

文章编号 1004-924X(2014)05-1235-08

谐振式 MEMS 压力传感器的制作及圆片级真空封装

陈德勇*, 曹明威, 王军波, 焦海龙, 张 健

(中国科学院 电子学研究所 传感技术国家重点实验室 北京 100190)

摘要: 为了提高传感器的品质因数, 有效保护谐振器, 提出了一种基于绝缘体上硅(SOI)-玻璃阳极键合工艺的谐振式微电子机械系统(MEMS)压力传感器的制作及真空封装方法。该方法采用反应离子深刻蚀技术(DRIE), 分别在 SOI 晶圆的低电阻率器件层和基底层上制作 H 型谐振梁与压力敏感膜; 然后, 通过氢氟酸缓冲液腐蚀 SOI 晶圆的二氧化硅层释放可动结构。最后, 利用精密机械加工技术在 Pyrex 玻璃圆片上制作空腔和电连接通孔, 通过硅-玻璃阳极键合实现谐振梁的圆片级真空封装和电连接, 成功地将谐振器封装在真空参考腔中。对传感器的性能测试表明: 该真空封装方案简单有效, 封装气密性良好; 传感器在 10 kPa~110 kPa 的差分检测灵敏度约为 10.66 Hz/hPa, 线性相关系数为 0.999 542。

关键词: 微电子机械系统; 谐振式压力传感器; 绝缘体上硅(SOI); 阳极键合; 真空封装

中图分类号: TP212.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142205.1235

Fabrication and wafer-level vacuum packaging of MEMS resonant pressure sensor

CHEN De-yong*, CAO Ming-wei, WANG Jun-bo, JIAO Hai-long, ZHANG Jian

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

* Corresponding author, E-mail: dychen@mail.ie.ac.cn

Abstract: To improve the quality factor of sensors and to protect resonators, the fabrication and wafer-level vacuum packaging methods for a Micro-electro-mechanic System(MEMS) resonant pressure sensor was proposed based on Silicon On Insulator (SOI)-glass anodic bonding technology. Through Deep Reactive Ion Etching (DRIE) process and buffered oxide etched releasing process, H-type resonant beams and pressure diaphragm of the sensor were fabricated on the low resistivity device layer and the substrate layer of SOI wafer, respectively, and a moveable mechanism was release by a SiO₂ layer of the SOI wafer corroded by hydrofluoric acid flow. Finally, electrical connection and a cavity for the vibration of beams was implemented on the Pyrex glass piece by fine mechanical machining and the wafer-level vacuum packaging and electric connection of the resonators were achieved with SOI-glass anodic bonding. Experimental results demonstrate that the packaging scheme is effective and

收稿日期: 2013-12-05; 修订日期: 2014-01-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61072022)

easy to achieve with an excellent hermetic sealing, and the sensor has a differential sensitivity of 10.66 Hz/hPa and linear correlation coefficient of 0.999 995 in the range of 10 kPa to 110 kPa.

Key words: Micro-electromechanical System (MEMS); resonant pressure sensor; Silicon On Isolation (SOI); anodic bonding; vacuum packaging

1 引言

谐振式压力传感器作为典型的高精度压力传感器,在航空航天、气象探测、工业控制等领域有着非常重要的作用^[1]。它利用压力的变化引起敏感膜的形变,敏感膜的形变又改变在其上的双端固支谐振梁的谐振频率,从而可通过测量谐振梁的谐振频率变化间接测量压力。谐振式 MEMS 压力传感器有机结合了微机电加工技术和机械谐振式传感技术,除了具有传统机械谐振传感器精度高、稳定性好、准数字输出等优点之外,还具有体积小、功耗低、与集成电路工艺兼容、易于大批量生产等特点^[2]。

上世纪 80 年代以来,国内外众多公司与研究机构广泛开展了谐振式 MEMS 传感器及其真空封装技术的研究。其中 DRUCK 公司 Greenwood^[3] 等人研制出蝶形结构的谐振式 MEMS 压力传感器,由于真空封装过程涉及两次玻璃焊料高温黏合,且其中一次黏合需要精确对准盖板上的金属电极与基板上的谐振器,加工难度较大。横河电机 Ikeda^[4] 等人研制了电磁激励、电磁检测的谐振式 MEMS 压力传感器,制作过程涉及扩散、多晶硅外延生长和多次薄膜沉积工艺,虽然将谐振器封装在独立腔室中,但制作过程非常复杂。国内在这方面也有相关研究,中科院电子学研究所陈德勇^[5] 等人制作了电热激励的谐振式 MEMS 压力传感器,但采用了单芯片管壳封装,不仅封装效率低,还存在热应力较大的问题。史晓晶^[6]、李玉欣^[2,7] 等人采用扩散硅工艺制作了梁膜一体的谐振式 MEMS 压力传感器,其真空封装采用黏合键合的方法进行单片封装,该方案存在以下缺点:(1)将谐振器暴露在空气中使谐振器的品质因数难以提高;(2)没能形成对谐振器的有效保护;(3)采用有机黏合材料封装,引入应力较大且长期稳定性较差;(4)单芯片封装,效率低。

本文介绍了一种基于绝缘体上硅(Silicon-

On-Insulator,SOI)工艺的谐振式 MEMS 压力传感器的制作及圆片级真空封装方法,利用精密机械加工技术在 Pyrex 玻璃晶圆上制作空腔和电连接通孔,并通过硅-玻璃阳极键合将谐振器封装在真空中。该方法有利于提高谐振器的品质因数,并形成对谐振器的有效保护。与有机黏合材料和金属焊接材料相比,阳极键合采用的 Pyrex 玻璃与单晶硅的热膨胀系数匹配更好,减小了真空封装引入的应力;圆片级真空封装的实现,大大提高了封装效率。

2 传感器的设计

2.1 工作原理与结构设计

根据振动部分的结构特征,谐振式压力传感器分为谐振筒式、谐振膜式和谐振梁式压力传感器。本文选择了双端固支 H 型谐振梁作为谐振器^[8],如图 1 所示,H 型谐振梁由 2 根单梁组成,通过中间的连接点连接。采用电磁激励和电磁拾振的方式,将 H 型谐振梁水平放置,同时在其周围提供竖直方向的均匀磁场,当其中一根单梁上通过交变电流时,H 型谐振梁受到周期性安培力的作用进行受迫振动,另一根单梁在均匀磁场中切割磁感线而产生感应电动势。当交变电流的频率与 H 型谐振梁固有频率相同时,H 型谐振梁振幅达到最大,通过检测由此产生的最大电动势可检测到 H 型谐振梁的固有频率。

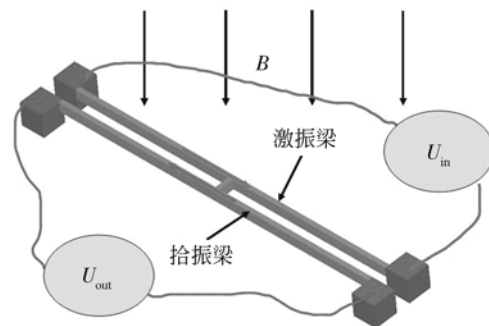


图 1 H 型谐振梁结构示意图

Fig. 1 H type resonant beam

根据弹性理论^[9], 谐振梁一阶振动模式的固有频率近似计算公式为:

$$f_1(0) = \frac{4.73^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{A\rho}} = 1.028 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \frac{b}{l^2}, \quad (1)$$

其中: E 是材料的杨氏模量, I 是转动惯量, $A=bh$ 是横截面积, σ 是轴向应力, ρ 是材料密度, b 是梁的宽度, h 是梁的厚度, l 是梁的长度。

H 型谐振梁的固有频率随其所受轴向应力变化, 将 H 型谐振梁双端固支在压力敏感膜片上, 通过压力敏感膜的形变来改变 H 型谐振梁所受轴向应力, 从而改变其固有频率, 可达到检测压力的目的, 传感器整体结构如图 2 所示。

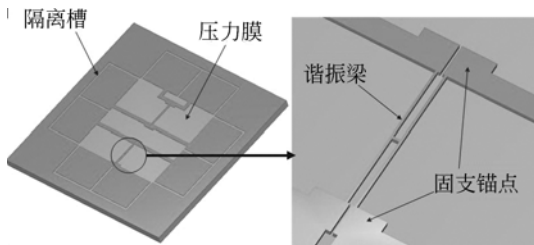


图 2 谐振器整体结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of proposed resonator

2.2 谐振梁固有频率的有限元仿真

由式(1)可知谐振梁的一阶振动模式的固有频率主要取决于谐振梁的长度 l 和宽度 b 。利用 Ansys 有限元仿真软件对谐振梁的结构参数进行优化仿真, 综合考虑加工、检测等因素, 设计谐振梁的两根单梁的结构参数为长 $1\,400\ \mu\text{m}$ 、宽 $20\ \mu\text{m}$ 、厚 $40\ \mu\text{m}$, 中间连接块宽 $20\ \mu\text{m}$ 、长 $60\ \mu\text{m}$, 无应力状态下谐振梁固有频率为 $81.398\ \text{kHz}$ 。

选择方形单晶硅膜片作为感压元件, 利用 Ansys 有限元仿真软件对压力敏感膜进行应力仿真分析, 在其背面加 $100\ \text{kPa}$ 的压力负载, 得到其正面的 Y 轴向应力分布, 如图 3 所示(X 轴向应力分布规律与此一致)。

根据压力敏感膜的应力分布情况, 将两个 H 型谐振梁分别固支于压力敏感膜边缘的压应力区和靠近中间的拉应力区, 如图 3 所示。通过对两个 H 型谐振梁的输出频率进行差分检测, 可在增大灵敏度的同时抵消部分外界环境的影响。为更好地抵消部分外界环境影响, 两个 H 型谐振梁对压力的灵敏度应尽量相同。在 H 型谐振梁结构参数和压力敏感膜尺寸确定的情况下, 影响灵敏度的参数为压力敏感膜厚度与两个 H 型谐振梁的固

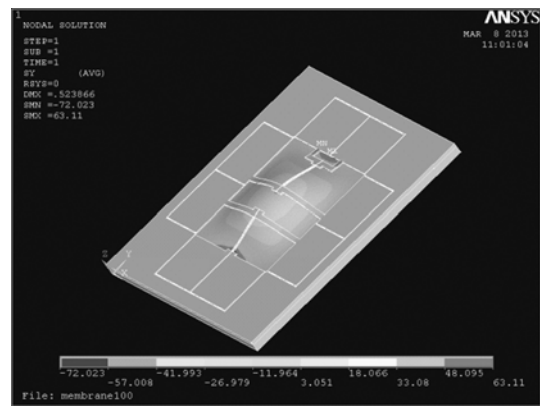


图 3 压力敏感膜 Y 轴向应力分布

Fig. 3 Stress distribution of diaphragm on Y-axis

支位置。根据仿真结果选择压力膜厚度为 $120\ \mu\text{m}$, 此时固支于边缘的 H 型谐振梁的灵敏度约为 $5\ \text{kHz}/100\ \text{kPa}$ 。确定压力敏感膜厚度以后, 通过 Ansys 仿真确定另一个 H 型谐振梁的灵敏度约为 $5\ \text{kHz}/100\ \text{kPa}$ 的固支位置, 最终仿真得到的差分检测灵敏度约为 $10\ \text{kHz}/100\ \text{kPa}$ 。

3 传感器的封装设计与制作工艺

3.1 传感器的封装设计

要实现绝压测量, 真空参考腔的设计和制作在压力传感器中十分必要。而将谐振器封装在真空中不仅有利于提高其品质因数, 还能形成对谐振器的有效保护, 减小外部环境(例如灰尘、水汽等)对谐振器正常工作造成的不利影响, 保证其可以在恶劣的环境中工作。因此, 实现高性能的谐振式压力传感器, 将谐振器封装在真空中是非常必要的。

为此, 提出了一种基于硅-玻璃阳极键合技术的真空封装方法, 把谐振器封装在真空参考腔中, 将谐振器的电连接引出, 真空封装如图 4 所示。硅-玻璃阳极键合具有良好的密封性和长期稳定性, 能够长期保持真空, 减小传感器的时漂; Pyrex 玻璃热膨胀系数为 $3.3 \times 10^{-6}/\text{K}$, 单晶硅的热膨胀系数为 $3.0 \times 10^{-6}/\text{K}$, 相近的热膨胀系数有利于实现低应力封装, 减小传感器的温漂; 此外, 这种封装方法是圆片级封装, 具有很高的封装效率。

采用电磁激励和检测的方法时, 通常采用生长绝缘层和图形化的金属层的方法实现机电转

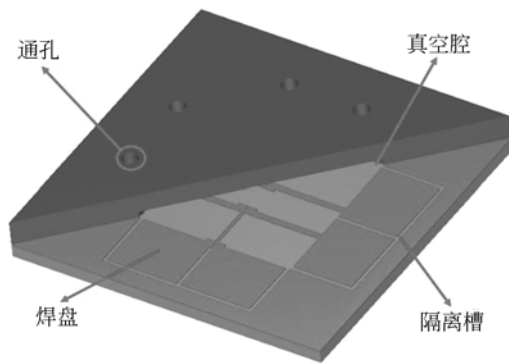


图 4 真空封装示意图

Fig. 4 Schematic diagram of vacuum packaging

换,但这与阳极键合工艺的要求相冲突,还存在热膨胀系数难匹配、工艺复杂的问题。为解决上述问题,在 SOI 晶片参数的选取上,采用器件层厚 $40\ \mu\text{m}$,电阻率 $0.001\sim 0.002\ \text{Ohm}\cdot\text{cm}$ 、中间氧化层厚 $2\ \mu\text{m}$ 、基底层厚 $300\ \mu\text{m}$,电阻率 $5\sim 10\ \text{Ohm}\cdot\text{cm}$ 。选用器件层为低电阻率单晶硅的 SOI 晶圆,在加工谐振器的同时制作出电绝缘槽(如图 4 所示);晶圆的器件层是建立在数微米(实验中用 $2\ \mu\text{m}$)的二氧化硅层之上的,通过制作电绝缘槽可以实现电流通路之间的电绝缘;直接采用低电阻率的单晶硅实现机电转换,而不是其上的一层薄金属膜。

为保证谐振器在真空条件下自由振动,在 Pyrex 玻璃对应压力敏感膜的位置上设计了方形坑槽,形成供谐振器自由振动的真空参考腔。将谐振器封装在真空的同时,玻璃封盖会不可避免地阻碍传感器芯片的压焊。为实现电信号的传输,在对应每一个需要引出电信号的硅焊盘的中间部位,Pyrex 玻璃上都需要制作通孔,以保证硅铝丝超声波楔焊的完成。

3.2 传感器的制作工艺

谐振式传感器的核心部件是谐振器,其品质因数极大地影响传感器的性能。单晶硅具有良好的机械性能和热稳定性,制作的谐振器的品质因数可以达到 10^5 数量级^[10-12]。采用器件层为低电阻率单晶硅的 SOI 晶圆,通过微机械加工的方法在其器件层制作谐振器,在其基底层制作压力敏感膜。利用氢氟酸缓冲液腐蚀 SOI 晶圆的二氧化硅层,完成谐振器的释放,得到梁膜一体的谐振器。

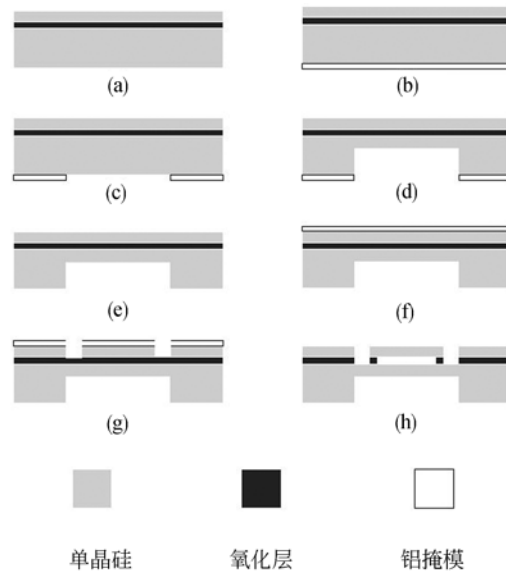


图 5 谐振器的制作工艺流程图

Fig. 5 Fabrication process of proposed resonator

主要的工艺步骤如图 5 所示:(1)首先清洗 SOI 晶圆,流程依次为丙酮浸泡超声 2 min,无水乙醇浸泡超声 2 min,去离子水冲洗 2 min, 180°C 浓硫酸煮 10 min,去离子水冲洗 5 min,沸水煮 5 min,去离子水冲洗 2 min,氮气吹干, 120°C 烘 10 min,如图 5(a)所示;(2)用金属薄膜淀积设备(溅射台)在 SOI 晶圆的基底层面上溅射厚度为 $300\ \text{nm}$ 的金属铝,如图 5(b)所示;(3)通过光刻图形转移、磷酸腐蚀铝图形转移等工艺(40°C ,约 2 min 以观测为主),得到抗反应离子深刻蚀的掩模,如图 5(c)所示;(4)通过反应离子深刻蚀工艺(采用快速率参数: SF_6 , $300\ \text{ml}/\text{min}$, $7\ \text{s}$; CHF_3 , $150\ \text{ml}/\text{min}$, $2\ \text{s}$;上电极 $1\ 800\ \text{W}$,下电极 $70\ \text{W}$;气压 $< 2\ \text{mbar}$),制作压力敏感膜,如图 5(d)所示;(5)完全去除整片的光刻胶和铝掩模并清洗晶圆,如图 5(e)所示;(6)在 SOI 晶圆的器件层面上溅射厚度为 $300\ \text{nm}$ 的金属铝,如图 5(f)所示;(7)经过光刻图形转移、磷酸腐蚀铝图形转移等工艺,得到抗反应离子深刻蚀的掩模,通过反应离子深刻蚀工艺得到谐振器结构(SF_6 , $350\ \text{ml}/\text{min}$, $5\ \text{s}$; CHF_3 , $350\ \text{ml}/\text{min}$, $2\ \text{s}$;上电极 $1\ 500\ \text{W}$,下电极 $80\ \text{W}$;气压 $< 2\ \text{mbar}$),如图 5(g)所示;(8)完全去除整片的光刻胶和铝掩模并清洗晶圆后,利用氢氟酸缓冲液释放可动结构, HF 酸缓冲液配比($\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_2\text{O} = 3$

ml : 6 g : 10 ml), 腐蚀水浴温度 23°C, 腐蚀时间 40 min。如图 5(h)所示。

Pyrex 玻璃晶圆上设计了方形深槽和圆形通孔, 来配合芯片结构实现谐振器的真空封装。为保证键合面的平整度满足阳极键合工艺的要求, 并确保方形深槽和圆形通孔的相对位置准确, 选择超声波精密机械加工的方法一次性完成坑槽和通孔的加工。对完成加工的 Pyrex 玻璃晶圆进行了清洗, 以去除加工过程产生的污染物残留。在型号为 Karl Suss SB6 的阳极键合机台上, 将加工了谐振器结构和压力膜的 SOI 晶圆和带有气压坑槽结构和供电引线连接通孔的 Pyrex 玻璃晶圆进行对准后, 完成阳极键合, 键合成功的圆片如图 6 所示, 该晶圆中包含有 32 个气压传感器芯片, 芯片尺寸为 7 mm × 7 mm。采用划片机对芯片切片后, 利用扫描电子显微镜观察芯片截面, 如图 7 所示, 真空腔体结构完全可以容纳谐振器自由振动, 也可容纳气压膜的形变。对不同批次、同一批次圆片不同位置的小芯片抽样测试, 得到压力膜实际厚度为 117~122.5 μm。

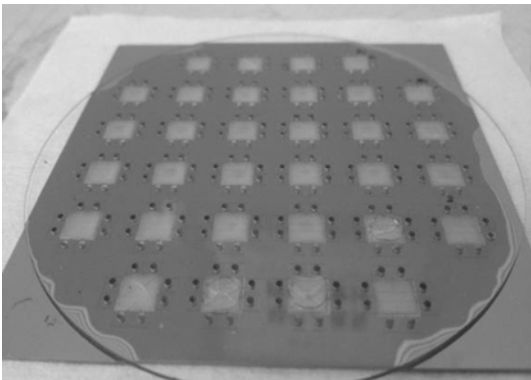


图 6 圆片级阳极键合

Fig. 6 Wafer-level anodic bonding

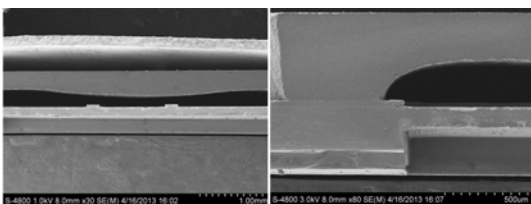


图 7 芯片截面的扫描电子显微镜图片

Fig. 7 SEM photos of side view of the chip

4 测试结果及分析

4.1 传感器的开环测试

由于采用了 SOI 晶圆器件层的低电阻率单晶硅作为激励电极和拾振电极, 因此两根单梁通过 H 型谐振梁中间连接处短接在一起。为解决 H 型谐振梁中间连接处的串扰引起无法检测的问题, 在传感器的驱动端采用了匝数比为 1 : 1 的变压器进行驱动。将 E5061B ENA 系列网络分析仪的驱动信号通过隔离变压器加载到谐振梁的激励电极, 变压器的次级线圈与激励电极构成一个独立的闭合回路, 放置驱动信号通过 H 型谐振梁中间连接处的电阻形成串扰, 保证了检测的实现, 开环检测系统如图 8 所示。

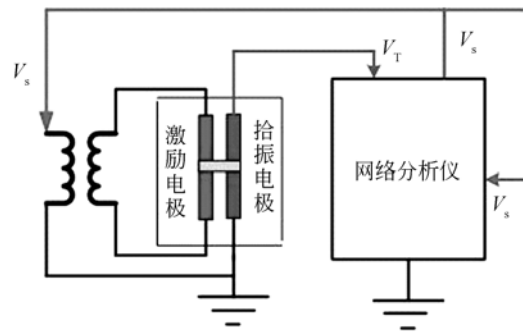


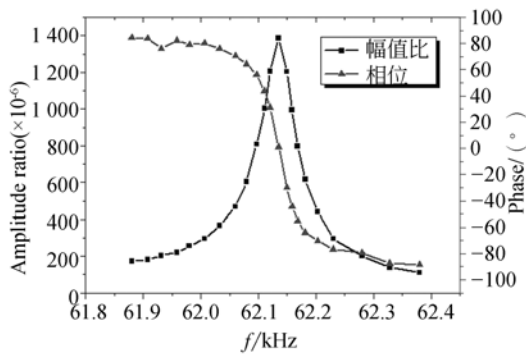
图 8 开环测试系统简图

Fig. 8 Schematic diagram of opened-loop testing system

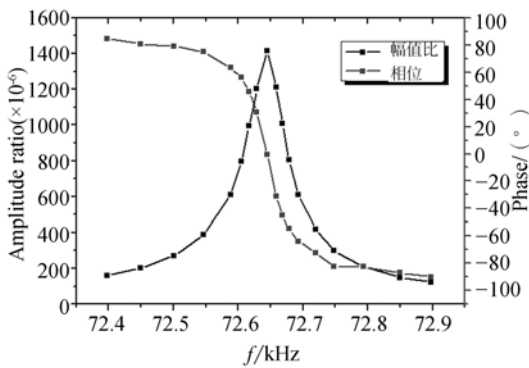
为避免激励电压过大, 使谐振梁处于非线性振动状态, 根据多次开环测试结果, 选定激励电压为 20 mV。在常压下分别对传感器的边缘谐振梁和中间谐振梁进行了开环测试, 得到的开环测试曲线如图 9 所示。

根据测试曲线可知, 常压(大气压)下边缘谐振梁的谐振频率约为 62.135 kHz, 中间谐振梁的谐振频率约为 72.659 kHz, 两者差频约为 10.524 kHz, 与有限元仿真结果的差频输出非常接近。通过幅频特性曲线可以估算其谐振器的机械品质因数 Q 值, 将中心频率除以其 3 dB 带宽, 计算得到两个谐振梁的 Q 值约为 1 400 左右。通过对比实验得到谐振梁在空气中的品质因数 Q 值为 800 左右, 容易发现封装在真空腔中的谐振梁的品质因数并未得到较大提升。经过分析整个封装工艺, 认为导致谐振梁品质因数不很高的原

因在于工艺设备的兼容问题,在 4 inch(10 cm)键合设备上进行了 3 inch(7.5 cm)晶圆的阳极键合。由于无法进行预键合,将玻璃晶圆与 SOI 晶圆压紧后,会造成对真空腔的抽气速率下降,而键合工艺的抽气时间并没有适当延长,由此导致真空腔的真空度并没有达到键合机腔室中的高真空,谐振梁处于低真空环境中,所以其品质因数并未大幅提高。



(a) 边缘谐振梁
(a) Side beam



(b) 中间谐振梁
(b) Central beam

图 9 常压下的开环测试曲线

Fig.9 Amplitude-frequency characteristics and phase-frequency characteristics in air

4.2 传感器的闭环测试

闭环检测电路采用正反馈实现谐振器的自激振荡^[13],使输出频率自动跟踪谐振器固有频率的变化,从而可以测定传感器的响应曲线。在实验室条件下采用 Fluke PPC4E 压力控制仪进行压力控制,可准确测量的最小气体压力为 1 kPa,为得到边缘谐振梁和中间谐振梁的频率-压力特性,在 10 kPa~100 kPa 的区间以 10 kPa 为步长,在不同压力下对传感器样品进行了闭环测试,得到该器件的边梁、中间梁以及差频检测的

频率-压力特性如图 10 所示。根据 3 条频率-压力特性曲线可得到边梁和中间梁的灵敏度约为 5.33 kHz/100 kPa,差分检测的灵敏度约为 10.66 kHz/100 kPa,传感器的差分检测输出的线性相关系数为 0.99 999 542。随机选择同一圆片上 5 个传感器样品,测试其差频检测的频率-压力特性,在 100 kPa 下谐振梁的工作频率和差频检测灵敏度如表 1 所示。

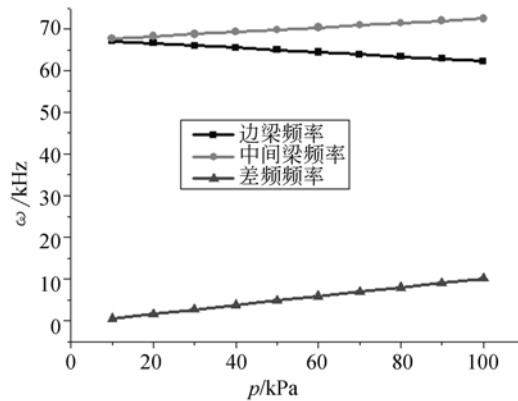


图 10 传感器在 10 kPa~110 kPa 内的频率-压力响应曲线

Fig.10 Frequency-pressure characteristics in pressure of 10 kPa—110 kPa

表 1 100 kPa 压力下中器件的频率特性

Tab.1 Frequency characteristics of the sensors in pressure of 100 kPa

	器件 1	器件 2	器件 3	器件 4	器件 5
边梁频率/ kHz	58.435	61.329	58.813	60.429	62.303
中间梁频 率/kHz	69.372	71.266	69.573	69.836	72.488
差频/ (kHz/100 kPa)	10.937	9.937	10.76	9.407	10.185

利用图 10 所示频率-压力特性曲线,可以大致估算真空中两个谐振梁的固有频率均在 67 kHz 附近,但根据仿真结果谐振器固有频率应为 81.398 kHz。根据式(1)可知,谐振梁的固有频率与其宽度 b 成正比,与其长度 l 的平方成反比。在谐振梁的加工过程中,光刻、铝掩模腐蚀等工艺会对谐振梁的宽度 b 造成较大影响。测试未进行真空封装的样品,在没有压力效应的情况下,

边缘谐振梁与中间谐振梁的固有频率均减小为 70 kHz 左右。在电镜下测量该样品的谐振梁宽度 b 为 17 μm , 经过有限元仿真分析, 谐振梁宽度 b 减小为 17 μm 时, 其固有频率为 69.1 kHz, 与测试结果相符。因此认为造成传感器工作频率下降的主要因素是光刻、铝掩模腐蚀等步骤的工艺误差。

表 1 的测试结果显示, 5 个传感器样品的工作频率和差频灵敏度均有偏差。分析认为, 光刻、铝掩模腐蚀的不均匀, 导致了相同圆片上传感器样品工作频率的偏差, 而差频灵敏度的偏差则主要来自于反应离子深刻蚀的非均匀性。

5 结 论

本文采用阳极键合技术, 结合 SOI-MEMS

工艺, 设计了一种谐振式 MEMS 压力传感器的真空封装方法, 将谐振器封装在真空中。通过有限元仿真设计了传感器的结构参数, 并利用差分检测提高传感器的灵敏度, 同时减小部分应力对传感器性能的影响。基于体硅工艺加工了传感器样片, 工艺简单、易实现。采用微机械加工的方法, 加工了带有电连接通孔和真空腔的玻璃盖板。基于阳极键合技术实现了圆片级真空封装, 可长期保持真空, 并具有低应力的特点。测试表明, 设计的真空封装方案是完全可行的, 该设计将谐振器封装在真空环境下, 对其形成了有效保护; 在 10 kPa~110 kPa, 传感器的差分检测灵敏度高达 10.66 Hz/hPa, 线性相关系数为 0.999 995, 大大提高了封装效率。

参考文献:

- [1] 马志波, 姜澄宇, 任森, 等. 基于 SOI 的硅微谐振式压力传感器芯片制作[J]. 传感技术学报, 2012, 25(2):180-183.
MA ZH B, JIANG CH Y, REN S, *et al.*. Fabrication of a novel resonant pressure sensor based on SOI wafer [J]. *Chinese Journal of Sensor and Actuators*, 2012, 25(2):180-183. (in Chinese)
- [2] 李玉欣, 陈德勇, 王军波, 等. 基于自停止腐蚀技术的 H 型谐振式微机械压力传感器[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12):2927-2934.
LI Y X, CHEN D Y, WANG J B, *et al.*. H type Micro-machined resonant pressure sensor based on Self-stoped etch technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):2927-2934. (in Chinese)
- [3] GREENWOOD J C, SATCHELL D W. Miniature silicon resonant pressure sensor [J]. *Control Theory and Applications*, 1988, 135(5):369-372.
- [4] IKEDA K. Silicon pressure sensor integrates resonant strain gauge on diaphragm [J]. *Sensor and Actuator A: Physical*, 1990, 12(1-3):146-150.
- [5] CHEN D Y, CUI D F, WANG L. SIN beam resonant pressure sensors with a novel structure [C]. *IEEE Sensors Conference*, 2002:994-997.
- [6] 史晓晶, 陈德勇, 王军波, 等. 一种新型微机械谐振式压力传感器研究[J]. 传感技术学报, 2009, 22(6):790-793.
SHI X J, CHEN D Y, WANG J B, *et al.*. Research of a novel micromachined resonant pressure sensor [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(6):790-793. (in Chinese)
- [7] WANG J B, CHEN D Y, LI Y X. A micromachined resonant pressure sensor with DETFs resonator and differential structure [C]. *IEEE Sensors Conference*, 2009:1321-1324.
- [8] CHEN D Y, WANG J B, LI Y X. A novel laterally driven micromachined resonant pressure sensor [C]. *IEEE Sensors Conference*, 2010:1727.
- [9] 陈德勇. 微机械谐振梁压力传感器研究[D]. 北京: 中国科学院博士学位论文, 2002.
CHEN D Y. *Research on Micromachined Resonant Beam Pressure Sensors* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- [10] 陈李, 陈德勇, 王军波, 等. 高性能电磁式微机械振动环陀螺[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8):1915-1921.
CHEN L, CHEN D Y, WANG J B, *et al.*. High performance electromagnetic micro-machined ring

- vibration gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):1915-1921. (in Chinese)
- [11] 马洪宇, 黄庆安, 秦明, 等. 谐振式 MEMS 温度传感器设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9): 2022-2027.
MA H Y, HUANG Q A, QIN M, *et al.*. Design of resonant MEMS temperature sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):1915-1921. (in Chinese)
- [12] 石然, 裘安萍, 苏岩, 等. 硅微谐振式加速度计的实现及性能测试[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(12):2583-2589.
SHI R, QIU A P, SU Y, *et al.*. Implementation and experiments of micromechanical differential silicon resonant accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12):2583-2589. (in Chinese)
- [13] 刘猛, 王军波, 李玉欣, 等. 电磁激励谐振式 MEMS 压力传感器闭环控制电路研究[J]. *传感技术学报*, 2010, 23(8):1066-1069.
LIU M, WANG J B, LI Y X, *et al.*. Research on closed loop control for resonant MEMS pressure sensor with electromagnetic excitation [J]. *Chinese Journal of Sensor and Actuators*, 2010, 23(8): 1066-1069. (in Chinese)

作者简介:



陈德勇(1967—), 男, 博士, 研究员, 1989 年于清华大学获得学士学位, 1992 年于中国科学院半导体所获得硕士学位, 2002 年于中国科学院电子学研究所获得博士学位, 主要研究方向为 MEMS 微传感器与微系统。E-mail: dychen@mail. ie. ac. cn



曹明威(1984—), 男, 硕士研究生, 2007 年于北京科技大学获得学士学位, 主要研究方向为微机械谐振式传感器。E-mail: ustbsimon@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)