开始,逐步增加压力值,每 5 kPa 记录一次电阻值,测量结果如图 8 所示。

图 8 是测试过程中器件的总电阻随压力的变化曲线,当施加压力为 105 kPa 时,可以检测到电阻值,说明此时电极已导通。当压力超过 125 kPa,电阻值基本保持不变,压力开关达到稳定工作状态,因此该开关的工作阈值压力为 125 kPa。与仿真数据 (90 kPa) 相比,测试结果中压力开关的工作阈值压力增加了 35 kPa,主要原因包括:(1) 经过玻璃浆料键合封装的压力开关,其腔体内的压强达不到绝对真空,因而增加了阈值压力;(2) 压力开关的研究制备周期较长,在此期间金属电极因氧化而产生薄膜电阻,上下电极之间需要克服更大的接触压力才能形成可靠接触,间接导致了工作阈值压力的增大。

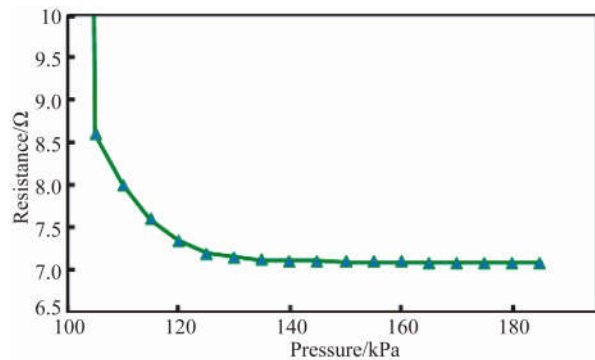


图 8 开关总电阻随压力的变化曲线

Fig. 8 Total resistance of switch varies with pressure

5 结 论

本文通过仿真设计了无源 MEMS 压力开关的整体结构方案,在确定电极材料和电极尺寸之后,以感压膜变形的平动区域为主要依据优化了压力敏感结构的硅岛边长、硅岛高度和感压膜边长等重要结构尺寸。设计了无源 MEMS 压力开关的制备工艺流程,通过三次湿法腐蚀工艺形成了双阻挡凸台、硅岛和感压膜片。金属电极 Cu 和 Au 分别采用了光刻和硬板的方式进行制备。工艺结果显示双阻挡凸台的高度和感压膜片的厚度很好地控制在 8 μm 和 50 μm。硅岛尺寸和仿真结果虽然有差异,但未对其性能产生影响。性能测试结果表明 MEMS 压力开关的阈值压力为 125 kPa。

参考文献:

- [1] 张谦,王焱秋.一种基于 MEMS 技术的压力开关:中国,101964272B [P]. 2012-09-26.
ZHANG Q, WANG Y Q. Pressure switch based on micro-electromechanical system technology: CN, 101964272B [P]. 2012-09-26. (in Chinese)
- [2] REBEIZ G M, PATEL C D, HAN S K, *et al.*. The search for a reliable MEMS switch [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2013, 14(1):57-67.
- [3] BALAJI K, BARANICHANDAR K. Design and analysis of MEMS switch for RF applications [J]. *International Journal of Scientific Research and Management*, 2015, 3(1):1931-1935.
- [4] MAJUMDER S, LAMPEN J, MORRISON R, *et al.*. MEMS switches [J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2003, 6(1):12-15.
- [5] SUN J F, LI Z Q, ZHU J, *et al.*. Design of DC-contact RF MEMS switch with temperature stability [J]. *AIP Advances*, 2015, 5(4):041313.
- [6] DE BRUIN D W, ALLEN H V, TERRY S C, *et al.*. Electrically trimmable silicon micromachined pressure switch [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1990, 21(1-3):54-57.
- [7] HILTMANN K, LANG W. Optimization of micromachined membrane switches [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1997, 7(3):240-243.
- [8] HILTMANN K, WOLF E, SANDMAIER H. Hybrid micromachined push-button switches [C]. *Proceedings of the 49th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, IEEE, 2003:219-222.
- [9] 杨雪梅. 大电流密度器件的欧姆接触 [J]. *半导体光电*, 2002, 23(4):274-276.
- YANG X M. Ohmic contact of high-current-density devices [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2002, 23(4):274-276. (in Chinese)
- [10] 许薇,王玉传,罗乐. 玻璃浆料低温气密封装 MEMS 器件研究 [J]. *功能材料与器件学报*, 2005, 11(3):343-346.
XU W, WANG Y CH, LUO L. Wafer-level hermetic package of MEMS by glass solder at low temperature [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2005, 11(3):343-346. (in Chinese)
- [11] 刘益芳,王凌云,孙道恒,等. 玻璃浆料键合中的孔洞抑制和微复合调控 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4):780-787.
LIU Y F, WANG L Y, SUN D H, *et al.*. Void suppression and micro composite regulation in glass frit bonding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4):780-787. (in Chinese).
- [12] LIU Y F, CHEN D E, LIN L W, *et al.*. Glass frit bonding with controlled width and height using a two-step wet silicon etching procedure [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2016, 26(3):035018.
- [13] SAN H S, ZHANG H, ZHANG Q, *et al.*. Silicon-glass-based single piezoresistive pressure sensors for harsh environment applications [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, 23(7):075020.
- [14] 曾毅波,王凌云,谷丹丹,等. 超声技术在硅湿法腐蚀中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1):166-171.
ZENG Y B, WANG L Y, GU D D, *et al.*. Application of ultrasonic technology to wet etching of silicon [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):166-171. (in Chinese).

作者简介:



刘益芳(1976—),女,福建莆田人,副教授,1999年和2002年于东南大学分别获得学士学位和硕士学位,2010年于厦门大学获得博士学位,主要从事 MEMS 传感器、微硅电子隧道陀螺仪的控制与测试和微弱信号检测等方面的研究。E-mail: yfliu@xmu.edu.cn



陈丹儿(1992—),女,广东汕尾人,硕士研究生,2013年于厦门大学获得学士学位,主要从事 MEMS 传感器的研发工作。E-mail: chendaner@stu.xmu.edu.cn