

一种硅四层键合的高对称电容式加速度传感器*

徐玮鹤^{1,2} 车录锋^{1,†} 李玉芳¹ 熊 斌¹ 王跃林¹

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200050)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 提出了一种利用体微机械加工技术制作的硅四层键合高对称电容式加速度传感器. 采用硅/硅直接键合技术实现中间对称梁质量块结构的制作, 然后采用硼硅玻璃软化键合方法完成上、下电极的键合. 在完成整体结构圆片级真空封装的同时, 通过引线腔结构方便地实现了中间电极的引线. 传感器芯片大小为 $6.8\text{mm} \times 5.6\text{mm} \times 1.68\text{mm}$, 其中敏感质量块尺寸为 $3.2\text{mm} \times 3.2\text{mm} \times 0.84\text{mm}$. 对封装的传感器性能进行了初步测试, 结果表明制作的传感器漏率小于 $0.1 \times 10^{-9} \text{cm}^3/\text{s}$, 灵敏度约为 6pF/g , 品质因子为 35, 谐振频率为 489Hz.

关键词: 电容式加速度传感器; 硅/硅键合; 圆片级真空封装

PACC: 0630G; 0710C

中图分类号: TP212.12

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)10-1620-05

1 引言

常用的微机械加速度传感器分为压阻式和电容式两种. 电容式微加速度传感器具有分辨率高、动态范围大、温度特性好等优点, 可以广泛应用在对性能要求较高的领域, 如惯性导航、空间微重力测量及高精度勘探等.

微机械电容式加速度传感器的原理, 是通过感应由于质量块在加速度作用下的微小位移而引起的微小电容变化来检测加速度, 其实现形式总的来说可以分为梳齿式和三明治式两种. 梳齿式加速度传感器工艺较为简单, 但由于其受 ICP 工艺的最大深宽比限制, 很难取得很高的性能; 而三明治式加速度传感器虽然在阻尼、引线等方面的设计比较复杂, 但可以得到比梳齿式加速度传感器更大的电容变化和高质量块质量, 因此, 高性能电容式加速度传感器往往采用三明治结构设计.

键合可以说是三明治电容式加速度传感器的最关键工艺, 它决定了传感器的封装、引线方式甚至整个工艺流程. 目前国内外报道的三明治电容式加速度传感器较常用的键合方式包括硅/玻璃静电键合^[1], 硅/硅直接键合以及金/金热压键合等^[2]. 硅/玻璃键合方案简单可靠, 但是其上电极引线结构复杂, 很难实现气密, 且硅/玻璃键合的温度特性不如硅/硅键合好. 硅/硅直接键合方案键合的强度较高, 器件的温度特性也好, 通常实现两层硅片键合比较

容易, 三层乃至四层硅片的键合则存在一定的困难. 而金/金热压键合则是在硅片两面的键合部分各制作金图形, 在 450°C 和高压下, 金/金之间实现热压键合^[3]. 这种工艺的优点是键合温度低, 可以在键合前预先做好电极引线, 但是它的气密性能不好, 因此就需要对器件进行额外的真空封装.

本文设计、制作了一种高对称电容式加速度传感器, 成功实现了四层硅片键合, 在完成整体结构圆片级真空封装的同时, 通过引线腔结构方便地实现了中间电极的引线, 最后给出了传感器性能的初步测试结果.

2 加速度传感器的设计

2.1 结构设计

通常三明治结构加速度传感器的弹性梁与敏感质量块中心不在同一平面内, 这会造成较大的交叉轴灵敏度, 即非敏感方向上的加速度信号也会引起较大的输出. 为了更好地防止加速度传感器质量块的扭转, 进一步降低其交叉轴灵敏度, 采用了双面梁-质量块结构, 即在质量块的上下两面各制作 4 根对称的梁(见图 1(a)). 同时, 为了获得大的感应面积和抗冲击性, 将梁设计成紧凑的 L 型(见图 1(b)). 整个感应区的尺寸为 $3200\mu\text{m} \times 3200\mu\text{m}$, L 型梁宽 $100\mu\text{m}$, 厚 $40\mu\text{m}$, 长边长 $3500\mu\text{m}$, 短边长 $100\mu\text{m}$, 质量块的厚度为 $840\mu\text{m}$, 质量约 17.5mg .

* 国家高技术研究发展计划资助项目(批准号: 2006AA04Z363)

† 通信作者. Email: lfche@mail.sim.ac.cn

2007-04-10 收到, 2007-05-10 定稿

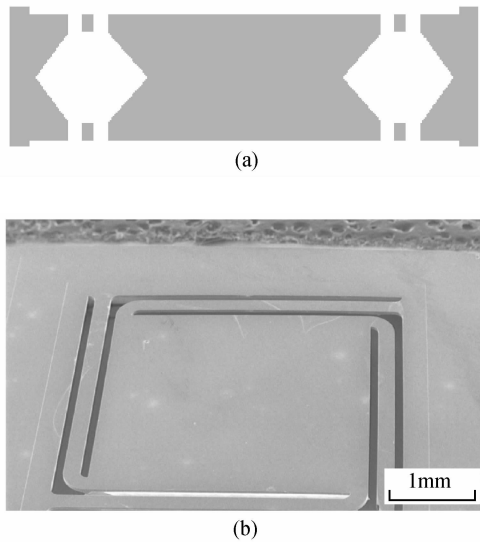


图 1 传感器中间层结构设计 (a) 双面梁-质量块结构; (b) L 形梁的电子显微镜照片

Fig. 1 Design of the mass level of the sensor (a) Double-side cantilever-mass structure; (b) SEM picture of L-shape cantilever

经 ANSYS 模拟, 质量块前六阶模态频率结果如表 1 所示。

定义电容感应面为 xy 平面, 它的法向量为 z 轴. 一阶模态为质量块垂直 xy 平面沿 z 轴的上下运动; 二、三阶模态分别为质量块在 xy 平面沿 x 和 y 轴平动; 四、五、六阶模态为质量块分别绕 x, y, z 轴转动. 从表 1 可以看出, 结构的二、三阶模态为固有频率的 20 倍, 四、五、六阶模态为固有频率的 50 倍. 可见该结构的梁可以有效地抑制交叉耦合, 降低加速度传感器的交叉轴灵敏度。

2.2 阻尼

阻尼对加速度传感器性能的影响有两方面: 一是热机械噪声, 阻尼越大, 热机械噪声越大; 二是加速度传感器的带宽, 当加速度传感器的质量块处于临界阻尼, 即 $Q = 0.5 \sim 0.707$ 时, 传感器的开环带宽可以达到最大值. 若加速度传感器处于过阻尼状态时, 带宽则会变得很小. 若加速度传感器处于欠阻尼状态时, 其开环带宽也会受影响变小, 但在这种情况下, 可以通过闭环电路来对质量块施加电学阻尼从而扩大传感器的带宽。

设计的加速度传感器的质量块质量 m 约为 17.5mg, 电容面为正方形, 边长 B 为 $3200\mu\text{m}$, 电容

表 1 模态分析结果

Table 1 Analysis result of mode status

模态	一	二	三	四	五	六
频率/Hz	532	11601	11601	27039	27040	27043

间隙 d_0 为 $3.5\mu\text{m}$, ω_0 为 532Hz, 公式 (1) 为常压下的 Q 值计算公式^[4]:

$$Q = \frac{md_0^3\omega_0}{2\mu B^4} \quad (1)$$

其中 μ 为常压常温下的空气粘流系数, 取为 $1.8 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$. 由此可以得到常压下加速度传感器中质量块的 Q 值为 4.12×10^{-4} , 阻尼比 $\xi = 1/2Q = 1214$. 显然需要减小质量块的阻尼比才能使加速度传感器具有正常的带宽。

但是, 由于质量块很厚 ($>800\mu\text{m}$), 如果选择开阻尼孔降低阻尼的方式, 质量块质量和电容面积的损失将会很大, 所以选择了通过圆片级真空封装降低阻尼的方案。

2.3 热机械噪声

加速度传感器要具有很高的性能, 必须尽可能地降低传感器的噪声以提高其动态范围. 电容式传感器的总噪声 (TNEA) 由两部分组成, 一是热机械噪声 (MNEA), 二是电路噪声 (ENE A), 公式 (2) 为它们的关系的表达式^[5]:

$$\text{TNEA} = \sqrt{\text{MNEA}^2 + \text{ENE A}^2} \quad (2)$$

其中 热机械噪声的表达式为:

$$\text{MNEA} = \sqrt{\frac{4k_B T \omega_0}{QM}} \quad (3)$$

其中 k_B 为玻尔兹曼常数, $k_B \approx 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$; T 是绝对温度; Q 是振动的品质因子; M 是质量块质量. 从公式 (3) 中可以看出, 要减小器件的机械热噪声, 可使用的手段有两个: 一是增大质量块质量, 二是提高器件的 Q 值. 首先选用了双层键合的梁-质量块结构, 这种结构的优点有两个: 一是 8 根梁的位置完全对称, 可以大大降低交叉轴灵敏度; 二是这样得到的质量块厚度可以达到两层硅的厚度 ($>800\mu\text{m}$), 有效地降低了机械热噪声. 然而如果要使加速度传感器具亚 μg 级的检测精度, 光凭大质量块仍然不够. 由公式 (3) 可以算出, 若要热机械噪声小于 $1\mu\text{g}$, 那么其 Q 值应该大于 3.2. 在上文中已经讨论过, 由于传感器质量块的阻尼形式为压模阻尼, 而且感应面积很大 ($3200\mu\text{m} \times 3200\mu\text{m}$), 间隙又很小 ($<3.5\mu\text{m}$), 所以要实现大于 3.2 的 Q 值就必须使用真空封装。

3 工艺流程

3.1 键合方法

为了在获得低刚度的梁的同时实现圆片级真空封装, 使用了硅-硅玻璃软化键合^[6,7]来制作三明治结构加速度传感器. 玻璃软化键合的原理是在硅的

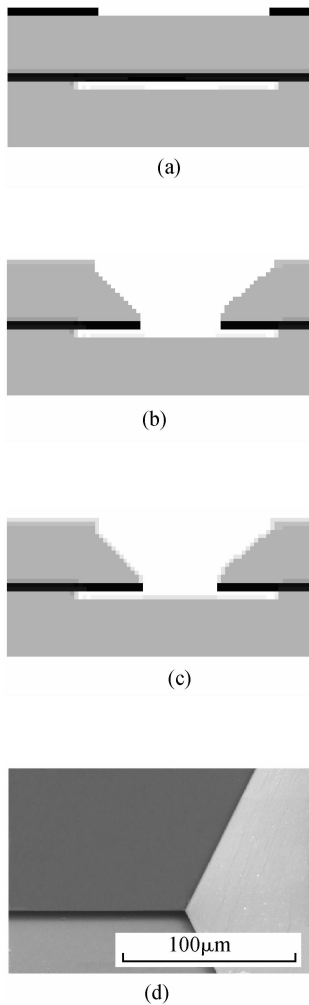


图 2 中间引线腔结构

Fig. 2 Structure of mass level's pad

一个键合面上制作一层硼硅玻璃(BSG),在一定的温度下,硼硅玻璃层会软化,起到粘结硅片的作用.在制作三明治加速度传感器时,为了减小粘结层厚度变化对电容间隙的影响,要将硼硅玻璃层做得尽可能薄.经实验表明,0.1 μm 厚的BSG层就能满足圆片级真空封装的气密性要求了.

3.2 中间引线结构

采用了如图2所示的工艺实现传感器中间电极引线的制作.在完成键合后,首先漂去上极板层对应于中间层电极部位的 SiO_2 (见图2(a)).

从图中可以观察到,在这个位置上上极板层和质量块层之间有一个缝隙.然后用KOH腐蚀穿上极板并漂去 SiO_2 得到引线窗结构(图2(b)).最后对硅片蒸铝(见图2(c)).由于上极板层和质量块层之间的缝隙区宽度略大于引线窗,在缝隙区的边缘,腐蚀形成了一个类似屋檐的结构.在蒸铝时,屋檐结构有效阻挡了铝向位于缝隙区边缘的上极板层和质

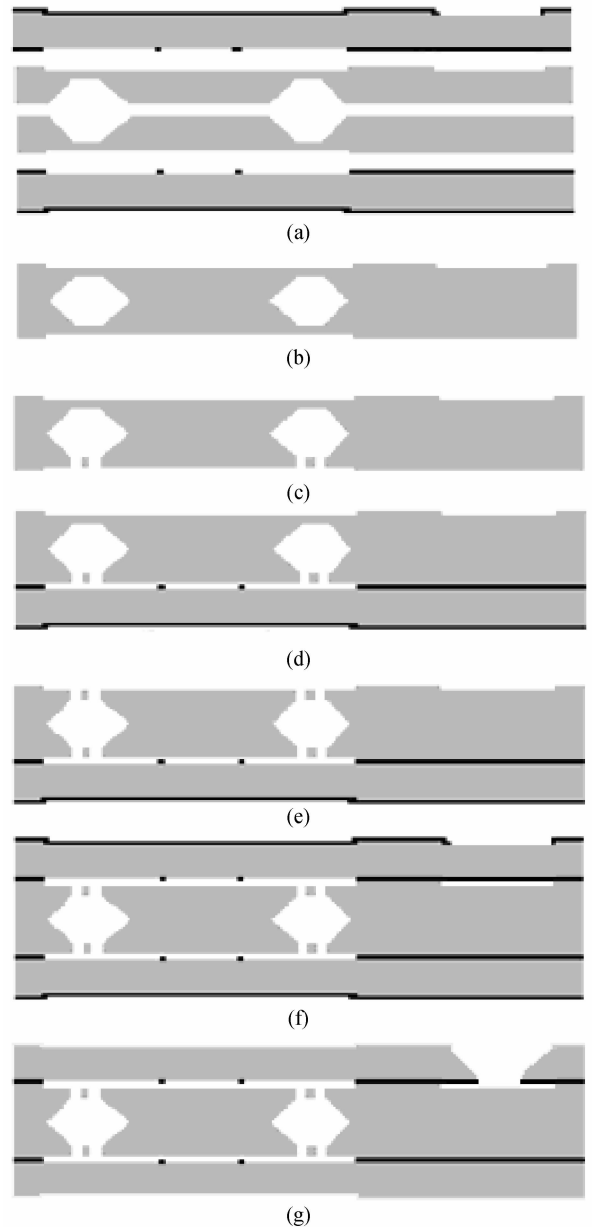


图 3 工艺流程

Fig. 3 Fabrication process

量块层的接缝处扩散,从而实现了上极板上的铝和质量块层上的铝之间的绝缘(见图2(d)).这样就通过一次蒸铝获得了上极板和质量块层两个电极.

3.3 制作工艺流程

工艺流程如下:

(1)首先分别制作4层硅片.其中,对于质量块上层和质量块下层,首先分别用KOH腐蚀出2~3 μm 的电容间隙,然后从背面使用KOH腐蚀至剩余40 μm .对于上下极板,将其氧化2 μm 构成绝缘层,然后用BOE在对应于电容间隙的位置腐蚀出防撞凸点,见图3(a).

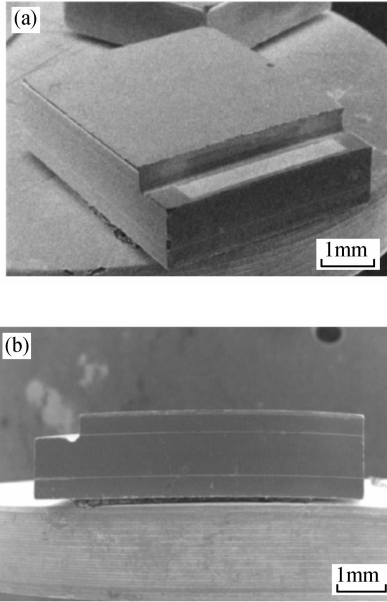


图 4 完成后的器件

Fig. 4 SEM pictures of the chip

(2)采用硅-硅直接键合的方法键合上、下质量块层,见图 3(b).

(3)用 DRIE 释放下层梁,见图 3(c).

(4)在下电极上制作 $0.1\mu\text{m}$ 厚的硼硅玻璃层,然后将质量块层与下电极进行玻璃软化键合,见图 3(d).此次键合可以在常压状态下进行,由于键合过程中会对硅片进行加热,被封在硅腔体里的气体受热膨胀,将质量块推离下电极,防止了质量块和下电极粘合.

(5)用 DRIE 释放上层梁,然后在真空条件下键合上电极,方法与下电极相同,从而实现了圆片级真空封装,见图 3(e)和(f).在键合前,需要将硅片彻底烘干,这是因为如果键合后有水份残留在器件腔体里的话,它会在真空状态下气化为水蒸气,降低器件腔体内的真空度.

(6)用 KOH 腐蚀穿上电极的引线窗,漂去表面的 SiO_2 后对硅片的上、下面蒸铝,获得引线电极.极板电极和质量块层电极的获得原理在 3.2 节中已进行了专门叙述,见图 3(g).

图 4 为划片后的加速度传感器 SEM 照片,传感器芯片大小为 $6.8\text{mm} \times 5.6\text{mm} \times 1.68\text{mm}$.

4 器件性能测试

4.1 气密性测试

为了检测圆片级真空封装的可靠性,要对器件进行气密性测试.气密性测试的过程是首先对样品

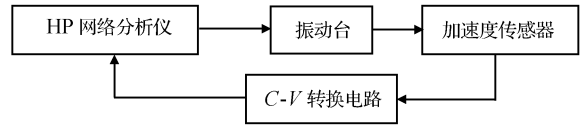


图 5 Q 值测试系统示意图

Fig. 5 Q-value test system

进行氦气细检以检测样品的细小泄漏,由于氦气细检能检测出小的漏缝却有可能漏过较大的漏缝,因此还要进行氟油粗检以检测大的泄漏.

4.2 氦气细检

将 8 个样品放在氦气罐中,氦气压力控制为 4 个大气压,加压时间 2h.随后放入 Turbo AUTO-TEST 947 型氦检漏仪中检测,8 个样品的漏率均已小于氦检漏仪的最小可分辨漏率 $0.1 \times 10^{-9} \text{cm}^3/\text{s}$.我们的器件的腔体体积为 $8 \times 10^{-3} \text{cm}^3$,经计算可得该体积下测量漏率极限值约为 $5.8 \times 10^{-7} \text{cm}^3/\text{s}$,即漏率小于该值时为合格.由此可见,所有的样品氦气细检合格.

4.3 氟油粗检

在真空状态下用 F113 氟油将样品淹没然后再加 $4 \times 10^5 \text{Pa}$ 气压,保持 2h.然后将样品取出,浸入 FC-43 氟油中,观察是否有连续的小气泡或个别大气泡冒出,如果有,则可判断为有漏.经检测,8 个样品均无气泡产生,通过检测.

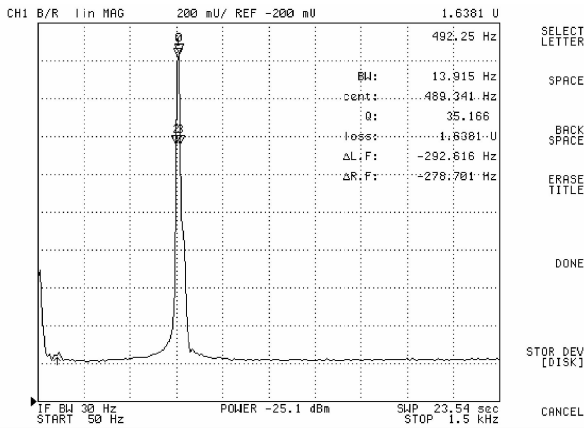
4.4 静态信号与 Q 值测试

首先进行静态信号测试,用电容表分别测试加速度传感器在正 1g 和负 1g 加速度时质量块电极和上电极间的电容值的变化,约为 12pF.由此,可以知道加速度传感器在 1g 信号输入时的电容变化为 6pF.然后测试加速度传感器的 Q 值,测试原理见图 5 所示.

将加速度传感器置于振动台上,利用网络分析仪输出的扫频信号驱动振动台,然后再将加速度传感器的输出信号通过 C-V 转换电路输入到网络分析仪中,于是得到了如图 6 的结果,测得加速度传感器的 Q 值约为 35,谐振频率为 489Hz.测得的谐振频率小于设计的 532Hz,这应该是在进行 KOH 腐蚀控制梁的厚度时产生误差造成的.

5 结论

提出了一种使用体硅技术制作的圆片级真空封装三明治电容式加速度传感器.该加速度传感器由四层硅键合而成,敏感质量块尺寸为 $3.2\text{mm} \times$

图 6 加速度传感器的 Q 值Fig. 6 Q -value of the accelerometer

3.2mm×0.84mm. 经初步测试,灵敏度为 6pF/g, 谐振频率为 489Hz, Q 为 35, 且气密性良好. 该加速度传感器有灵敏度高、热机械噪声小的特点, 且由于实现了圆片级真空封装, 降低了工艺成本. 该传感器在惯性导航、空间微重力测量及高精度勘探等领域

有着广泛的应用前景.

参考文献

- [1] Rudolf F, Jornod A, Bergqvist J, et al. Precision accelerometers with μg resolution. *Sensors and Actuators A*, 1990, 21: 297
- [2] Henrion W S, Erickson R K, Plumlee H R, et al. Sensor structure with L-shaped spring legs. United States Patent, 5652384, 1997
- [3] Tsau C H, Spearing S M. Characterization of wafer level thermocompression bonds. *J Microelectromech Syst*, 2004, 13(6): 963
- [4] Bao Minhang. Analysis and design principles of MEMS devices. Amsterdam, Elsevier, 2005
- [5] Monajemi P, Ayazi F. Design optimization and implementation of a microgravity capacitive HARPPS accelerometer. *IEEE Sensors Journal*, 2006, 6(1): 39
- [6] Field L A, Muller R S. Fusion silicon wafers with low melting temperature glass. *Sensor and Actuators*, 1990, A21~A23: 935
- [7] Legtenberg R, Bouwstra S, Fluitman J H J. Resonating microbridge mass flow sensor with low-temperature glass-bonded cap wafer. *Sensors and Actuators A*, 1991, 25~27: 723

A Highly Symmetrical Capacitive Accelerometer by Silicon Four-Layer Bonding*

Xu Weihe^{1,2}, Che Lufeng^{1,†}, Li Yufang¹, Xiong Bin¹, and Wang Yuelin¹

(1 State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper presents a highly symmetrical capacitive accelerometer fabricated by four silicon wafers bonded together. The cantilever-mass structure is fabricated by bonding two wafers together by silicon fusion, and the two static electrodes are bonded later by low-temperature glass melting. Through the silicon bonding, we achieve a wafer-level vacuum package, and the wire-bonding PAD is made after the fabrication is complete. The dimensions of the chip are 6.8mm×5.6mm×1.68mm, and those of the mass are 3.2mm×3.2mm×0.84mm. The test results of the sensor show that the sensitivity is about 6pF/g, the Q value is 35, the resonant frequency is 489Hz, and the leakage is less than $0.1 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$.

Key words: capacitive accelerometer; silicon bonding; wafer-level vacuum package

PACC: 0630G; 0710C

Article ID: 0253-4177(2007)10-1620-05

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2006AA04Z363)

† Corresponding author. Email: lfche@mail.sim.ac.cn

Received 10 April 2007, revised manuscript received 10 May 2007