

选择性阳极键合技术在光栅陀螺中的应用

郝飞帆^{1,2}, 李孟委^{1,2}, 王俊强^{1,2}, 金丽^{1,2}, 耿浩¹

(1. 中北大学, 太原, 030051; 2. 中北大学, 南通智能光机电研究院, 南通, 226000)

摘要: 阳极键合技术广泛应用在晶圆级 MEMS 器件制造和封装当中, 对于有悬臂梁结构器件容易在键合时发生吸合。采用选择性阳极键合技术防止陀螺在键合中吸合失效。推导了陀螺梁与玻璃的静电吸合电压公式并建立吸合电压与硅结构-玻璃间隙关系模型。采用深硅制作陀螺结构, 在玻璃基底溅射 Al/Cr 制作光栅, 最后进行阳极键合。结果表明, 键合界面没有缺陷, 铬及其氧化物导电抗吸合性使得硅-玻璃阳极键合未发生静电吸合失效现象, 对样品进行抗剪强度测试, 得出平均键合强度为 33.94 MPa, 键合质量良好。

关键词: MEMS 陀螺; 阳极键合; 静电吸合; 键合强度

中图分类号: TG 456.9

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20200419001

0 序言

阳极键合技术以其键合温度低、键合时间短、工艺简单以及硅-玻璃良好键合等特性^[1], 广泛应用于 MEMS 器件的气密性封装、垂直互联以及单片集成等方面^[2-5]。

MEMS 器件设计及加工过程中, 硅-玻璃的阳极键合技术是体硅工艺中的一项关键技术^[6]。在利用阳极键合制作 MEMS 器件时常用到两种加工方法: 第一种方法中, 首先进行体硅工艺, 通过反应离子深刻蚀技术制作可动的硅结构, 制作玻璃基底, 最后通过阳极键合实现二者的结合^[6-7]。第二种方法中, 通过硅-玻璃阳极键合, 经减薄后结构释放或者采用湿法腐蚀技术进行结构释放^[8-12]。若可动硅结构刚度较小, 在第一种方法中容易产生静电黏附, 导致器件失效; 第二种方法虽然可以通过制作凸块来避免静电黏附, 但是制作工艺比较复杂, 且键合后再刻蚀会增加玻璃粗糙度, 影响光学检测。同时阳极键合的质量直接决定了 MEMS 器件的可靠性, 键合强度太小, 在加工、受到外界冲击时硅-玻璃可能开裂, 从而导致器件失效。

文中针对以上问题, 采用铬作为选择性阳极键合吸合阻挡层, 进行光栅陀螺的制作^[2,13], 并且进行

了键合强度的测试。首先对陀螺结构与硅吸合进行理论分析, 随后进行陀螺硅结构制作, 在玻璃基底中采用铝/铬复合金属膜作为光栅层, 最后进行键合。通过键合界面和抗剪强度分析验证在几微米间隙下选择性阳极键合避免静电吸合, 键合强度良好。

1 理论分析

1.1 阳极键合

阳极键合概念最早由 Wallis 和 Pomerantz 提出^[14], 之后在微电子、微机械和光电子等诸多领域应用, 该技术现已成为支撑微机电系统的关键技术之一^[15]。当硅-玻璃键合时, 硅片放在加热台上加热(其温度低于玻璃的软化点)并接阳极, 玻璃接阴极, 在阴极阳极之间电场的作用下, Pyrex 玻璃的钠离子漂移到负电极, 当温度升高到键合温度后在硅-玻璃界面会形成一层空间电荷区也称耗尽层, 与此同时在硅片表面上生成镜像电荷, 如图 1 所示。在正负电荷相互作用下, 硅-玻璃界面形成强大的静电

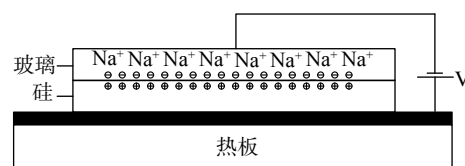


图 1 阳极键合示意图

Fig. 1 Schematic of anode bonding

收稿日期: 2020-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61573323); 国家自然科学基金资助项目(61571405); 国家重点研发计划(2017YFF01052000)。

吸合力,使得硅片和玻璃紧密接触产生微小形变,在加热加压条件下界面发生阳极氧化反应,生成牢固的化学键 O-Si-O^[16].

1.2 静电吸合

在阳极键合过程中硅-玻璃之间施加的电压在 200~1000 V 之间,静电力若大于硅可动结构的机械回复力,则可动结构与玻璃发生吸合,这种现象称为静电吸合.这里光栅陀螺采用的是离面检测方式,可动结构在离面方向刚度较小,可动结构与玻璃基底间隙只有几微米,这容易在键合时发生硅-玻璃静电吸合,导致器件失效,如图 2 所示.

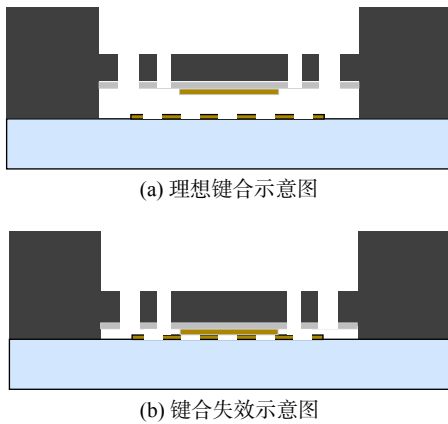


图 2 光栅陀螺不同情况下键合示意图

Fig. 2 Bonding diagram of grating gyro under different conditions. (a) schematic diagram of ideal bonding; (b) schematic diagram of bonding failure

图 3 所示,在键合电压作用下,光栅陀螺离面可动结构受到的静电力与其机械回复力大小相等,方向相反.

$$Kx = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 L_1 W_1 U_0^2}{2(D-x)^2} \quad (1)$$

式中: x 为可动结构在键合电压作用下的位移; ε 为相对介电常数; ε_0 为真空介电常数; L_1 为可动结构与玻璃重叠的长度; W_1 为可动结构与玻璃重叠的宽度; U_0 为键合电压; D 为可动结构与玻璃的初始间隙; K 为等效弹性系数.

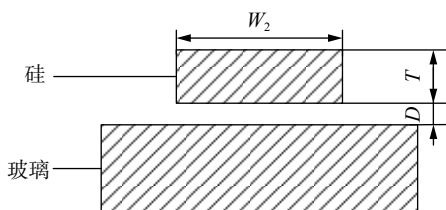


图 3 梁与玻璃截面示意图

Fig. 3 Schematic of cross-section of the beam and glass

根据材料力学相关知识,矩形横截面的单端固定梁等效弹性系数为

$$K = \frac{ET^3W_2}{L_2^3} \quad (2)$$

式中: E 为单晶硅弹性模量; T 为梁的厚度; W_2 为梁的宽度; L_2 为梁的长度.根据静电吸合相关知识,在键合时要避免静电吸合,可动结构的位移 x 必须小于 $D/3$,因此由式 (1) 和式 (2) 可得最大电压为

$$U_0 \leq \sqrt{\frac{8ET^3W_2D^3}{27L_2^3\varepsilon\varepsilon_0L_1W_1}} \quad (3)$$

表 1 是陀螺梁参数,将现陀螺结构和材料参数带入公式 (3) 可以得吸合电压约为 50 V,这远小于阳极键合电压,即使采用最小的键合电压仍会发生吸合,因此有必要采取措施.从公式 (3) 中还可得到可动结构与玻璃的初始间隙 D 与避免吸合的最大键合电压的关系,建立 D 与 U_0 的关系如图 4 所示.

表 1 光栅陀螺结构参数 (μm)

Table 1 Structure parameters of grating-based gyroscope

T	L_1	L_2	W_1	W_2	D
80	2 200	2 014	2 200	70	5

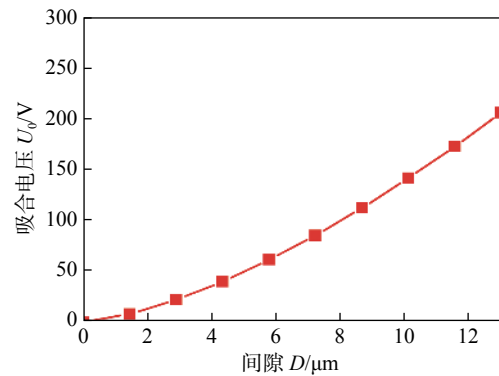


图 4 吸合电压与间隙关系示意图

Fig. 4 Schematic of the relationship between pull-in voltage and gap

从图 4 中可以看出随着 D 的增大,键合电压 U_0 也在增大, D 在 12 μm 之内键合电压 U_0 数值仍远小于阳极键合最小电压,继续增加 D 可以达到阳极键合电压范围,但 D 的增加意味着加工硅片方形腔深度的增加.硅片表面存在较深的腔体会导致匀胶的不均匀,进而会降低光刻质量,使得结构线宽增加^[17].采用喷胶^[18]方法可以使光刻胶均匀,但其致密性不好,在刻蚀机中光刻胶在高温下容易产生气泡,导致刻蚀图形的失真.所以方形腔不易刻蚀太深,而浅腔容易在键合过程发生吸合,因此考虑

到工艺可实施性也有必要采取措施,在保证键合质量下避免在键合中发生吸合现象.

2 试验与测试

2.1 光栅陀螺工艺设计及加工

光栅陀螺中硅上反射镜与光栅的平行度要求严格,而阳极键合在高的键合电场下可以很好解决这个问题并且键合温度低,结构的残余应力较小.

设计深硅刻蚀与 Si-Glass 键合技术的工艺流程如图 5 所示. 硅结构采用 $400\ \mu\text{m}$ 双抛 P 型硅片,刻蚀面晶相 $\langle 100 \rangle$,表面粗糙度约为 $10\ \text{nm}$; 为了保证键合均匀、键合质量良好,基底采用与双抛硅片膨胀系数接近的 $500\ \mu\text{m}$ 厚的 BF33 玻璃.

玻璃工艺制作: 通过磁控溅射在玻璃层上沉积采用两种类型光栅层, ① Al/Cr 光栅层, 铬作为键合阻挡层, ② Al 光栅层 (图 5a); 图形化后采用剥离制成光栅 (图 5b).

陀螺结构制作: 采用感应耦合等离子体 (ICP) 以 $6.5\ \mu\text{m}/\text{min}$ 的蚀刻速率在 Si 的正面刻蚀一个 $5\ \mu\text{m}$ 深的方形腔体, 在腔体内用于陀螺结构制作. 通过感应耦合等离子体 (ICP) 以同样的蚀刻速率在 Si 的方形腔外刻蚀 $0.7\ \mu\text{m}$ 深的电极槽 (图 5c); 采用离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 在 $400\ \mu\text{m}$ 厚的 Si 晶片刻蚀面上沉积 SiO_2 钝化层, 通过磁控溅射在 SiO_2 层上沉积 Al 电极层 (图 5d); 图形化后采用干法刻蚀制成 (图 5e); 为了与玻璃键合, 采用湿法腐蚀手段去除金属电极区域以外的钝化层, 露出 Si 表面 (图 5f). 在 $5\ \mu\text{m}$ 深的方形腔体内采用 RIE 去除陀螺结构上的 SiO_2 钝化层. 在陀螺结构深硅刻蚀中, 额外增加了 O_2 的通入, 生成的侧壁阻挡层更加稳定, 减少对结构侧壁刻蚀, 以 $3\ \mu\text{m}/\text{min}$ 的蚀刻速率刻蚀陀螺正面结构, 刻蚀深度为 $80\ \mu\text{m}$ (图 5g), 刻蚀局部 SEM 图 (图 6a), 并对梁结构进行测量 (图 6b), 设计值为 $30\ \mu\text{m}$, 测量值为 $29.63\ \mu\text{m}$, 光刻版本身有 $0.2\ \mu\text{m}$ 的误差, 余下的 $0.17\ \mu\text{m}$ 是由光刻和刻蚀导致的误差. 最后以 $6.5\ \mu\text{m}/\text{min}$ 的蚀刻速率进行陀螺结构的背部释放, 刻蚀深度为 $315\ \mu\text{m}$ (图 5h).

阳极键合: 阳极键合一般是在 $200\sim 500\ ^\circ\text{C}$, 对硅-玻璃施加 $200\sim 1000\ \text{V}$ 电压完成键合. 硅的热膨胀系数随着温度升高而升高, 玻璃热膨胀系数基本不会随着温度而变化, 键合温度太高硅-玻璃会产

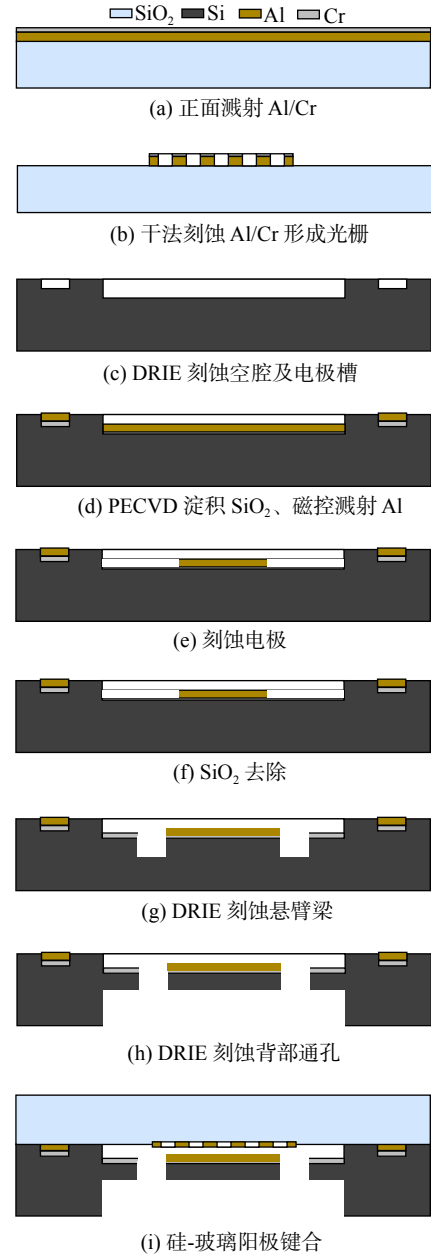


图 5 工艺流程示意图

Fig. 5 Schematic of processing. (a) sputtering Al/Cr; (b) dry etching of Al/Cr to form grating; (c) DRIE etching cavity and electrode groove; (d) SiO_2 was deposited by PECVD and Al was deposited by magnetron sputtering; (e) etching Al electrode; (f) removal of SiO_2 ; (g) DRIE etching beam; (h) DRIE etching back structure; (i) silicon-glass anodic bonding

生热失配应力, 损坏键合晶圆^[17]. 在相同键合电压下, 温度升高, 键合强度增加, 在相同键合温度时, 增加电压, 晶圆结合率也会增加^[19], 良好的键合质量一般需要在 $300\sim 500\ ^\circ\text{C}$ 才能获得^[17]. 综上考虑文中用 MA6 晶圆对准机将 Si-Glass 对准后在晶圆键合机中温度为 $330\ ^\circ\text{C}$, 直流电压 $1000\ \text{V}$ 条件下进行阳极键合 (图 5i).

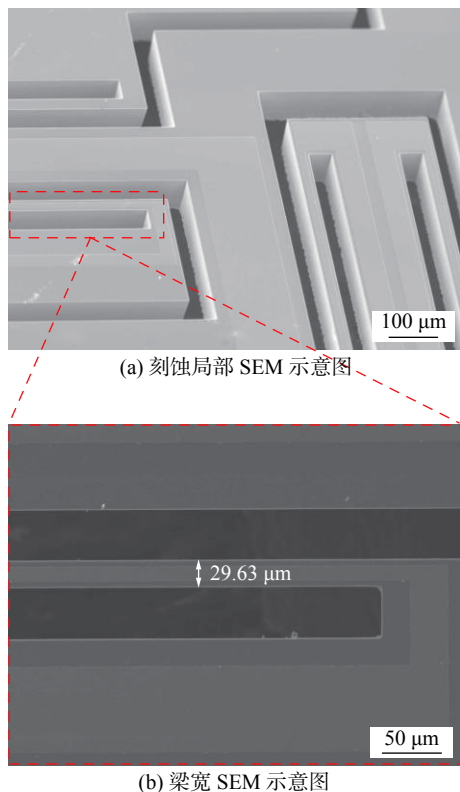


图 6 刻蚀结构 SEM 示意图

Fig. 6 SEM Schematic of etched structure. (a) schematic diagram of etched local SEM; (b) SEM schematic diagram of beam width

2.2 测试与分析

图 7 为键合 SEM 示意图。键合完成的器件经过划片处理、界面切割后截面未发现吸合现象 (图 7a), 这是由于铬作为阻挡层, 玻璃中的氧离子向硅移动时, 与铬反应生成的氧化铬为导体^[13], 氧离子向硅迁移时会从导体中得到电子生成氧气, 硅-玻璃之间静电场消失, 阻止氧离子向硅中移动, 因而无法生成化学键 O-Si-O。若只有铝材料, 在键合时, 玻璃中的氧离子与铝反应生成铝的氧化物, 此时氧离子仍向硅迁移, 硅-玻璃之间静电场仍然存在, 因而生成化学键 O-Si-O, 导致吸合现象, 器件失效 (图 7b)。

对键合的表征有以下两个方面 (图 8): 首先通过 SEM 成像方法进行测试^[20]。键合界面 (图 8a), 通过 SEM 可以明显看到键合界面没有缺陷, 且中间过渡层, 宽度约为 $1\ \mu\text{m}$, 过渡层是硅-玻璃键合的直接原因。其次采用破坏性试验对键合芯片进行抗剪强度试验。抗剪强度测试采用 Dage4000 推拉机进行, 此设备由驱动部分、控制系统部分和测量部分、显示部分组成。将键合样品固定到夹具之间, 以推断传感器硅-玻璃得到的最大剪切力进行键合强度表征^[1]。

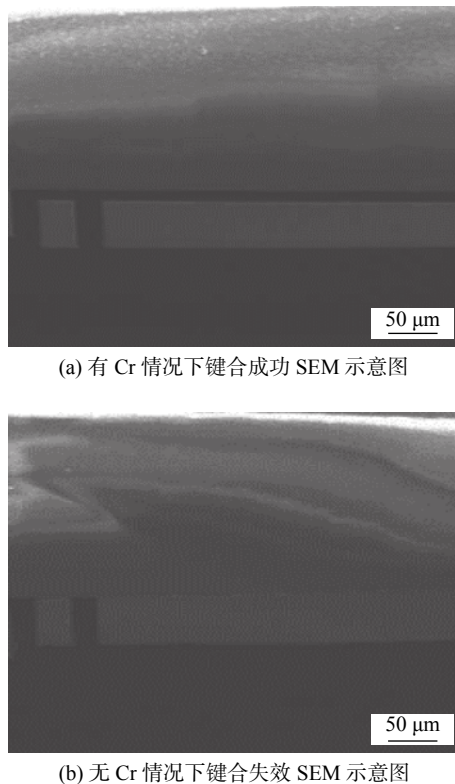
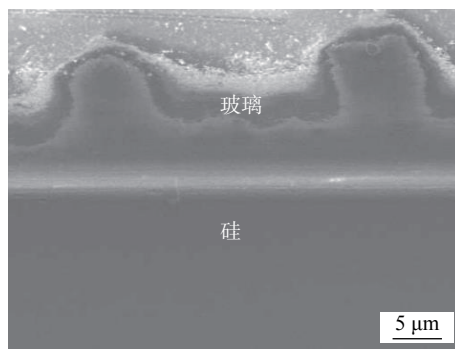
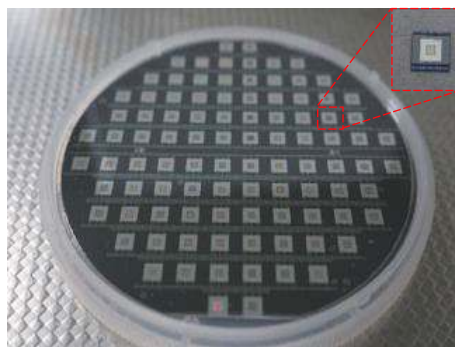


图 7 有 Cr 与无 Cr 情况下键合 SEM 示意图

Fig. 7 SEM schematic of bonding. (a) with cr; (b) without Cr



(a) 硅-玻璃键合界面 SEM 示意图



(b) 晶圆键合示意图

图 8 硅-玻璃键合示意图

Fig. 8 Schematic of silicon-glass bonding. (a) SEM schematic diagram of silicen-glass bonding interface; (b) schematic diagram of wafer bonding

将晶圆切成样品 (图 8b) 进行测试 (图 9), 器件破坏载荷示意图如图 9a 所示. 选取的 5 个器件抗剪强度范围为 31 ~ 36 MPa (图 9b), 平均抗剪强度为 33.94 MPa, 键合质量良好.

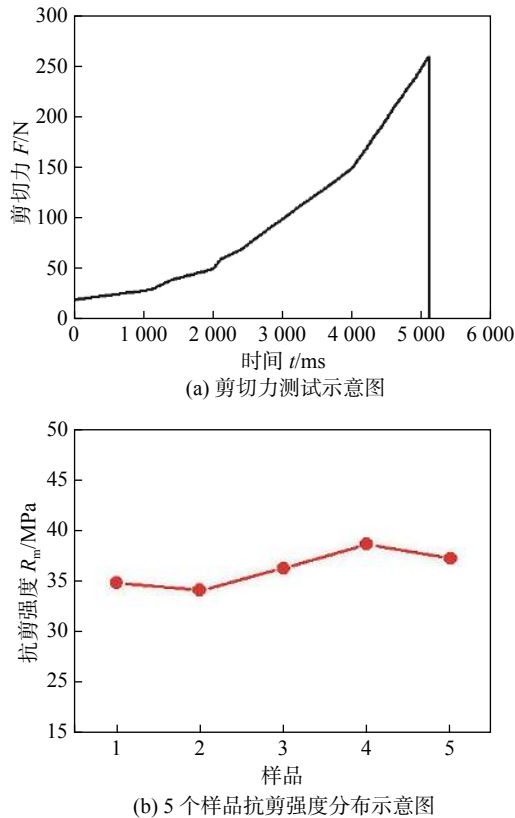


图 9 抗剪强度测试示意图

Fig. 9 Schematic of shear strength test. (a) schematic diagram of shear test; (b) schematic diagram of shear strength test for five

3 结论

(1) 推导了长方形梁结构与玻璃静电吸合电压公式并加以计算, 从理论上得出吸合电压值远小于键合电压, 因此有必要采取措施防止吸合, 并建立可动结构与玻璃的初始间隙 D 与吸合电压 U_0 的关系模型, D 在 $12\text{ }\mu\text{m}$ 之内未能达到键合电压条件, 而增大 D 不利于工艺的可实施性, 进而也说明了采取措施的必要性.

(2) 对 Al/Cr, Al 光栅玻璃基底进行键合试验, 通过界面分析发现, 铬阻挡层的存在使得键合成功实现且避免吸合, Al 光栅玻璃基底发生吸合.

(3) 通过键合强度测试得出光栅陀螺平均抗剪强度 33.94 MPa, 键合质量良好.

参考文献

- [1] 谷专元, 何春华, 何燕华, 等. MEMS 硅玻璃阳极键合工艺评价方法 [J]. 传感器与微系统, 2017(10): 54 – 56.
Gu Zhuanyuan, He Chunhua, He Yanhua, *et al.* MEMS silicon glass anode bonding process evaluation method[J]. Sensors and Microsystems, 2017(10): 54 – 56.
- [2] 侯占强, 董培涛, 肖定邦, 等. 一种避免静电黏附失效的低应力阳极键合技术 [J]. 纳米技术与精密工程, 2011(5): 74 – 78.
Hou Zhanqiang, Dong Peitao, Xiao Dingbang, *et al.* A low-stress anodic bonding technology to avoid electrostatic adhesion failure[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2011(5): 74 – 78.
- [3] San H, Li Y, Song Z, *et al.* Self-packaging fabrication of silicon-glass-based piezoresistive pressure sensor[J]. IEEE Electron Device Letters, 2013, 34(6): 789 – 791.
- [4] Wenyin L, Xuezhong W, Dingbang X, *et al.* Characterization of signal transfer performance of a through glass via (TGV) substrate with silicon vertical feedthroughs[J]. Microelectronic Engineering, 2016, 165: 52 – 56.
- [5] Torunbalci M M, Alper S E, Akin T. A novel fabrication and wafer level hermetic sealing method for SOI-MEMS devices using SOI cap wafers[C]//IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2015), 2015: 409 – 412.
- [6] 阮勇, 贺学锋, 张大成, 等. 微米尺度下键合强度的评价方法和测试结构 [J]. 微电子学与计算机, 2005(8): 112 – 115.
Ruan Yong, He Xuefeng, Zhang Dacheng, *et al.* Evaluation method and test structure of bonding strength at the micrometer scale[J]. Microelectronics and Computers, 2005(8): 112 – 115.
- [7] Qiang X, Wenyin L, Xiangming X, *et al.* A novel high-sensitivity butterfly gyroscope driven by horizontal driving force[C]// IEEE Sensors, Glasgow, 2017: 2064 – 2071.
- [8] Reddy J, Pratap R. Si-gold-glass hybrid wafer bond for 3D-MEMS and wafer level packaging[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2017, 27(1): 015005.
- [9] Gao Y, Huang L, Ding X, *et al.* Design and implementation of a dual-mass MEMS gyroscope with high shock resistance[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1037(1–18).
- [10] Xu L, Li H, Yang C, *et al.* Comparison of three automatic mode-matching methods for silicon micro-gyroscopes based on phase characteristic[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(3): 610 – 619.
- [11] Tez S, Akin T. Fabrication of a sandwich type three axis capacitive MEMS accelerometer[C]//IEEE Sensors, Baltimore, 2013: 1–4.

- [12] Xie J, Yang J, Zhou J. Vibrational energy loss analysis of a MEMS disk resonator gyroscope[C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Auckland, 2018: 385 – 390.
- [13] Veenstra H T T, Berenschot J W, Gardeniers J G E, *et al.* Use of selective anodic bonding to create micropump chambers with virtually no dead volume[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2001, 148(2): 68 – 2.
- [14] Wallis G, Pomerantz D I. Field assisted glass-metal sealing[J]. *Journal of Applied Physics*, 1969, 40(10): 3946 – 3949.
- [15] 陈大明, 胡利方, 时方荣, 等. 硅-玻璃-硅阳极键合机理及力学性能 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(2): 123 – 127.
- Chen Daming, Hu Lifang, Shi Fangrong, *et al.* Silicon-glass-silicon anode bonding mechanism and mechanical properties[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(2): 123 – 127.
- [16] 祁雪, 黄庆安, 秦明, 等. 单片集成 MEMS 中的阳极键合工艺 [J]. *电子器件*, 2005(4): 51 – 54.
- Qi Xue, Huang Qingan, Qin Ming, *et al.* Anodic bonding process in monolithic integrated MEMS[J]. *Electronic Devices*, 2005(4): 51 – 54.
- [17] 王喆焱. 微系统设计与制造 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- Wang Zheyao. *Microsystem design and manufacturing*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [18] Nga P P, Boellard e, Pasqualina M, *et al.* Spin, spray coating and electrodeposition of photoresist for MEMS structures[J]. *Journal of Micro Electro Mechanical Systems*, 2004, 13(6): 491 – 499.
- [19] 胡宇群, 董明佳. MEMS 阳极键合界面层的力学行为研究进展 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2015, 47(4): 474 – 486.
- Hu Yuqun, Dong Mingjia. Research progress of mechanical behavior of MEMS anode bonding interface layer[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 47(4): 474 – 486.
- [20] Zheng X, Yan X, Song Z, *et al.* Direct Al-Al contact in silicon-Pyrex7740 anodic bonding for hermetic package and electrical interconnecting[C]//2011 6th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Kaohsiung, 2011: 764 – 767.
-
- 第一作者简介:** 郝飞帆, 1993 年出生, 硕士; 主要从事 MEMS 封装、MEMS 惯性传感器技术研究; Email: 18334788380@163.com.
- 通信作者简介:** 李孟委, 博士, 教授; Email: lmwprew@163.com.

(编辑: 李帅)