

Pyrex 玻璃/ 铝多层阳极键合界面结构与力学分析*

鲁晓莹¹, 刘翠荣¹, 孟庆森¹, 杨振宇², 赵亚溥²

(1. 太原理工大学 材料与科学学院, 山西 太原 030024;

2. 中科院力学所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100086)

摘要: 采用公共阳极法实现了 Pyrex 玻璃与铝多层晶片的静电键合, 对玻璃/ 铝/ 玻璃阳极接合界面的组织结构及其连接机理和力学特征进行了重点研究。分别利用微拉伸测试设备和 ANSYS 软件分析了连接区的力学性能和残余应力分布特征。分析认为键合区由玻璃-过渡层-铝组成, 过渡层为 Al_2O_3 - SiO_2 复合氧化物。玻璃/ 铝界面的微观组织和元素分布均以铝为对称轴呈对称分布。在玻璃/ 铝/ 玻璃多层连接区, 键合界面附近的残余应力和应变呈对称分布, 多层结构的对称性有利于缓解接头应变和应力, 表明应用公共阳极法可实现多层玻璃/ 铝/ 玻璃的良好键合。

关键词: 阳极键合; 铝; Pyrex 玻璃; 力学特征; MEMS

中图分类号: TG453.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-9731(2008)09-1466-04

1 引言

作为 MEMS 器件重要的键合方法之一, 阳极键合广泛应用于机械电子系统微机械和微仪表的封装。为了满足更为复杂的电路和微电子设备的封装要求, 大量多层玻璃/ 金属和玻璃/ 硅的组合结构应用于实际产品中, 例如 Despont^[1] 通过两次改变键合电流实现了硅/ 玻璃/ 硅的多层阳极键合, 该方法用于带有极小电子束显微镜中硅/ 玻璃的阳极键合。Nimkar^[2] 设计了增强表面热沉积技术, 来证明热传输数据的真实可靠性并通过 4 次阳极键合过程实现硅/ 玻璃/ 铝/ 玻璃/ 硅的多层连接。Huff 和 Epstein^[3,4] 采用阳极键合实现了由 4 层晶片组成的电阀门的封装。

以往的玻璃/ 金属系统的多层阳极键合中, 通常是通过基片上多次溅射或物理沉积技术实现铝与硅的连接。这一工艺过程复杂, 设备昂贵, 成本较高。本文采用公共阳极法实现了玻璃与铝的 3 层和 5 层阳极键合, 键合过程简单快速, 成本低, 且键合质量较高^[5]。同时对玻璃/ 铝/ 玻璃阳极接合界面的组织结构及其连接机理和力学特征进行了分析。

2 实验材料和实验方法

实验选用的玻璃为固态电解质玻璃 Pyrex 7740

(Coning 公司), 它是一种快离子导体, 化学成分为 Na_2O 4.0%、 Al_2O_3 2.3%、 B_2O_3 12.7%、 SiO_2 80.9%。玻璃表面的粗糙度 $R_a < 0.1\mu\text{m}$, 热膨胀系数为 $3.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。铝膜纯度 99.997% (Alfa Aesar 公司), 厚度为 0.02mm, 热膨胀系数为 $25.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。本实验中, 玻璃和铝箔分别切成 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 0.4\text{mm}$ 和 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 0.02\text{mm}$ 的尺寸。实验装置如图 1 所示。

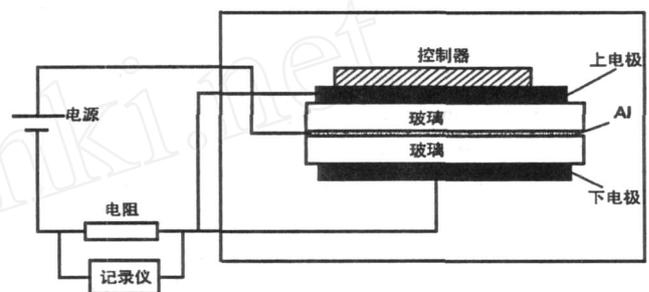


图 1 3 层阳极键合装置图

Fig 1 Schematic of anodic bonding of three layers

将铝箔与玻璃叠合放置在键合炉中, 两侧玻璃接阴极, 铝箔为公共阳极(图 1)。温度 $350 \sim 450^\circ\text{C}$, 加 $400 \sim 800\text{V}$ 直流电压, 保持 $10 \sim 15\text{min}$, 电流变化通过 Digital load cell 电流记录装置(Mettler 公司)记录, 最后以 $1^\circ\text{C}/\text{s}$ 的冷却速度将试件随炉冷却。

3 结合界面结构及键合机理分析

玻璃/ 铝 3 层和 5 层键合结构 SEM 显微结构见图 2(a)、(b) 可以看到, 玻璃/ 铝界面致密、无孔洞和缝隙, 键合良好。图 2(c) 是玻璃/ 铝 3 层键合的高倍 SEM 图和 EDS 分析图, 可以看到 Na、Si、O、Al 各元素在铝两侧呈对称分布, 在玻璃/ 铝界面处各元素成梯度分布, 过渡层的宽度约为 $5\mu\text{m}$ 。过渡区 X 射线衍射图(XRD) 如图 3 所示, 相分析表明过渡区主要为 Al_2SiO_5 复合氧化物。其中, TA 为过渡区, G 为玻璃(7 层以上的对称结构以此类推)。

阳极键合过程中, 在电场的作用下玻璃中的 Na_2O 被分解为 Na^+ 和 O^{2-} , Na^+ 受电场力作用向阴极移动(如图 4), 最终在阴极表面析出钠盐, 钠盐的析出量与电流的大小相对应。钠离子的迁移和析出使玻璃/ 铝的界面处玻璃一侧产生钠离子耗尽区, 这也为铝原子

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375015, 50671070)

收到初稿日期: 2008-03-07

收到修改稿日期: 2008-05-26

通讯作者: 孟庆森

作者简介: 鲁晓莹 (1981-), 女(蒙族), 辽宁朝阳人, 在读硕士, 师承孟庆森教授, 从事异质材料连接及界面物理性能的研究。

向玻璃中扩散提供了空位。同时, O^{2-} 在电场力作用下向铝界面迁移和积累,使结合区形成强静电场吸引

力,促进了碱金属离子耗尽层中的 O^{2-} 和铝发生氧化反应形成永久键合^[6~11]。

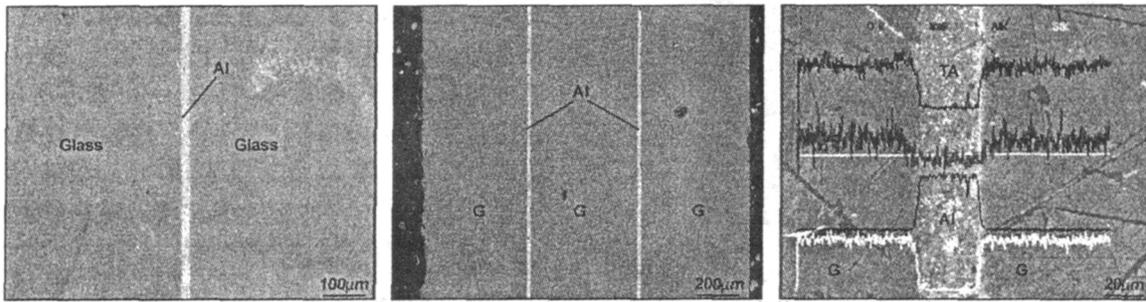


图2 600V, 450℃, 15min条件下3和5层玻璃/铝的微观界面结构和3层玻璃/铝/玻璃元素分布
Fig 2 Microstructure results of the interface of 3 and 5 layers, EDS results of the interface of 3 layers sample at 600V, 450℃, 15min

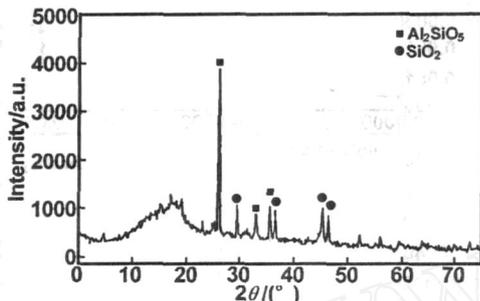


图3 Pyrex玻璃/Al界面XRD谱线
Fig 3 The XRD spectrum of the interface of Pyrex glass/Al

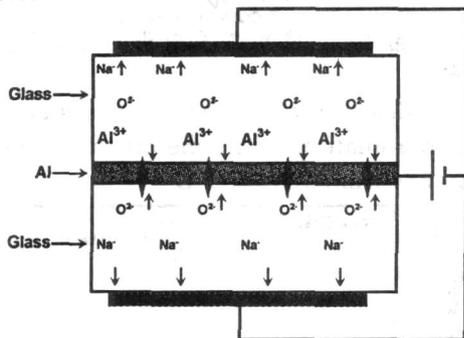


图4 玻璃/铝/玻璃3层结构阳极键合原理
Fig 4 Mechanisms of anodic bonding of glass/Al/glass

玻璃/铝/玻璃3层键合和玻璃/铝单层键合的电流-时间曲线如图5所示。

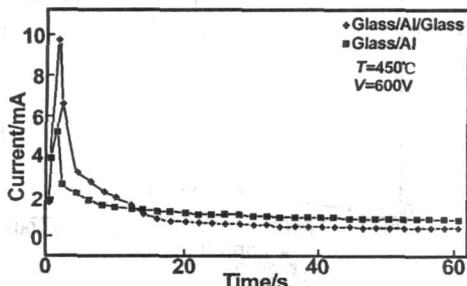


图5 玻璃/铝/玻璃3层键合和玻璃/铝双层键合的电流曲线
Fig 5 The bonding current of glass/Al/glass and glass/Al at 450℃, 600V

电压施加到试样上以后电流迅速增大,然后锐减,最后稳定在一个较小的值上,这说明耗尽层及键合形

成是在瞬间完成的。玻璃/铝/玻璃的多层连接试验可以看作是多个单层玻璃/铝连接的并联,因此玻璃/铝/玻璃3层键合的电流峰值约为玻璃/铝单层键合的两倍。

4 键合试样的力学特性分析

4.1 静载剪切力学试验

采用 Instron5544 万能材料试验机对连接试样进行静载剪切强度测试,测试结果见图6。可以看出抗剪强度随键合温度和电压的升高而增大。因为适当的高温和高电压可以增加结合界面的离子流的质量传输和提高静电场力和接触面积,从而提高键合质量^[12,13]。拉伸力与拉伸位移的线性关系,表明断裂过程为脆性断裂(图7)。裂纹产生于玻璃边缘,且沿玻璃基体扩展(图8)。

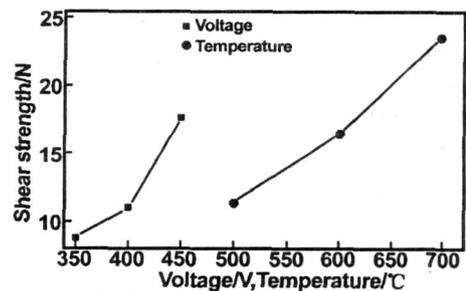


图6 试样在不同温度和压力的抗剪强度
Fig 6 The shear strength of the samples in the different voltage and temperature

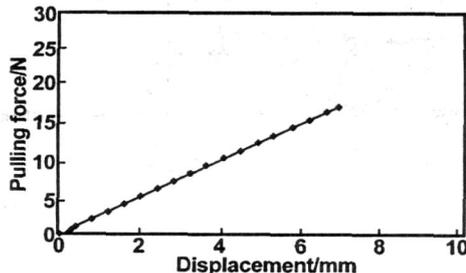


图7 500V, 400℃, 15min条件下键合试样载荷与位移的关系
Fig 7 The relationship between the tensile forces and the displacements of glass/Al/glass bonded samples reacted with 500V at 400℃ for 15min

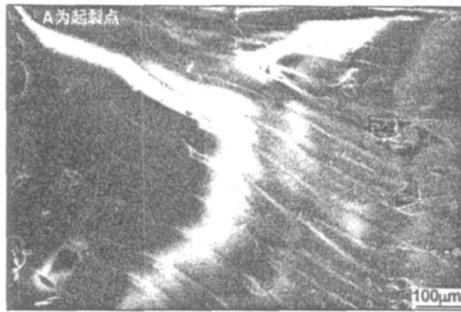


图 8 玻璃/铝/玻璃的断口形貌

Fig 8 The SEM morphology of the crack in glass/ Al/ glass bonded samples reacted with 500V at 400 for 15min

4.2 界面残余应力分析

采用有限元法并利用 ANSYS 10.0 软件对键合试样的残余应力进行模拟^[14],对玻璃/铝单层键合试样与玻璃/铝/玻璃键合 3 层键合试样的模拟结果进行了对比分析(5 层与更多层分析与此雷同)。用于模拟的试样尺寸及相关的材料物理参数如表 1 所示。将试样下底面的中心作为坐标原点,为了简化计算,选取样品的 1/4 进行模拟(图 9)。选择键合试样的两边交界棱(AB 棱),获得该侧。应力最大值为 1.02 GPa,同样低于玻璃/铝键合样品。

表 1 用于模拟的试样尺寸及材料基本参数

Table 1 Sizes and parameters of the samples for simulation

材 料	Al	Al ₂ SiO ₅	玻璃
长 ×宽 ×高(mm ³)	2.0 ×2.0 ×0.02	2.0 ×2.0 ×0.005	2.0 ×2.0 ×0.4
弹性模量 (GPa)	68	370	62.75
泊松比	0.34	0.22	0.20
比热(J/g ·)	0.9	0.85	0.2
密度(kg/ m ³)	2700	4000	2230
热膨胀系数(· ⁻¹)	2.56 ×10 ⁻⁵	6.5 ×10 ⁻⁶	3.0 ×10 ⁻⁶
热传导率 (W/(m · K))	210	30	1.005

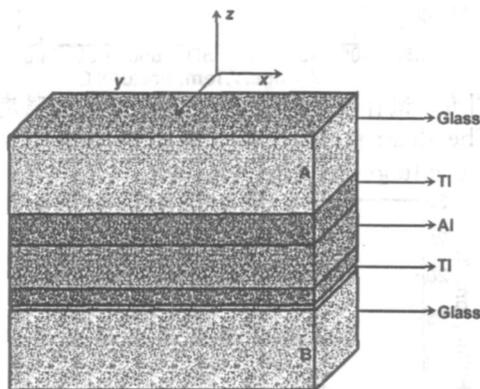


图 9 用于模拟的 1/4 样品示意图(TI 为过渡层)

Fig 9 Schematic of 1/4 samples used for simulation .

TI is Transitional layer

处玻璃/铝及玻璃/铝/玻璃等效应力和等效应变图,如图 10 和 11 所示。图 10(a)为单层玻璃/铝键合试样等效应变分布,最大等效应变产生于交界棱铝靠

近过渡区的界面处,数值为 0.00825。由于铝/过渡层界面的失配度大于过渡层/玻璃界面,所以键合后样品向铝一侧弯曲。多层试样的对称结构和等效应变呈对称分布,与玻璃/铝单层键合试样相比,玻璃/铝/玻璃键合样品的最大等效应变在同一位置有所缓解,最大应变值为 0.00679(图 10(b))。对称结构是应变缓解的重要因素。图 11 描述了玻璃/铝和玻璃/铝/玻璃的等效应力分布。最大应力发生于过渡层靠近铝处。

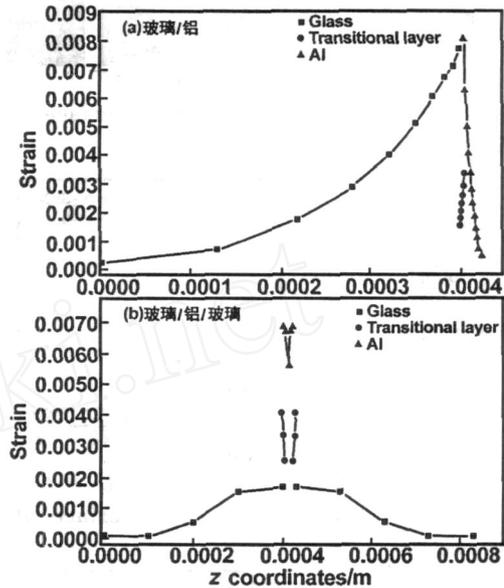


图 10 温度由 400℃ 降到 25℃ 时沿 z 向残余应变的分布

Fig 10 The distribution of the von mises strain along z coordinate at 25℃ when the temperature descends from 400 to 25℃

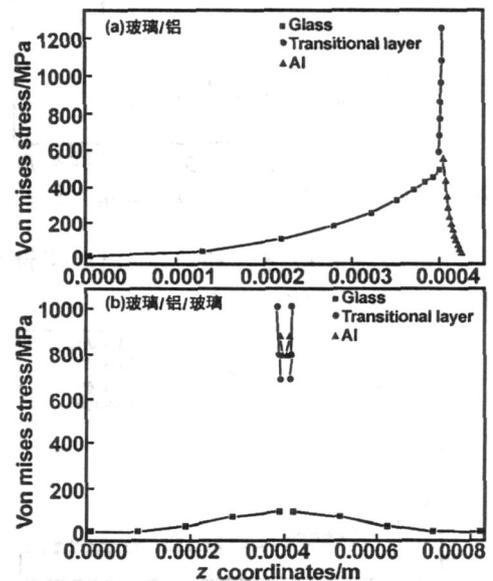


图 11 温度由 400℃ 降到 25℃ 时沿 z 向残余应力的分布

Fig 11 The distribution of the von mises stress along z coordinate at 25℃ when the temperature descends from 400 to 25℃

图 12 为等效残余应变(a)和等效残余应力(b)与

键合温度的关系曲线。在每一温度区间,对称结构的多层接头等应力和等应变均低于玻璃/铝单层结构。

由以上分析可知,多层对称结构可以缓解最大残余应力,提高晶片的键合质量。这一特性为 MEMS 器件的封装过程中缓解应力,提高可靠性和延长器件使用寿命提供了有益参考。

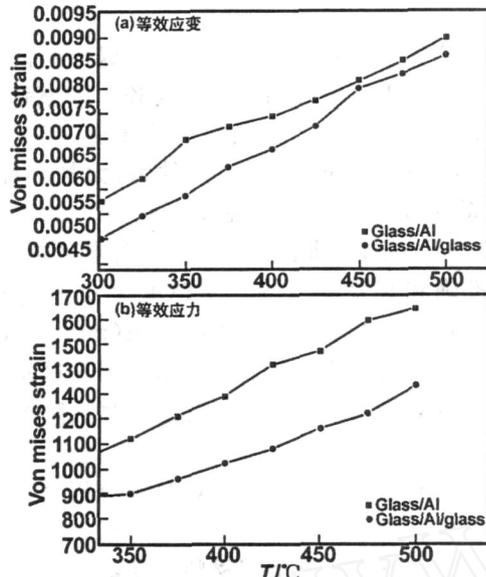


图 12 等效应变及等效应力与键合温度的关系

Fig 12 The relationship between the von mises strain and von mises stress vs the bonding temperature

5 结论

(1) 采用公共阳极法可以实现 Pyrex 玻璃与铝多层晶片的良好键合。键合温度 350 ~ 450 °C, 键合电压为 400 ~ 800V。键合区由玻璃-过渡层-铝结构组成,过渡层为 Al_2SiO_3 复合氧化物。在适当范围内键合强度随温度或电压而增强。

The interface microstructure and mechanical property of the multi-layer wafer of pyrex glass and Al by the common anode bonding process

LU Xiao-ying¹, LIU Cui-rong¹, MENG Qing-sen¹, YANG Zhen-yu², ZHAO Ya-pu²

(1. Materials Science & Engineering Department, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics (LNM), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The bonding of multi-layer of glass and aluminum stack was achieved by the common anode bonding process. The bonding mechanism and mechanical property of the glass/aluminum/glass joints were investigated in the paper. The mechanical property and the residual stress of the glass/aluminum/glass bonded wafers were analyzed by means of the micro-tension test and the software of ANSYS. It is founded that the bonding area is consisted of the glass-transition layer-aluminum, and the transition layer is the combined metal oxide of the Al_2O_3 - SiO_2 . The microstructure and distribution of the elements are symmetrical in both sides of the aluminum interfaces. The residual stress and strain near the bonded interface are symmetrical in the bonding area of the multi-layer glass/aluminum/glass. The symmetry property of the multi-layer structure is beneficial to mechanical property of the joints. It indicates that the multi-layer glass/aluminum/glass wafers can be bonded firm due to the application of a common anode process.

Key words: anodic bonding; aluminum; pyrex glass; mechanical property

(2) 剪切试验断裂发生在玻璃侧表明玻璃/铝的结合界面可实现良好键合。有限元分析表明,3层结构在界面靠近铝侧的最大应力明显低于两层结构。多层结构的对称性有利于缓解接头应变和提高键合质量。

致谢:感谢中科院力学所非线性力学国家重点实验室及美国加州大学 MUNIR 实验室专家的热情支持!

参考文献:

- [1] Despont M, Gross H, Arrouy F. [J]. Sens Actuators A, 1996, 55: 219-224.
- [2] Nitesh D N, Sushil H B, Charles D E. [J]. Sens Actuators A, 2004, 113: 212-217.
- [3] Huff M A, Schmidt M A. [J]. IEEE, 1992, 194: 197.
- [4] Epstein A H, Senturia S D, Anathasuresh G. Power MEMS and Microengines[C]. Chicago: Proc of the IEEE Transducers '97 Conference, 1997. 753-756.
- [5] Liu C R, Hu L F, Meng Q S, et al. The Mechanism and Process of Anodic Bonding for Glass and Aluminium[C]. Sanya: Proceedings of MNC, 2007, 2007.
- [6] Xing Q F, Sasaki G, Fukunaga H. [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2002, 13: 83-88.
- [7] van Helvoort A T J, Knowles K M, Fernie J A. [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2002, 86: 1773-1776.
- [8] 孟庆森, 陈少平, 薛锦. [J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(4): 447-450.
- [9] 秦会峰, 孟庆森, 宋永刚, 等. [J]. 功能材料, 2006, 37(9): 1369-1371.
- [10] Meng Q S, Xue J. [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 16(1): 72-74.
- [11] Carlson D E. [J]. J Am Ceram Soc, 1974, 57: 291-294.
- [12] Knowles K M, van Helvoort A T J. [J]. Int Mater Rev, 2006, 51: 275-311.
- [13] Wang C Z. Properties of Materials[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2001. 33.
- [14] Yang Z Y, Zhao Y P. [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2007, 31: 402-409.