

文章编号 1004-924X(2016)04-0780-08

玻璃浆料键合中的孔洞抑制和微复合调控

刘益芳*, 王凌云, 孙道恒, 郑建毅
(厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005)

摘要:提出了包含三步式排泡过程的预烧结工艺以及双凹沟-凸台的微复合键合结构方案,以便有效控制玻璃浆料层中的孔洞生成并精确控制键合间隙。预烧结工艺涉及的三步式排泡包含玻璃液形成、真空排泡与孔洞流平 3 个过程,该过程有效地排除了气泡,从而抑制了键合中间层中的孔洞形成,其工艺的重复性和鲁棒性很强。微复合键合结构中的内外凹沟用于有效控制多余的熔融的玻璃浆料的流动路径,避免其对封装结构的污染;微阻挡凸台则可以精确地将玻璃浆料层的厚度即键合间隙控制到凸台高度。对键合性能的测试表明,该方案简单有效,键合强度和气密性良好,键合间隙为 $10.1\ \mu\text{m}$,键合强度为 $19.07\ \text{MPa}$,键合漏率小于 $5 \times 10^{-9}\ \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

关键词:玻璃浆料键合;孔洞抑制;微复合调控;键合间隙;微复合键合结构

中图分类号: TB756 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162404.0780

Void suppression and micro composite regulation in glass frit bonding

LIU Yi-fang*, WANG Ling-yun, SUN Dao-heng, ZHENG Jian-yi

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

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

Abstract: An innovated pre-sintering process including three-step bubble removing procedure and a micro composite bonding structure containing two micro grooves and one micro block bulge were investigated to effectively suppress the formation of voids in a glass frit layer and to precisely control the bonding gap. The three-step bubble removing procedure includes glass liquid forming, bubble removal in vacuum and void filling-up in air, which effectively removes the bubbles and suppress the generation of micro voids in the intermediate bonding layer. The innovated pre-sintering process shows good repeatability and robustness. The inside and outside micro grooves of the micro composite bonding structure were designed to effectively control the flowing path of the redundant molten glass frit to prevent the sealed micro structure from being polluted. And the micro block bulge was invented to make the thickness of the glass frit be precisely equal to the height of the bulge. The bonding performance testing result shows that the scheme is simple and feasible. Both bonding strength and hermeticity are good. The bonding gap is controlled to be $10.1\ \mu\text{m}$, the bonding strength is $19.07\ \text{MPa}$, and the leak rate is less than $5 \times 10^{-9}\ \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$.

收稿日期:2015-11-12;修订日期:2015-12-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61404111);航空科学基金资助项目(No. 20130868002);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 20720140517)

Key words: glass frit bonding; voids suppression; micro composite regulation; bonding gap; micro composite bonding structure

1 引言

玻璃浆料键合是以低熔点玻璃作为键合中间层的圆片级气密封装技术^[1,2]。与硅-硅直接键合、阳极键合气密封装技术相比,玻璃浆料键合技术具有如下优点^[3]:对键合面的表面粗糙度容忍度极高;适用于 MEMS 中使用的各种材料;具有绝缘性的键合中间层,简化了电极引出工艺;封装温度低(450℃),玻璃浆料键合工艺可以与 CMOS 工艺兼容。所以,玻璃浆料键合已经在 CMOS 集成的电容式和压电式 MEMS 器件的真空封装中得到了较好的应用^[4]。尽管玻璃浆料键合技术有着明显的优势,但将该技术应用于 MEMS 器件制造中必须考虑玻璃浆料键合性能及工艺可控性。工艺可控性是玻璃浆料键合技术成为 MEMS 标准工艺的前提。玻璃浆料键合技术从原理上决定其存在以下影响键合性能及工艺可控性的主要问题:孔洞的形成、键合间隙的不可控以及多余浆料的扩展。

孔洞给玻璃浆料封装的密闭微腔提供了气体泄漏的路径,且降低了键合强度^[5]。目前针对玻璃浆料键合界面以及键合层内部孔洞产生的研究,主要集中在热压键合工艺参数、盖帽层和基底的处理方式等对孔洞形成的实验方面。如文献^[6]当键合温度为 400℃时,玻璃浆料没有全部熔融,使得键合界面不平整,键合后玻璃浆料层内分布着尺寸较大的孔洞;但当键合温度提高到 500℃时,玻璃浆料环内部的气泡尺寸显著减小。在盖帽晶圆片的表面材料和钝化方式方面, Ser Chong Chong^[7]等人发现若键合前将盖帽层上的氧化层经过退火工艺,玻璃浆料环与盖帽层的界面基本无孔洞存在,据此认为键合界面中氧化层的放气导致了孔洞的产生。另外铅沉淀物在硅与玻璃浆料键合界面处的还原析出也会导致界面中孔洞的产生^[8]。但这些处理方式的稳定性和重复性有待提高。

在玻璃浆料键合间隙的精确控制研究方面的文献较少。Chien-Yu Chen 等人^[9]发现浆料高度受到丝网厚度、丝网窗口、浆料的固有属性以及键

合工艺参数的影响,而且不同的玻璃浆料需要不同的密封厚度才能获得最好的键合性能,但其研究并没有涉及到键合间隙的精确调控问题。玻璃浆料键合间隙无法精确控制,影响了每个键合密闭腔体空间的一致性和热压工艺的重复性^[10],限制了玻璃浆料键合技术的工程应用。目前还没有玻璃浆料键合技术在电容式压力传感器等对传感器敏感结构活动空间有精确要求的应用报道。

针对玻璃浆料键合时出现线宽不均匀且展宽严重的问题,文献^[11,12]提出了限制玻璃浆料展宽的微凹槽方案,首先在硅盖板上刻蚀出 10 μm 微凹槽,然后将玻璃浆料沉积在微凹槽内,通过凹槽限制玻璃浆料的流动和展宽。尽管对微凹槽的尺寸进行了优化设计,该方法仍然无法彻底限制玻璃浆料溢出凹槽的可能性,尤其是上层的玻璃浆料。

本文采用双凹函-凸台键合结构的微复合调控方案,并借鉴传统玻璃熔制过程的排泡工艺^[13,14]创新性地开发了包含三段式排泡工艺的预烧结过程。包括玻璃液形成、真空排泡与孔洞流平的三步式排泡预烧结工艺成功地抑制了孔洞的生成,并且工艺的鲁棒性很强。微复合调控结构中的内凹函和外凹函有效地限制了键合过程中玻璃浆料的过度扩展,微阻挡凸台用于精确控制键合间隙,极大地提高了玻璃浆料键合工艺的可控性,其对推进该技术在 MEMS 中的应用有重要意义。

2 键合结构的优化设计

玻璃浆料键合由于存在键合间隙无法精确控制、键合时玻璃浆料线宽不均匀以及展宽严重的多余玻璃浆料易污染传感器敏感结构等问题,使其键合质量及工艺的可复性受到了严重的影响。因此有必要设计并优化键合结构,精确控制玻璃浆料键合间隙,同时限制玻璃浆料的展宽以防止传感器敏感结构受污染。为此提出了凹函-凸台微复合结构的解决方案。

2.1 双凹函-凸台微复合键合结构的设计

双凹函凸台微复合结构如图 1 所示,在玻璃

浆料环两侧分别设计了外凹函与内凹函,微阻挡凸台设置在外凹函的外侧。微阻挡凸台的高度用以精确控制键合间隙。多余的具有流动性的熔融玻璃浆料在延展过程中易流入两侧的内外微凹函中,在结构上避免了多余的玻璃浆料流入可动结构的所在腔体。微阻挡凸台与玻璃浆料环之间通过外凹函隔开,避免了多余浆料扩张漫过微阻挡凸台的问题。密闭腔体与玻璃浆料之间通过内凹函隔开,避免了多余浆料对可动结构的污染。

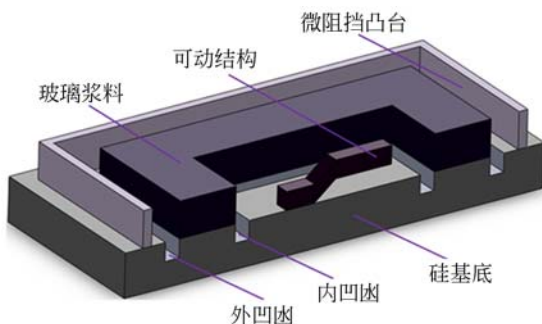


图 1 微复合键合结构

Fig. 1 Micro composite glass frit bonding structure

2.2 玻璃浆料密封环中热应力分析

封装过程中,加热使玻璃浆料软化浸润键合基片表面。在随后的降温阶段,玻璃浆料黏度增大,冷却至室温后,形成牢固的气密封接。在玻璃化转变温度附近,玻璃浆料从熔融态向固态转变。在玻璃化转变温度之上,玻璃浆料处于相对松弛状态降温时随着硅片一起收缩,产生的热应力接近于零。在玻璃化转变温度之下继续降温,因硅与玻璃浆料的热膨胀系数不一致导致的热失配产生封装热应力。可见,玻璃浆料键合封装热应力分析属于典型的两种不同热膨胀系数物体降温过程的热应力分析问题^[15]。

针对传统封装结构(单纯的玻璃浆料环)以及双凹函凸台封装,采用 Ansys 有限元进行热应力仿真,找出热应力分布的一般规律并优化微凹函的宽度和深度等关键尺寸。图 2 为传统结构玻璃浆料密封环中等效热应力分布图。总体上等效热应力分布均匀,最大等效热应力为 147.906 MPa,最小等效热应力为 105.766 MPa。在玻璃浆料密封环厚度方向上,等效热应力集中分布在键合界面位置,玻璃浆料密封环内部热应力小,即玻璃浆料密封环两侧应力大于玻璃浆料环中部应力。

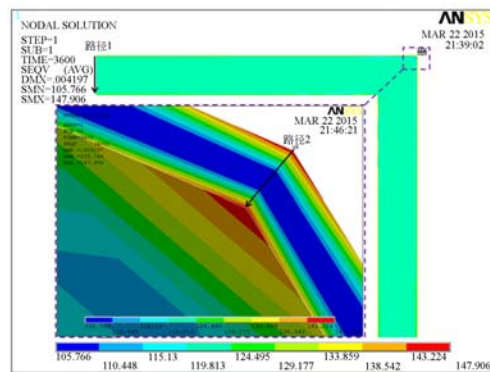


图 2 传统结构的玻璃浆料环中等效应力分布

Fig. 2 Equivalent stress distribution in glass frit ring of traditional structure

对于传统封装结构与双凹函凸台结构,玻璃浆料密封环中等效热应力在路径 1(键合界面沿玻璃浆料密封环横向)上的分布,如图 3 所示。由于结构的对称性,传统封装结构玻璃浆料密封环中热应力在路径 1 上对称分布。而双凹函凸台结构中,结构不对称导致等效热应力分布不对称,使其在路径 1 上最大等效热应力偏大,最小等效热

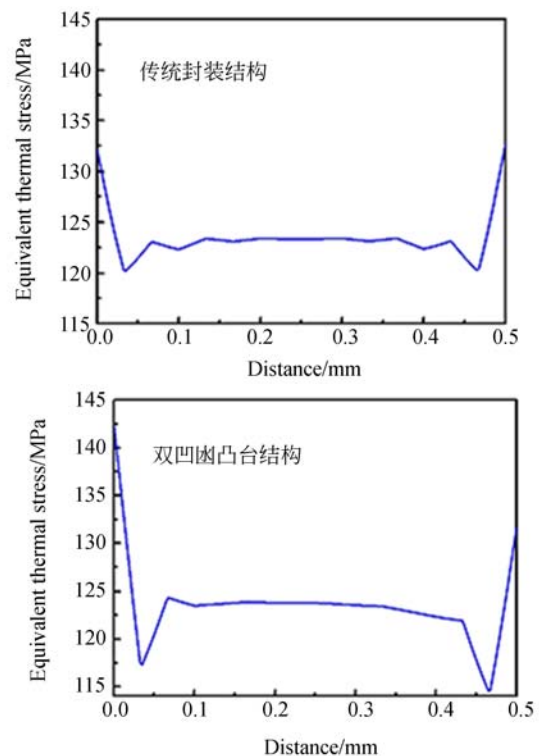


图 3 两种结构的玻璃浆料密封环中热应力在路径 1 上的分布

Fig. 3 Thermal stress distribution on the path 1 in glass frit ring of two different structure

应力偏小。传统封装结构与双凹函封装结构在路径1上最大等效热应力分别为132.72 MPa和142.62 MPa,最小等效热应力分别为120.23 MPa和114.57 MPa。由此可见,双凹函凸台微复合键合结构并没有使结构的热应力增大或过于集中。

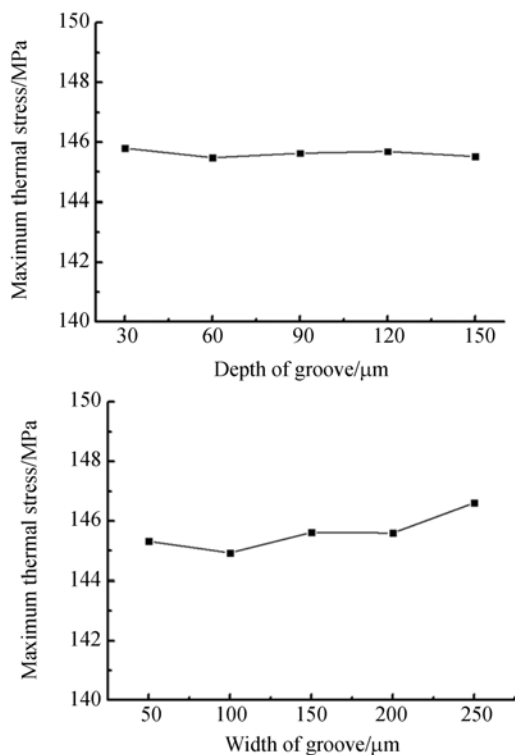


图4 微复合结构中最大热应力与凹函深度、宽度的关系

Fig. 4 Relationship between maximum thermal stress and the depth and width of groove in the micro-composite structure

在双凹函凸台结构中,如图4(a)所示,最大等效热应力几乎不受凹函深度的影响;如图4(b)所示最大等效热应力也基本不受凹函宽度的影响。

可见,内外凹函的引入不会引起封装热应力集中。凹函的作用在于包容扩展开的多余玻璃浆料。在实验成本方面,凹函越深成本越高。所以,从凹函的作用与实验成本两方面综合考虑,确定凹函的深度和宽度分别为30 μm 和150 μm 。根据实验要求将凸台高度设计为10 μm 。

2.3 微复合基底结构的制备

双凹函凸台微复合结构采用二次掩膜的工艺方案制备。二次掩膜的方案避免了带深槽或凸台的涂胶工艺,降低了工艺难度。凸台与凹函采用

湿法腐蚀工艺^[16]成形,腐蚀液为25% TMAH(四甲基氢氧化铵)溶液,掩膜为二氧化硅。其中一个样品的凸台和外凹函的局部结构的SEM图如图5所示,测得凸台高度和外凹函深度分别为9.9 μm 和30.9 μm 。

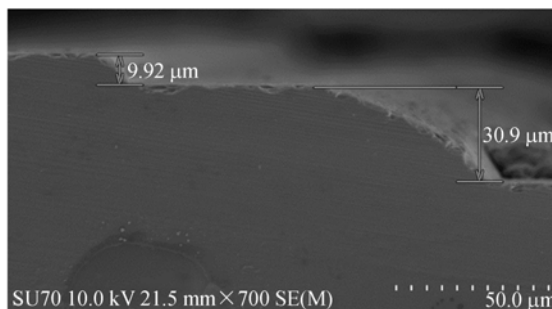


图5 外凹函凸台 SEM 图

Fig. 5 SEM image of micro outside groove and block bulge

3 键合实验及结果

3.1 丝网印刷工艺和预烧结

丝网印刷工艺实验中,在研究胶膜厚度分别为10 μm 、30 μm 、45 μm 和60 μm 的325目不锈钢丝网版对烧结后玻璃浆料厚度的影响关系;100 μm 、150 μm 、200 μm 、250 μm 与300 μm 的丝网线宽对印刷后玻璃浆料线宽的影响规律以及15 mm/s、30 mm/s、60 mm/s和90 mm/s的刮印速度对印刷后玻璃浆料形貌的影响之后,得到了优化的丝网印刷工艺:丝网线宽为300 μm ,胶膜厚度为60 μm ,丝网印刷速度为30 mm/s。印刷后玻璃浆料形貌如图6所示,可以看出所印刷的玻璃浆料边缘平整,厚度均匀,且刚好落入内凹函和外凹函之间。

对5643W玻璃浆料进行了热重(TG)热分析来研究玻璃浆料的烧结特性,以合理设计预烧温度曲线。测试温度为30~470 $^{\circ}\text{C}$,升温速率为10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。从图7的TG曲线可以看出,玻璃浆料的质量在350 $^{\circ}\text{C}$ 之后就基本趋于稳定,最终玻璃浆料残余质量为70.13%,这与供应商提供的69%的固体含量一致。图7中DTG的第一个峰在187.7 $^{\circ}\text{C}$,其值为-3.82%/min,是玻璃浆料中有机溶剂在187.7 $^{\circ}\text{C}$ 下分解(挥发)速率最大。DTG曲线的第二个峰在249.0 $^{\circ}\text{C}$,其值为-0.52%/min,是玻璃浆料中少量的有机黏结剂

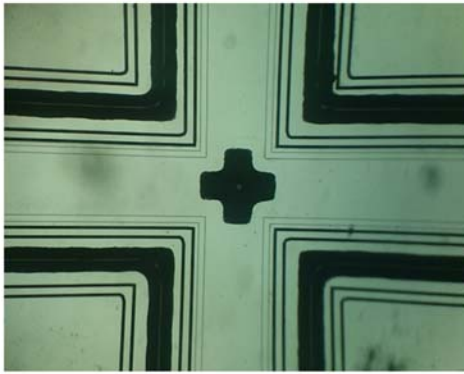


图 6 印刷后玻璃浆料形貌图

Fig. 6 Morphology of glass frit after screen printing

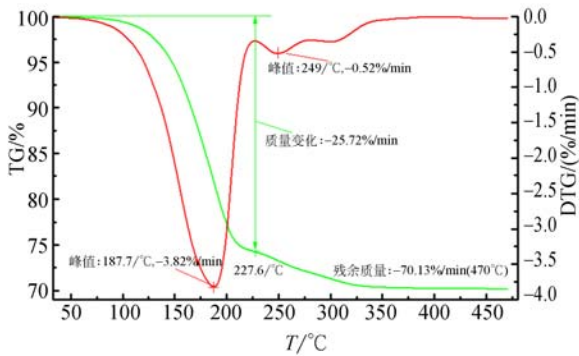


图 7 玻璃浆料热重分析图

Fig. 7 TG and DTG of glass frit

的分解峰值。根据热重分析图,在预烧结工艺中,升温曲线分别在 150 °C 和 300 °C 各保温 30 min,以有效去除有机溶剂和有机黏结剂。

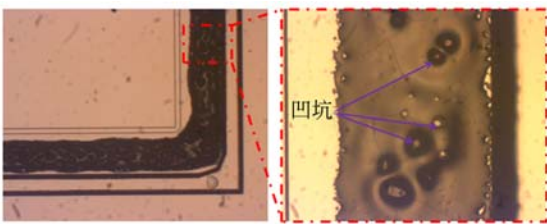


图 8 气泡导致的凹坑

Fig. 8 Pits caused by bubble

玻璃浆料预烧结工艺中,有机成分的去除伴随着气体的生成。在釉化阶段之前,玻璃液相还没开始形成,烧结过程中产生的气体可以通过松散的玻璃浆料层排除。在釉化过程,玻璃液相形成,气体的排除受到阻碍从而形成气泡,气泡的存在导致如图 8 所示的凹坑,则在键合之后玻璃浆料层中会产生如图 9 所示的孔洞。玻璃浆料预烧

结过程中气泡的这种形成方式与玻璃熔制过程中气泡的形成方式极为相似。因此借鉴传统玻璃熔制中澄清阶段的排泡工艺,将其移植到玻璃浆料预烧结工艺中用来排除气泡从而抑制孔洞的形成。

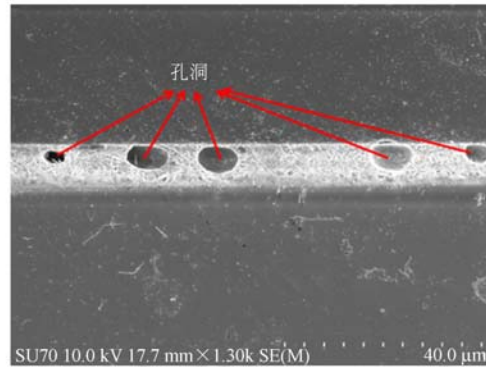


图 9 玻璃浆料层中的孔洞

Fig. 9 Voids in the glass frit

在考察了不同峰值温度(300~450 °C)对玻璃浆料烧结形貌的作用趋势之后,改变烧结气氛(大气和真空)以及相应的保温时间(60~90 min),摸索得到了包含三步式排泡工艺的玻璃浆料预烧结工艺流程。工艺分为两大部分:有机成份的去除与三步式排泡工艺。分别在 150 °C 与 300 °C 下保温 30 min 以去除有机溶剂与有机黏结剂;三步式排泡工艺包含玻璃液成形、真空排泡与孔洞流平 3 个阶段。相应的优化的三步式排泡工艺参数:450 °C 空气气氛下保温 30 min 形成玻璃液,450 °C 真空保温 30 min 排除玻璃液中气泡,500 °C 空气气氛下保温 60 min 填平玻璃液表面孔洞。得到了无孔洞的表面平整的玻璃浆料如图 10 所示。

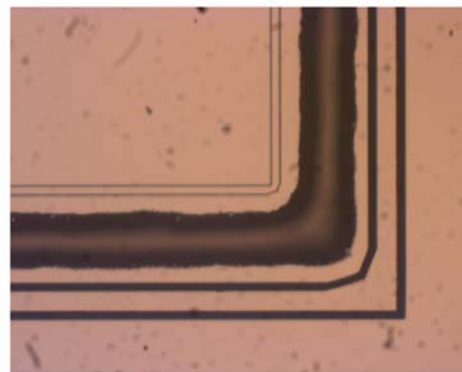


图 10 表面平整的无孔洞的玻璃浆料

Fig. 10 Voidless and smooth frit after pre-sintering

3.2 热压键合

热压键合工艺中键合基底为双凹凸台硅基底,前步实验中已通过丝网印刷工艺沉积了玻璃浆料密封环并采用预烧结工艺处理将玻璃浆料中的有机成份去除形成玻璃体。5 643 W 玻璃浆料产品说明提供的封接温度为 425~450 °C,保温时间为 30~60 min。因此设置键合温度为 450 °C,保温时间为 60 min。为保证键合中间层玻璃浆料压缩到凸台高度位置,设置了较大的键合压力(10 atm)。为防止降温过程玻璃浆料中裂纹生成,设置较低的降温速率(2.5 °C/min)。

3.2.1 凸台对键合间隙的控制

若没有结构对键合间隙进行控制,键合的间隙将随着键合前玻璃浆料厚度、键合温度与键合压力的变化而改变,很难保证热压键合工艺的重复性。双凹凸台硅基底结构中的微阻挡凸台在键合过程中限制了熔融玻璃浆料在压力作用下的进一步压缩,保证了玻璃浆料键合间隙不小于微阻挡凸台的高度。当键合压力不足时,无法将玻璃浆料压缩到凸台的高度位置。键合压力足够大时,键合的间隙由微阻挡凸台的高度控制。键合压力过大时,可能导致键合片或微结构破坏^[1]。

键合前玻璃浆料的厚度为 21 μm。键合断面 SEM 如图 11 所示,图 11(a)为断面整体图,键合中间层位置从左往右依次是凸台、凹沟与玻璃浆料。图 11(b)为凸台-凹沟-玻璃浆料局部放大图。测得凸台的高度为 10.1 μm,玻璃浆料的厚度为 10.1 μm,如图 11(c)、(d)所示。键合间隙由凸台的高度得到了精确的控制。

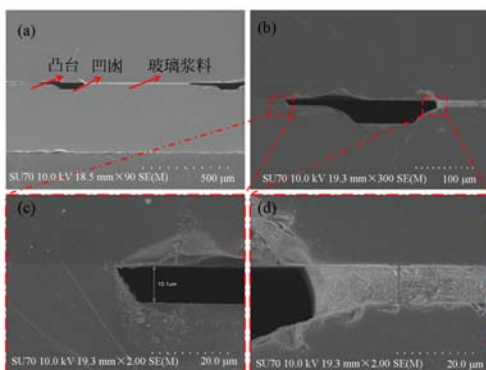


图 11 键合断面 SEM 图

Fig. 11 Cross-section SEM of glass frit bonding

3.2.2 键合压力对键合强度的影响

键合过程中,软化熔融的玻璃浆料在机械压

力作用下充分地浸润键合界面。键合压力过大将导致玻璃浆料被过度压缩,键合压力过小无法使玻璃浆料与键合片充分浸润覆盖键合片上的粗糙表面过度扩展。

由于所设计的凸台能够限制玻璃浆料被过度压缩,此外为了将键合间隙控制到与凸台的高度一致,所施加的键合压力较大,分别为 5 atm、10 atm 和 15 atm。每组工艺参数制备 3 个样品测试拉伸强度。

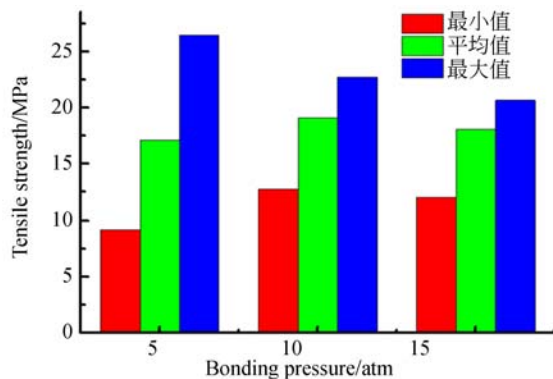


图 12 拉伸强度与键合压力之间的关系

Fig. 12 Relationship between tensile strength and bonding pressure

当键合压力分别为 5 atm、10 atm 和 15 atm 时,玻璃浆料键合拉伸强度分别为 17.11 MPa、19.07 MPa 和 18.09 MPa,如图 12 所示。键合压力在 5~15 atm 内,键合压力对玻璃浆料拉伸强度影响不大。

3.2.3 键合压力对漏率的影响

以键合压力为变量,设置键合压力分别为 5 atm、10 atm 和 15 atm。保证其他键合工艺参数不变:键合温度为 450 °C;保温时间为 60 min,预烧结采用 450~500 °C 三步式排泡工艺。

键合压力为 5 atm 时,3 个样品的漏率都大于标准值 5×10^{-8} atm cc/sec,均未能够通过测试;键合压力为 10 atm 时,有 2 个样品的漏率小于标准值 5×10^{-8} atm cc/sec,通过漏率测试;当键合压力为 15 atm 时,3 个样品均通过漏率测试。

漏率测试结果如图 13 所示,当键合压力为 5 atm 时,键合中间层由微小缺陷引起的泄漏通道导致封装腔体漏率较大。当键合压力提升至 10 atm 和 15 atm 时,在一定程度上减少了键合中间层中微小缺陷,从而降低封装腔体漏率。相较于 5 atm 的键合压力,提高键合压力至 10 atm 和 15

atm,从降低漏率的角度对键合是有利的。

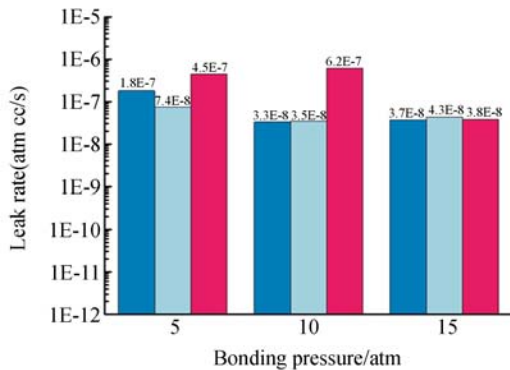


图 13 键合压力对漏率的影响

Fig. 13 Leak rate affected by bonding pressure

参考文献:

- [1] KNECHTEL R. Glass frit bonding: An universal technology for wafer level encapsulation and packaging [J]. *Microsystem Technologies*, 2005, 12:63-68.
- [2] 杜利东,赵湛,方震,等.用电镀铜锡合金薄膜实现圆片级气密封装[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(11): 3044-3049.
DU LI D, ZHAO ZH, FANG ZH, *et al.*. Wafer level hermetic packaging based[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 3044-3049. (in Chinese)
- [3] DOUGLAS S, SONBOL M, NADER N. Reliable vacuum packaging using nanogetters TM and glass frit bonding[J]. *Proc. SPIE*, 2004, 5343:70-78.
- [4] EDDY D, SPARKS D. Application of MEMS technology in automotive sensors and actuators [J]. *Proc. IEEE*, 1998, 86(8): 1747.
- [5] WU G, XU D, SUN X, *et al.*. Wafer-level vacuum packaging for microsystems using glass frit bonding [J]. *Components, Packaging and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on*, 2013, 3: 1640-1646.
- [6] 徐薇,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 MEM S by glass solder at low temperature[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2005, 11(3): 343-346. (in Chinese)
- [7] CHONG S C, ZHANG X, MOHANRAJ S, *et al.*. Effect of passivation on frit glass bonding method for wafer level hermetic sealing on MEMS devices [C]. *Electronics Packaging Technology, 2003 5th Conference (EPTC 2003)*: 307-310.
- [8] CHEN X, YAN P L, TANG J J, *et al.*. Application of WLP with barrier trench structure in precision screen printing technology by glass frit [C]. *2010 11th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP)*, 2010:71-73.
- [9] CHEN C Y, HUNG C H, JHONG J Y, *et al.*. Demonstration of wafer capping through glass frit bonding and its application on molded platform package [C]. *Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology*, 2007:177-180.
- [10] MASAYOSHI E. Wafer level packaging of MEMS [J]. *J. Micromech. Microen.*, 2008, 18 :1-13.
- [11] 孙芬芬.微机电系统晶圆级玻璃焊料密封的工艺研究及热应力分析[D].南京:南京理工大学, 2010:55-60.
SUN F F. *The investigation of process and analysis of thermal stress in wafer-level hermetic package of MEMS by glass frit*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010:55-60. (in Chinese)
- [12] CHEN X, YAN P L, TANG J J, *et al.*. Development of wafer level glass frit bonding by using barrier trench technology and precision screen printing [J]. *Microelectronic Engineering*, 2012, 100: 6-11.
- [13] 赵彦钊,殷海荣.玻璃工艺学[M].北京:化学工业出版社, 2006:236-246.
ZHAO Y ZH, YIN H R. *Glass Technology*[M].

4 结 论

本文设计了微复合键合结构和研究了三步法排泡预烧结工艺。通过微复合键合结构的内外微凹限制了多余玻璃浆料的过度扩展和通过微阻挡凸台精确控制了在不同键合压力下的键合间隙,键合间隙为 $10.1 \mu\text{m}$ 。三步法排泡预烧结工艺有效地排除了气泡从而控制了键合层中孔洞的生成。同时也考察了键合压力对键合强度和键合间隙的影响,由于凸台的限制,键合压力对键合强度影响不大,但较大的键合压力可以降低键合漏率。

- Beijing:Chemical Industry Press, 2006:236-246.
- [14] RUUD G, Beerkens C, JOHN S. Gas release and foam formation during melting and fining of glass [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2006,89(1): 24-35.
- [15] MATTHIAS E, JORG B. Determination of residual stress in glass frit bonded MEMS by Finite Element Analysis [C]. *5th. Int. Conf on Thermal and Mechanical Simulation and Experiments in Micro-electronics and Micro-Systems*, 2004, 407-412.
- [16] 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):1-6. (in Chinese)

作者简介:



刘益芳(1976—),女,福建莆田人,助理教授,1999年、2002年于东南大学分别获得学士、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



王凌云(1978—),男,四川达州人,副教授,2000年、2009年于厦门大学分别获得学士、博士学位,主要从事 MEMS 和惯性传感器的设计、制作和控制的研究。E-mail:wangly@xmu.edu.cn