

用于微电子机械系统封装的体硅 键合技术和薄膜密封技术

王渭源, 王跃林

(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)

[摘要] 对静电键合、体硅直接键合和界面层辅助键合等三种体硅键合技术, 整片操作、局部操作和选择保护等三种密封技术, 以及这些技术用于微电子机械系统的密封作了评述, 强调在器件研究开始时应考虑封装问题, 具体技术则应在保证器件功能和尽量减少芯片复杂性两者之间权衡决定。

[关键词] 体硅键合技术; 薄膜密封技术; 微电子机械系统封装技术

[中图分类号] TN305.94 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)06-0056-07

1 引言

Delapierre 曾谈到他们公司 20 年里微电子机械系统 (MEMS) 从实验室走向产业的经验^[1]: 从研究、开发到生产出一个 MEMS 器件, 包括完成封装, 一般要 20 人年工作量。对 MEMS 封装, 包括完成芯片后的无损伤切割、装架和封装等, 以及由此引起的机械性损伤、化学沾污、温度导致芯片性能变坏、真空或气氛对芯片性能等对器件可靠性、重复性的影响, 从器件研究一开始就应该考虑。文献[2, 3]提到, 封装占 MEMS 大部分成本, 从经济核算考虑, 也应非常重视封装问题。

文中封装指前封装, 其基础是体 Si 键合技术和薄膜密封技术。从过程讲, 一般会先研究抛光体 Si 键合, 积累键合经验, 但实际 Si 片不是抛光体 Si, 而是经历过一套芯片工艺, 表面有一定粗糙度, 还有钝化层和金属层。键合、密封和封装很难区分, 有时笼统称为封装。一般地说, 键合往往用做复合体材料的衬底, 是管芯前工艺, 但有时也作为封盖, 则是管芯后工艺。密封用以堵塞间隙或小孔, 是管芯工艺一部分, 可归入前封装。封装比键合和密封涉及面广, 包括管芯防护和装架以及与系统联结等问题, 是后工艺。但如上所述, 文中封装

指前封装, 一般到管芯防护为止, 有整片操作和局部操作以及选择保护之分。采用局部操作和整片封装是发展方向, 但技术难度较高。这些技术用于封装 MEMS 时应权衡器件功能和技术复杂性而定。

体 Si 键合和薄膜密封技术有很多报道, 但很少报道 MEMS 封装技术, 一方面是其中具体技术和工艺问题难以成文发表, 一方面是其中涉及产品商品化的专利和诀窍不愿发表, 近几年情况稍有改变。应该指出, 在 MEMS 研究中, 国内外过去对封装都有所忽视。本文将对近年来用于 MEMS 封装的体 Si 键合、薄膜密封技术及有关问题进行评述, 旨在引起 MEMS 领域科技工作者的重视。

2 体 Si 键合技术

在 Si 平面技术基础上发展起来的体 Si 微机械技术, 最早用于规模化生产 Si 压阻式压力传感器^[4], 其中很重要的技术是体 Si 键合。

Ko 等对体 Si 键合早有评述^[5], 其措施有共晶键合、树脂键合、聚脲亚胺键合、热压金属键合、超声键合、激光键合、静电键合和低温玻璃键合等, 其中对适合传感器的共晶键合、静电键合和低温玻璃键合及键合后器件长期稳定性的介绍尤为详细。以后又出现 Si 直接键合技术及抗腐蚀性特别

[收稿日期] 2001-08-28; 修回日期 2001-11-22

[基金项目] 国家重点基础研究发展规划资助项目 (G1999033101)

[作者简介] 王渭源 (1930-), 男, 浙江镇海市人, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员, 博士生导师

好的用于键合 Si_3N_4 薄膜的界面层辅助键合技术。下面介绍最近用得最多、最重要的三种键合技术。

2.1 静电键合

静电键合 (EB) 又称电场辅助键合或阳极键合, 1969 年即有报道^[6], 在 Ko 等专著和教科书^[7] 中有详细介绍。这种技术将玻璃与金属或体 Si 等半导体键合起来而不用粘合剂, 键合界面气密性和稳定性良好。键合条件是, Si 片接阳极, 玻璃接阴极, 温度 $300\sim 400\text{ }^\circ\text{C}$, 偏压 $500\sim 1000\text{ V}$ (与玻璃厚度和表面平整度等有关)。要使键合良好, Si 片和玻璃的表面粗糙度尽可能小, 颗粒尽可能少, 材料热膨胀系数相近, Si 片上氧化层 $< 0.2\text{ }\mu\text{m}$ 。这种技术也可以在真空下进行, 称为真空 EB。EB 材料一般用作衬底, 有时也用作封盖。

近几年来伴随反应离子深刻蚀技术的突破, 利用 EB 技术制造 MEMS 的兴趣大增, 一则可以获得更厚的机械结构 (作为加速度计和陀螺, 希望有厚微结构), 二则可以不做牺牲层。

真空电容压力传感器^[8] 用两片玻璃 (G_1 和 G_2) 和两片 Si 片 (Si_1 和 Si_2)、经 3 次 EB 做成。第一次 EB, 将预先做好小引线孔和小测试孔的 G_1 与 $7\text{ }\mu\text{m P}^{++}/\text{Si}_1$ 键合, 腐蚀 Si_1 成为 $7\text{ }\mu\text{m P}^{++}$ Si/G_1 材料的伺服电极/上盖。在 Si_2 正反面腐蚀出浅坑 (深度 $11\text{ }\mu\text{m}$ 和 $4\text{ }\mu\text{m}$, 作伺服电极和测试电极的间隙, 构成电容), 坑正面形成 $7\text{ }\mu\text{m P}^{++}$ Si/Si_2 , 作第二次 EB, 与上盖键合, 成为内外相通的空腔。在对正面保护下, 从背面腐蚀坑内 Si_2 只剩 $7\text{ }\mu\text{m P}^{++}$ Si (作压力敏感的弹性膜), 作第三次真空 EB, 将 Si_2 与预先做好下电极的 G_2 键合, 形成低压密封空腔。如果事先在空腔中放入 Ti-Zr-V-Fe 合金除气剂, 键合后真空度进一步提高至 $< 133\text{ }\mu\text{Pa}$ 。关于 EB 键合可靠性, 参考低压 EB 的 Si 双框架陀螺^[9], 其品质因子在 2 MPa 加速泄漏试验 5 年后未改变, 可见其可靠性相当好。

2.2 Si 片直接键合

Si 片直接键合 (SDB) 又称 Si 片熔融键合, 最早见文献^[10]。这种技术不用粘合剂, 在 $800\sim 1100\text{ }^\circ\text{C}$ 下, 几小时将两片抛光 Si 片键合起来, 键合强度随温度升高而增强, 界面气密性和稳定性良好。要使键合良好, Si 片表面需先经特殊处理, 还要非常平整, 没有任何颗粒 (包括悬浮颗粒), 氧化层尽量薄。文献^[11]表明, 没有氧化层、非常清洁的 Si 片可在 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 键合, 键合强度高; 有了

氧化层则必须在高温下键合。由于对表面要求特别高, SDB 一般用于键合抛光体 Si 做成 SOI 材料而不用用于封装 MEMS, 有时用 EB 材料做成 SOI 材料代替, 除非对键合材料应力匹配要求特别高。

Petersen 等最早用 SDB 做成高压、低压和高温传感器^[12], 构思巧妙。以低压器件为例, 将 $\text{P}-\text{Si}_1$ 材料外延为 $\text{N}-\text{Si}_1/\text{P}-\text{Si}_1$ (外延 $\text{N}-\text{Si}_1$ 即以弹性膜厚度), 另将 $\text{N}-\text{Si}_2$ 各向异性腐蚀出空腔, 用 SDB 将两者键合, 腐蚀全部 $\text{P}-\text{Si}_1$ 成为 $\text{N}-\text{Si}_1$ 弹性膜/ $\text{N}-\text{Si}_2$ 衬底, 在膜上离子注入和光刻形成 $\text{P}^{++}-\text{Si}_1$ 电阻, 减薄 $\text{N}-\text{Si}_2$ 衬底至适当厚度, 露出空腔构成管芯。这种用 Si 材料做力敏电阻和弹性膜的压力传感器, 没有匹配应力, 长期稳定性好, 而且管芯面积只是通常结构器件的一半。

2.3 界面层辅助键合

界面层辅助键合 (IAB) 技术是在两材料间加一层界面层起辅助键合作用, 再用 EB 或加热将单独用 EB 或加热不能键合的两种体材料键合起来。

体 Si 与体 Si 键合除用 SDB 外, 也用玻璃 IAB 结合 EB 技术。为此, 至少需玻璃层厚度 $2\text{ }\mu\text{m}$, 用溅射很难达到, 因此至今该技术应用不多。玻璃胶涂焊技术^[13], 可以方便地像光刻胶那样涂焊在体 Si 表面, 一次涂胶厚度 $2\text{ }\mu\text{m}$, 二次 $4\text{ }\mu\text{m}$, 玻璃胶也可以作腐蚀掩蔽膜, 在 TMAH 中腐蚀速率小至 15 nm/h (TMAH 浓度 25%, 腐蚀温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$), EB 键合条件为温度 $400\text{ }^\circ\text{C}$, 偏压 $30\sim 40\text{ V}$ (玻璃层厚度 $2\sim 4\text{ }\mu\text{m}$, 相应击穿电压 $90\sim 160\text{ V}$), 键合强度 30 MPa 。文献^[13]中介绍了玻璃胶的配方和合成条件: 四乙醇正硅酸盐与钾盐以一定比例溶于乙醇里合成, 通过 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 滤孔过滤, 在 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 空气下退火, 有机溶剂挥发、凝胶氧化和密度增加成为玻璃, 成分中含 $5\%\sim 8\%\text{ K}_2\text{O}$ 。

为了提高 MEMS 在恶劣环境中抗腐蚀性, 有时用 Si_3N_4 薄膜, 因此需要体 Si 或玻璃与 Si_3N_4 薄膜键合。有文献表明, 在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 中将体 Si 与 Si_3N_4 薄膜/体 Si 键合, 必须采取措施。表 1 系采取氧处理 (湿氧、RIE 或去胶系统处理) 对 Si_3N_4 薄膜表面进行材料改性, 生成非常薄氮氧化硅膜 ($\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$), 然后再用 EB 对这两种材料键合^[14]。溅射玻璃薄膜于 Si_3N_4 表面, 成为实际是体 Si 与玻璃薄膜 EB 键合^[15]。文献^[16]通过玻璃上 $4\text{ }\mu\text{m Al}$ 在 $750\text{ }^\circ\text{C}$ 快速加温过程 (RTP) 中将玻璃与 Si_3N_4 薄膜/多晶 Si 键合起来。文献^[17]未对

表1 界面层辅助键合氮化硅薄膜 (根据有关论文整理)

Table 1 Interfacial layer used in enhanced bonding of silicon nitride films (data taken from different authors)

材料1	材料2	键合条件	键合强度/MPa	键合比率/%	文献
Si (100)	湿氧处理 Si ₃ N ₄ 薄膜/Si (100)* ¹	EB, 800 V, 400 ℃, N ₂ , 1 Pa, 15 min	23	100	[14]
Si (100)	RIE 处理 Si ₃ N ₄ 薄膜/Si (100)* ²		8	80	[14]
Si (100)	去胶系统处理 Si ₃ N ₄ 薄膜/Si (100)* ³		13	80	[14]
Si	溅射玻璃薄膜/Si ₃ N ₄ 薄膜/Si	EB, 400 ℃	10~20		[15]
Al/玻璃	Si ₃ N ₄ 薄膜/多晶 Si* ⁴	RTP, 750 ℃, 10 s	10	破坏断裂面只发生在玻璃上	[16]
玻璃	200 nm Si ₃ N ₄ 薄膜/玻璃	EB, 700 V, 400 ℃, 10 min			[17]

*¹ Si (100), 温度 800 ℃ 下 LPCVD 沉积厚度 100 nm Si₃N₄, 成 Si₃N₄(100 nm)/Si (100) 材料, 再经湿氧处理, 温度 1 000 ℃, 时间 30 min, 表面生成 5 nm Si_xO_yN_z 材料。*² 上述 Si₃N₄(100 nm)/Si (100) 材料, 再经 RIE 处理, 氧气氛 40 kPa, 功率 50 W, 衬底温度 100 ℃, 时间 10 min 的材料。*³ 上述 Si₃N₄(100 nm)/Si (100) 材料, 再经去胶系统处理, 氧气氛 100 Pa, 功率 1 000 W, 衬底温度 400 ℃, 时间 30 min 的材料。*⁴ 工艺过程形成 Si₃N₄ 薄膜(0.5 μm)/多晶 Si 2 μm/PSG 1.75 μm/.../Si(100) 材料

Si₃N₄ 薄膜表面进行材料改性, 而能将玻璃与 Si₃N₄ 薄膜/玻璃键合。笔者认为, Weichel 等检查键合结果是将大片体 Si 划成小样品, 而 Berthold 等则给出大片体 Si 键合结果; 大片样品能键合好, 小片样品未必都能键合好。

3 薄膜密封技术

体 Si 微机械技术是双面加工微机械技术, 不完全与平面工艺相容, 随着这套技术进展, 又出现了单面加工 Si 表面微机械加工技术^[18], 完全与平面工艺相容, 为制出微马达等会动的微执行器以及规模化生产谐振式微加速度计^[19]和集成度可与 IC 比拟的数字微镜器件 (DMD)^[20]发挥了作用。

当用表面微机械加工技术制造空腔式压力传感器时, 通过腐蚀通道或小孔腐蚀牺牲层和 Si 材料形成空腔, 然后就有一个用薄膜填满加以密封的问题。早期是整片操作 (加热和沉积) 的密封, 近来出现了局部操作的密封。

表2 微机械加工后微膜的成品率 (根据 Esashi 等^[8]资料整理)*Table 2 Diaphragm production yield after micromachining process (data taken from Esashi et al^[8])

方案	空腔形状和尺寸	牺牲层材料和尺寸/μm	各层弹性膜材料和尺寸/μm	腐蚀孔位置和尺寸/μm	密封层材料和厚度/μm	成品率/%
1	锥形 (上大下小)	多晶 Si: 40×40×0.15	Si ₃ N ₄ : 40×40×0.2, SiN: 40×40×1	膜四角, 4个, φ8	CVD SiN; h=1	3
2	圆形	多晶 Si: φ100×0.2	Si ₃ N ₄ : φ100×0.1, 多晶 Si: φ100×0.2, Si ₃ N ₄ : φ100×0.3, SiN: φ100×1	膜中心, 1个, φ10	CVD SiN, h=1 沉积到坑底	70
3	圆形 (边缘平滑)	多晶 Si: φ100×0.2	Si ₃ N ₄ : φ100×0.1, 多晶 Si: φ100×0.2, Si ₃ N ₄ : φ100×0.3, SiN: φ100×0.5, LTO: φ100×0.5	膜中心, 1个, φ10	CVD SiN, h=1 沉积到坑底	99

* 通过腐蚀孔腐蚀牺牲层和单晶 Si 用的腐蚀剂, 方案 1 是 KOH, 方案 2 和方案 3 是 TMAH

3.1 整片操作密封

Esashi 等用表面微机械技术制备 Si 微膜压力传感器^[8], 其三种方案的设计、工艺和材料不相同, 封装后器件空腔内压力都达到 67 Pa 水平, 参数符合设计要求, 但成品率相差很大, 见表 2。其中牺牲层材料和尺寸以及密封层材料和厚度大致相同, 但空腔形状、腐蚀孔位置以及弹性膜材料和厚度不相同。从该文的示意图可见, 方案 1 的坑相当深, 方案 2 和方案 3 的坑较浅; 此外腐蚀坑内单晶 Si 的腐蚀剂也不相同, 方案 1 是 KOH, 方案 2 和方案 3 是 TMAH。原文未讨论成品率相差很大的主要原因和那一步工艺影响最大。我们注意到通过腐蚀孔腐蚀 Si (多晶牺牲层和体单晶) 时有气泡产生, 因此控制气泡总量 (对方案 1, 坑最深, Si 腐蚀量最多)、逸出速度和流向 (方案 1 腐蚀速度快, 方案 2 和方案 3 腐蚀速度慢), 改进弹性膜材料 (改单层为多层, 减少内应力) 以及将密封层材料沉积到衬底 (方案 2 和方案 3 的坑较浅, 密封层

起到支撑弹性膜作用) 都有利于提高成品率。

在文献 [16] 中 (见表 1 第 5 行), 玻璃上沉积厚 $4\ \mu\text{m}$ 、宽 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 的 Al 键合环, 通过 RTP 技术, 将玻璃和 Si_3N_4 薄膜 ($0.5\ \mu\text{m}$) / Si 片键合起来, 键合面积 $300\ \mu\text{m}\times 300\ \mu\text{m}$ 或 $1\ 000\ \mu\text{m}\times 1\ 000\ \mu\text{m}$, 形成有多晶 Si 谐振器的空腔。RTP 封装后, 器件浸泡在 DI 水中, Si 谐振器的谐振频率 $19.7\ \text{kHz}$ 。高压釜加压试验表明, $35\ ^\circ\text{C}$, $100\ \text{kPa}$ 和 $95\ \% \text{RH}$ 下, 键合面积 $1\ 000\ \mu\text{m}\times 1\ 000\ \mu\text{m}$ 器件的 MTTF 为 270 年 (可信度 $90\ \%$)。MTTF 随键合环宽度增加和键合面积减小而增大。热冲击试验 $-195\sim 200\ ^\circ\text{C}$ 来回 20 次, 59 个器件中有 2 个失效。这些结果说明, 通过 Al 键合环, RTP 用于整片封装键合玻璃和 Si_3N_4 薄膜/Si 片, 不影响谐振器参数, 器件气密性和可靠性很好。

文献 [21] 介绍了“微机械空腔技术”封装的 Si 谐振结构双轴电容性加速度计, 先腐蚀 $2\ \mu\text{m}$ 浅坑, 通过 3 次沉积介质绝缘膜, 2 次沉积掺杂多晶 Si, 3 次光刻, 1 次腐蚀牺牲层, 形成电连线和谐振器铆点, 谐振器动电极和质量块, 并有小孔、多晶 Si 作顶盖的空腔, 顶盖通过多晶 Si 支柱牢牢铆在固定电极上, 然后用沉积钝化层堵死小孔。减薄 Si 片至 $380\ \mu\text{m}$ 、划成 $4\ \text{mm}^2$ 芯片, 用引线 ASIC 相连, 做成塑封器件, 注塑时压力为 $10\ \text{MPa}$, 此时, 微机械顶盖仍有很好的承受力而不破坏, 关键是每个顶盖要有足够数量的多晶 Si 支柱支撑。

3.2 局部操作密封

硅芯片局部操作密封 (SLS) 是指局部要键合的地方处于加热, 而其他有电路和传感器芯片不希望加热的地方则处于较低温度, 从而得到高强度的键合界面, 而又不影响器件性能的一种密封。显然这种密封解决了要求较高键合强度而又不影响器件性能的矛盾, 是芯片密封技术的新突破。

局部 CVD 密封最早见文献 [22], 这种密封对键合材料界面或表面粗糙度要求不太高, 甚至可以跨过互联线而达到键合。封装盖材料取 Si_1 衬底, 先热氧化生长 $1\ \mu\text{m}\ \text{SiO}_2$ (电和热隔离层), 然后 LPCVD 沉积和光刻出厚 $1\ \mu\text{m}$ 、宽 $8\ \mu\text{m}$ 条形多晶 $\text{P}^+ - \text{Si}$ 局部加热器结构。将上述结构材料与衬底材料 Si_2 材料对准合上, 使条形局部加热器与下方材料保持有 $1\ \mu\text{m}$ 间隙, 进行 LPCVD 沉积多晶 Si, 真空室硅烷 $67\ \text{Pa}$, 局部加热器温度 $800\ ^\circ\text{C}$, 约 $1\sim 2\ \text{h}$ 多晶 Si 长满间隙, 上下材料即局部键

合。局部键合处样品截面的 SEM 照片表明键合得很好。原文未交代气源进入间隙和器件中残余气体除去问题。其他 SLS 技术有局部共晶融化键合、局部焊接键合和微波局部键合等^[22]。

文献 [23] 回答了文献 [22] 等文中未交待的问题, 其原理是利用一个有缺口的多晶 Si 键合环将玻璃薄片与有浅坑的体 Si 静电键合起来, 形成有狭长通道 (截面 $1\ \mu\text{m}\times 1\ \mu\text{m}$) 内外相通的空腔, 然后放进低压硅烷系统, 由于通道下预先做好多晶 Si 加热器 (呈蛇形, 多次横跨通道), 一旦局部加热, 硅烷热分解沉积出多晶 Si 即将通道堵死。为了做成通用性 MEMS 空腔, 还在空腔中制备了 Si 梳状谐振器和 Si 除气加热器, 分别作压力测定和减少残留气体用, 总共通过 3 次沉积介质绝缘膜, 2 次沉积掺杂多晶 Si, 3 次光刻, 以及牺牲层技术完成。此后将 Si 片划成管芯 $5\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$ (每个内外相通空腔内有两个 Si 梳状谐振器和两个 Si 除气加热器), 放入 24 针 DIP 进行装架焊接引线后, 在 PECVD 中抽空至 $33\ \text{Pa}$, $2\ \text{h}$, 充硅烷, 流量 $40\ \text{mL/s}$, 接通有缺口的多晶 Si 加热器电源加热约 $1\sim 2\ \text{h}$, 沉积的多晶 Si 就将狭长通道堵死, 密封完成, 但空腔内仍有残留气体, 再接通一个 Si 除气加热器电源 ($130\ \text{mW}$, $5\ \text{min}$), 空腔内硅烷热分解后气压降低, 由事先标定的谐振器 Q 值与气压的关系, 得气压为 $4\ \text{Pa}$, 以后如气压升高, 可起第二个除气加热器予以降低。可见这套技术的优点非常明显, 完全与平面工艺相容, 只在局部加热, 不影响 MEMS 和 IC 管芯性能, 技术成熟后的划片可移到全部工艺的最后一步。

3.3 选择防护

对 MEMS 进行防护也是封装要做的事, 在 MEMS 中往往要选择防护。

目前商品 ADXL50 等谐振式微加速度计^[19]和集成度可与 IC 比拟的数字微镜器件 (DMD)^[20]用表面微机械生产。ADXL50 由 BiCMOS IC (具有检测、放大和自检功能, 先做) 和对加速度敏感的多晶 Si 梳状微振子 (后做) 组成, 完成后腐蚀牺牲层, 在电接触处沉积 Al 和金属化, 然后沉积氮氧化硅保护 IC 电路和引线, 但留出敏感元件部分 (影响加速度), 引线后在 N_2 气氛下封入 TO100 金属管壳。器件工作温度 $-40\sim 105\ ^\circ\text{C}$, 加速度量程 $\pm 50\ \text{g}$, 灵敏度 $(20\ \text{mV})/\text{g}$, 频响 $1\ \text{kHz}$, 从 $1.2\ \text{m}$ 高度跌落到平地无问题, 可耐瞬间 (0.1

ms) 脉冲加速度 $1 \times 10^4 g$, 工作寿命 15 年。DMD 由 $1 \text{ kb} \times 1 \text{ kb}$ 的 CMOS 静态存储器 (下层, 先做) 和数量等于存储器、可摆动 $\pm 10^\circ$ 的微机械 Al 镜 (上层, 后做) 组成, 引线后在干燥气氛下装入类似 IC 封装、非常平整透光玻璃上盖板的管壳, 工作寿命 15 年。笔者曾讨论这类带有小间隙 MEMS 器件因湿度引起微结构与衬底粘合而影响器件可靠性问题^[24], 所以在干燥气氛下封装是绝对必需的。此外 DMD 器件失效试验表明, 最大的罪魁祸首是微颗粒, 所以整个工艺环境必需绝对干净。

微机械压力传感器为了检测外部压力, 内部必须接触外部氛围, 其中金属 Al 压焊点、Al 引线等必须防腐, 而敏感膜则不能有防护层 (影响器件灵敏度和有加速度时器件零位输出)。文献 [25] 等用的是对逐个器件进行封装^[25]。当器件键合到管座和焊好 Al 引线后, 就往管座里管芯上粘一个模压塑料环或微机械加工 Si 微结构环, 环尺寸取内径大于敏感膜、外径小于压焊点, 高度盖住鼓起的 Al 引线 (太低盖不住, 太高会减低引线强度), 然后在环外灌入凝胶并经一定温度处理。实验表明这种器件测海水和酸溶液压力时有很好耐腐蚀性。

文献 [26] 对逐个管芯表面压焊点涂焊 UV 光刻胶 polydimethylsiloxane (PDMS) 作成防腐蚀水流量计, 效果很好, 整片涂焊 PDMS 技术最近又有报道, 在压阻敏感膜处没有胶, 为此制备了专用涂胶机, 涂层均匀, 厚可至几毫米。实验取 $\phi 100 \text{ mm}$ Si 片, 有管芯约 170 个, 管芯四角有压焊点, 敏感膜尺寸 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 整片涂焊 PDMS, 再曝光、显影、去膜、坚膜, 成为除敏感膜外整片管芯表面都涂上厚 1.8 mm 光刻胶, 然后从背面整片各向异性腐蚀 Si, 划成 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 小片, 逐个装入 TO8 管壳, 若需要还可在金属引线及焊点上再涂硅凝胶和加温处理作进一步防腐处理。

4 讨论

从 MEMS 研究开始就应考虑封装。一个 MEMS 器件无论性能多好, 没有好的封装是不能实用的。研究一开始, 要考虑器件的作用 (测压力或加速度等)、具体指标和用那些辅助元件 (电阻、电容和晶体管等) 来提高器件性能和校正, 还要考虑适应工作环境 (温度、气氛、受力和生物相容性等) 的封装措施, 以及器件工艺过程中测量 (不能

等封装后才测量) 等。增加元件数目和封装措施会增加芯片复杂性、减低成品率, 从而增加成本; 若不做, 器件功能不能发挥, 长期稳定不能保证。因此应该在保证器件功能下尽量减少芯片复杂性, 据此决定器件结构、特殊结构 (腔、桥、孔、沟、道等), 电路、引线和焊线, 密封、封装和工艺等。

文献中有过未充分考虑封装而走弯路的例子:

文献 [1] 中提到油矿地音探测器 (一种极低噪声加速度计), 要求器件尺寸小, 测量范围 $0.1 g$, 在 200 Hz 带宽下噪声 $0.01 g$, 据此选择尽可能大的质量块和在真空下工作。用 2 片 Si 片, 1 次 Au-Si 键合, 1 次真空 EB 键合, 背面引线孔金属化完成。到此才发现芯片面积牺牲掉近一半, 还没有考虑与电路混合集成, 不得不重新试验其他方案, 芯片和帽盖用环氧树脂封装或芯片和 IC (又作帽盖) 用 SnPb 封装等。另一件工作, 他们的加速度步行计在到芯片工作完成时, 应用一方提出要求将芯片直接焊到树脂板上, 为此又重新化了一年时间研究新封装, 用树脂封装芯片和帽盖以保护微结构谐振器, 背面引出的引线改为正面引出。

文献 [8] 的真空电容压力传感器到实际应用时才发现原器件有缺点, 原设计测压小孔和引线小孔做在同一面玻璃上, 不利于连接系统。为此将原来 G_1 面上引线小孔做到 G_2 面上, 引线从这里引出, 将 G_1 与可伐管子焊接, 这样测压小孔就可以方便地与系统连接。

文献 [27] 的结果说明, 商品 Si 压阻微机械压力传感器经过改进封装和精密校正, 可做成用于探测火星上很低压力的精密低压传感器。一般认为商品 Si 压阻微机械传感器用于廉价和精度不太高场合, 但实验表明用这些管芯, 改进封装和采取措施后可以大大改进参数。用于火星探测器的压力传感器见表 3。第 3 列是带温度校正仪表的结构型压力传感器, 参数相当好, 但质量大, 功耗很高; 第 4 列是商品 Si 压阻微机械传感器, 动态范围和耐冲击不成问题, 但其他参数远不能满足要求; 第 5 列是带有温度校正 ASIC 的低应力 Si 压阻微机械压力传感器, 参数满足要求, 重量和功耗很低, 其芯片选自商品, 关键是在装架和封装时不带进应力。为隔离应力和温度变化引起不同材料的热应力和震动, 采用多层键合和粘结技术, 如 Si 压力敏感芯片本身先与第二层 Si 衬底键合, 再与 -80°C 仍有弹性的硅胶薄膜软性粘合, 成为芯片组件, 再将芯

片组件和 ASIC 装入多层陶瓷衬底,用树脂与 Ti 基座粘合,还有连接 Al 引线要非常短且平直,以及为防止硅胶流动引起器件零位漂移,调试好的器件,其温度应保持在 $<40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从这里可看出封装步骤繁多,其成本远远超过芯片价格。

表3 用于火星探测器的压力传感器^[27]

Table 3 Piezoresistive pressure sensors used in Mars Pathfinder^[27]

参数	要求值	压力传感器* ¹	微机械传感器* ²	ASIC 微机械传感器* ³
失调/kPa	<0.2		<5	
量程/kPa	>0.14		100	
温度系数/Pa (100 °C 以内)	<200		4000	
分辨率/Pa	<5	<0.1		5
精度/Pa	<50	<3	<500	± 50
耐冲击	$>100\ 000\ \text{g}$	OK	OK	OK
质量/kg		0.5		0.03
功耗/mW		250		50

*1 估计是一种结构型传感器; *2 Lucas Nova Sensors 产品;

*3 芯片从 Lucas Nova Sensors 产品中挑选,封装时注意应力

参考文献

- [1] Delapierre G. MEMS and microsensors, from laboratory to commercialization [A]. Proceeding of 10th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators [C], Transducers '99, Sendai, Japan, Paper Number 1A2, 1999
- [2] Senturia S T, Smith R L. Microsensor packaging and system partitioning [J]. Sensors and Actuators, 1988, 15:221~234
- [3] Tabat O, Shimaoka K, Asashi R, et al. Micromachined sensors using polysilicon sacrificial etching technology [J]. Sensors Materials, 1996, (8): 57~67
- [4] Gieles A C M, Somers G H J. Miniature pressure transducer with silicon diaphragm [J]. Philips Tech Rev 1973, 33: 14; Tufte O N, Chapman P W, Long D. Silicon diffused element piezoresistive diaphragms [J]. J Appl Phys, 1962, 33: 322; Clark S K, Wise K D. Pressure sensitivity in anisotropically etched thin-diaphragm pressure sensors [J]. IEEE Trans Electron Devices, 1979, ED-26: 1887
- [5] Ko W H, Suminto J T, Yeh G J. Micromachining and micropackaging of transducers [M]. Elsevier Science Publishers, 1985
- [6] Walls G, Pomerantz D. Field assisted glass-metal sealing [J]. J Appl Phys, 1969, 40: 3946~3949
- [7] 黄庆安. 硅微机械加工技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1996. 207~228
- [8] Esashi M, Sugiyama S, Ikeda K, et al. Vacuum-sealed silicon micromachined pressure sensors [J]. Proc IEEE, 1998, 86: 1627~1639
- [9] Kobayashi S, Hara T, Oguchi T, et al. Double-frame silicon gyroscope packaged under low pressure by wafer bonding [A]. Proceeding of 10th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators [C], Transducers '99, Sendai, Japan, Paper Number 3D1.3, 1999
- [10] Lasky J B. Silicon-insulator by bonding and etch back [A]. Proc. IEDM [C], Washington, USA, 1985. 684~687; Shimbo M, Kurukawa F, Fukuda F, et al. Silicon to silicon direct bonding method [J]. J Appl Phys, 1986, 60: 2987
- [11] Jiao J W, Lu D R, Xiong B, et al. Low temperature SDB and interface behavior [J], Sensors and Actuators, 1995, A50: 117~120; 焦继伟, 陆德仁, 王涓源. 低温 SDB 技术研究及表面吸附态的影响 [J]. 半导体学报, 1994, 15: 795~798
- [12] Petersen K, Barth P, Poydock J. Silicon fusion bonding for pressure sensors [A]. Rec. IEEE Solid-State Sensors and Actuators Workshop [C], 1988: 144~147; Barth P. Silicon fusion bonding for fabrication of sensors, actuators and microstructures [J]. Sensors and Actuators, 1990, A21-23: 919
- [13] Quenzer H J, Schulz A V, Kinkopf T, et al. Anodic bonding on glass layer prepared by a spin-on glass process [A]. Proceeding of 11th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators [C], Transducers 01, Munich, Germany, 2001: 230~233
- [14] Weichel S, de Reus R, Bouaidat S, et al. Low temperature anodic bonding to silicon nitride [A]. Proceeding of 10th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators [C], Transducers '99, Sendai, Japan, Paper Number 3P1.16, 1999
- [15] Nese M, Hanneborg A. Anodic bonding of silicon to silicon wafers coated with aluminum, silicon oxide, polysilicon or silicon nitride [J]. Sensors and Actuators, 1993, A 37-38: 61~67
- [16] Chiao M, Lin L W. Accelerated hermeticity testing of glass-silicon package formed by aluminum-to-silicon nitride bonding [A]. Proceeding of 11th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators [C], Transducers '01, Munich, Germany. 2001: 182~185
- [17] Berthold A, Nicola L, Sarro P M, et al. A novel technological process for glass-to-glass anodic bonding [A]. Proceeding of 10th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators [C], Transducers 99,

- Sendai, Japan Paper Number 4A4.4 1999
- [18] Howe R T. Surface micromachining for microsensors and microactuators [J]. *J Vac Sci Technol*, 1988, B 6: 1809~1813
- [19] Kuennel W, Sherman S. A surface micromachined silicon accelerometer with on-chip detection circuitry [J]. *Sensors and Actuators*, 1994, A 45: 7~16
- [20] Sampell J B. The digital micromirror devices and its application to projection displays [A]. *Proceeding of 8th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators [C], Transducers '93, Yokohama, Japan. 1993: 24~29; Douglass M R. Why is the Texas Instruments digital micromirror devices (DMD) so reliable [DB/OL]. <http://www.ti.com/dlp>.*
- [21] Aigner R, Oppermann K G, Kapels H, et al. Cavity-micromachining technology: A zero-package solution for inertial sensors [A]. *Proceeding of 11th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators [C], Transducers 01, Munich, Germany, 2001. 186~189*
- [22] He G H, Lin L W, Cheng Y T. Localized CVD bonding for MEMS packaging [A]. *Proceeding of 10th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators [C], Transducers '99, Sendai, Japan, Paper Number 4A4.1, 1999*
- [23] Chang-Chien P P, Wise K D. Wafer-level packaging using localized mass deposition [A]. *Proceeding of 11th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators [C], Transducers '01, Munich, Germany, 2001. 182~185*
- [24] 王渭源. 影响微电子机械系统成品率和可靠性的粘合力 and 摩擦力 [J]. *中国工程科学*, 2000, 2(3): 36~41
- [25] Li G, Schmeising J, McNeil A, et al. Selective encapsulation using a polymetric or bonded silicon constraint dam for media compatible pressure sensor applications [A]. *Proceeding of 11th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators [C], Transducers 01, Munich, Germany, 2001. 178~181*
- [26] Krassow H, Campabadal F, Tamayo E L. Wafer level packaging of silicon pressure sensors [A]. *Proceeding of 10th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators [C], Transducers99, Sendai, Japan, Paper Number 3P1.9, 1999*
- [27] Reynolds J K, Catling D C, Blue R C, et al. Packaging and calibration of a piezoresistive pressure sensor for high accuracy at low temperatures and pressures [A]. *Proceeding of 10th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators [C], Transducers 99, Sendai, Japan, Paper Number 3P1. 22, 1999*

Packaging of Micro Electro Mechanical Systems Based on Bulk Silicon Bonding and Film Sealed Technology

Wang Weiyuan, Wang Yuelin

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

[Abstract] The packaging of micro electro mechanical systems (MEMS) is referred to first-level packaging and limited generally to the preservation of wafer in this paper. It is based on bulk silicon bonding technology and film sealed technology. The bulk silicon bonding technology includes electrostatic bonding, silicon direct bonding and interfacial layer assisted bonding. It is used for making material acting as substrate or cover of the chip. The film sealed technology includes whole-wafer operation, local-wafer operation and selective preservation. It is used to seal micro channel or micro hole to form a vacuum or low-pressure cavity or protect from atmosphere influence. The very high importance not to forget packaging at the beginning of a project, when hoping to industrialize MEMS is discussed. In order to obtain high performance-price ratio, it is necessary to weigh the device performance against the chip complexity. The commercialized pressure sensors, accelerometers, digital micro mirror devices, etc., collected from literatures are used as examples.

[Key words] packaging of MEMS; bulk silicon bonding technology; film-sealed technology