

# 应用 BCB 材料进行硅-玻璃气密性封装的实验与理论研究

刘玉菲<sup>1,2,†</sup> 刘文平<sup>1,2</sup> 李四华<sup>1</sup> 吴亚明<sup>1</sup> 罗 乐<sup>1</sup>

(1 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, 微系统技术国家重点实验室, 上海 200050)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 应用苯并环丁烯(BCB)材料对硅片和玻璃片进行了 250℃ 下的圆片级低温键合实验,同时进行了 300℃ 下的硅片与玻璃片阳极键合实验,并对其气密性和剪切力特性进行了对比研究.测试结果表明:在 250℃ 的低温键合条件下,经过 500kPa He 气保压 2h,BCB 封装后样品的气密性达到  $(5.5 \pm 0.5) \times 10^{-4}$  Pa cc/s He;剪切力在 9.0~13.4MPa 之间,达到了封装工艺要求;封装成品率达到 100%.这表明应用 BCB 材料键合是一种有效的圆片级低温气密性封装方法.还根据渗流模型理论,讨论了简易模型下气密性(即渗流率)和器件腔体边缘到划片边缘的间距的关系.

**关键词:** 低温键合; 气密性封装; 苯并环丁烯; 渗流模型

**PACC:** 4283; 0730; 3520G

**中图分类号:** TH706; TB743

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2006)S0-0407-04

## 1 引言

苯并环丁烯(benzo-cyclo-butene,简称 BCB)是一种目前较常用的圆片级有机粘贴材料,通常用于集成电路的重布线,最近开始用于 MEMS 器件中的粘接工艺(与 IC 工艺相兼容)<sup>[1~3]</sup>.BCB 具有低的介电常数,出色的热学、化学和力学稳定性,用于圆片级粘结时,优点如下:高度的平整化能力;固化温度较低,固化过程中不需催化剂、没有副产品,固化过程中收缩率可以忽略;良好的粘结性能;BCB 还可以进行光刻或刻蚀,以及选择性粘贴;固化的 BCB 对可见光透明,可用于光学器件;固化的 BCB 能抵抗多种酸、碱和溶剂的侵蚀,适合流体方面的应用;吸水率很低,对气密封装有利;介电常数比较低,对 RF-MEMS 等圆片级封装有利;封装过程中不影响器件及电路的引线.

同时,由于部分 MEMS 器件易损伤的特殊结构,及长时间的接触工作环境中的灰尘、气流、水汽、机械杂质等物质的影响,使得器件的气密性封装变得越来越重要.一些特殊用途的 MEMS 器件(如谐振梁式 MEMS 器件、微加速度计、微热辐射仪、芯片级原子钟的气体盒等),由于其物理工作原理、稳定运行和低漂移的要求,对气密性封装要求严格<sup>[4,5]</sup>.随着半导体技术的系统化、集成化的发展,在工艺制

作过程中对于键合的温度也提出了更低的要求.圆片级的封装具有更高的生产制造效益,成品率高,可以更好地降低生产成本.所以圆片级低温气密性封装技术一直是 MEMS 领域研究和探索的重要技术之一<sup>[6]</sup>.

本文根据 BCB 材料的特性,设计进行了硅-玻璃圆片级低温气密性键合封装的实验,并进行了低温条件下硅-玻璃阳极键合气密性封装的对比实验.对键合后样品的气密性和剪切力进行了测试,并对测试结果进行了讨论分析.

## 2 实验

实验采用普通 n 型(100)双抛硅片,厚度为  $420 \pm 15 \mu\text{m}$ ,电阻率  $3 \sim 8 \Omega \cdot \text{cm}$ ,具体制作工艺如图 1 所示.实际使用非光敏型 BCB 预聚体胶水(牌号 3022-46),其 BCB 聚合度为 40%~50%(B-Stage),溶剂(1,3,5-三甲基苯)的存在使其呈液体状态.涂胶工艺如下<sup>[3,7~9]</sup>:(1)在玻璃片键合面旋涂增粘剂 AP3000,可使圆片粘结强度提高近一倍.实验中选用开盖 800r/min 旋涂 20s,闭盖 2500r/min 旋涂 20s;(2)在增粘剂上旋涂 BCB 胶.参数为:1000~5000r/min 旋涂 20~30s,不同转速对应的胶层厚度(固化后)不同.实验中选择开盖 800r/min 旋涂 20s,闭盖 1500r/min 旋涂 20s,胶层厚度大约为 4~

† 通信作者. Email: yufeiliu@mail.sim.ac.cn

2005-10-11 收到,2006-01-16 定稿

5 $\mu\text{m}$ ; (3) 去除硅片边缘的 BCB 胶, 避免污染键合机; (4) 热盘烘干: 目的是使有机溶剂挥发掉, 以获得没有孔洞的 BCB 胶粘结层。

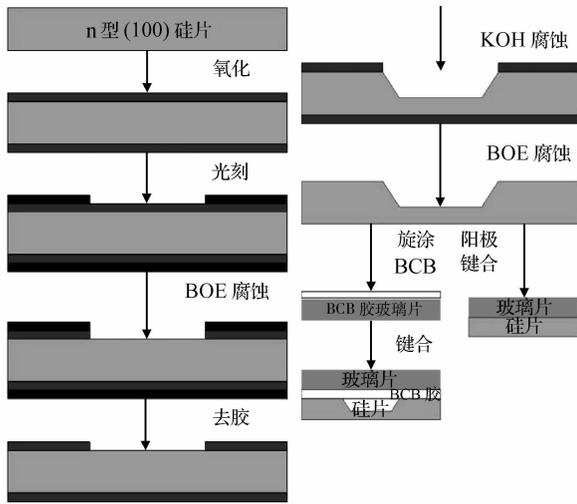


图 1 应用 BCB 材料键合和阳极键合的工艺流程图

Fig. 1 Flow of the BCB and the anodic bonding process

键合过程在 Karl Suss SB6 型键合机中进行, 键合过程中的主要参数有: 键合温度及升温曲线; 键合加载压力; 真空度. BCB 的固化温度在 200~300 $^{\circ}\text{C}$  之间, 标准工艺为 250 $^{\circ}\text{C}$  保温 1h. 温度低于 250 $^{\circ}\text{C}$  时, 需要保温几个小时; 而温度高于 250 $^{\circ}\text{C}$  时, 则迅速固化, 标准升温曲线如图 2 所示. 实验中选择的工艺参数: (1) 100 $^{\circ}\text{C}$  保温 10min, 150 $^{\circ}\text{C}$  保温 10min, 200 $^{\circ}\text{C}$  保温 10min, 250 $^{\circ}\text{C}$  保温 1h, 自然冷却; (2) 对硅片施加  $3 \times 10^5 \text{ Pa}$  的键合加载压力; (3) 真空条件 (0.1Pa). 阳极键合样品按图 1 所示流程操作, 键合温度为 300 $^{\circ}\text{C}$ .

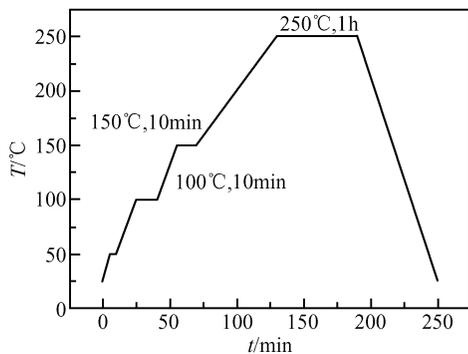


图 2 BCB 固化标准升温曲线

Fig. 2 Typical thermal reflow profile of BCB solidifying

封装质量的好坏通过检测划片后各单元器件的气密性及剪切强度来评定. 气密性检测通过标准氦气精检和氟油粗检两步进行: 氦气精检使用 Varian

947 氦检漏仪, 其检漏精度为  $0.2 \times 10^{-9} \text{ atm cc/s}$ . 氟油粗检在 KYKY F-3 型氟油加压检漏仪中进行. 样品放入轻氟油 (沸点 45 $^{\circ}\text{C}$ ) 中, 在常温下氮气加压, 保压后取出放入 125 $^{\circ}\text{C}$  的重氟油 (沸点 165 $^{\circ}\text{C}$ ) 中观察是否有连续气泡产生<sup>[10,11]</sup>. 剪切试验在 Dage Series 4000 键合强度测试机上进行.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 旋转涂胶工艺

键合过程中, 除了温度、加载的压力、真空度等指标参数外, 键合圆片的表面形貌、粘结剂及 BCB 胶的厚度也会影响参数的选择和键合质量. 随着涂胶时转速不同, 胶层的厚度也不同, 其变化关系如图 3 所示. 由于键合时所加的压力为  $3 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 同时为了保证键合表面不出现断胶、气孔等现象, 所以选择开盖 800r/min 旋涂 20s、闭盖 1500r/min 旋涂 20s 的涂胶条件, 此时得到的胶层厚度大约为 4~5 $\mu\text{m}$ <sup>[3]</sup>, 键合表面 BCB 材料有很好的平整度.

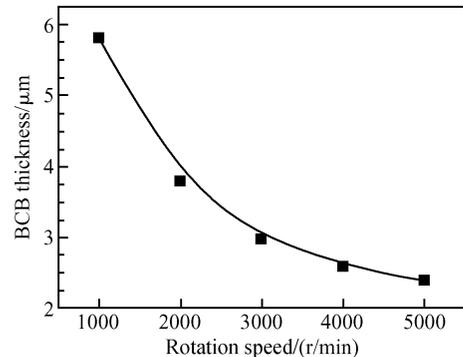


图 3 涂胶机转速对应的 BCB 胶厚 (已固化)

Fig. 3 Relationship between the rotational speed of spin coating and BCB thickness

#### 3.2 气密性检测与剪切力测试

氦气精检有三种方式, 分别为固定参数法、可变参数法和非密封封装法, 本实验中采用固定参数法. 所谓固定参数法, 即“固定”标准, 其所有测试参数均须符合规定的数值, 以保证测试的灵敏度. 腔体边长为 500~2000 $\mu\text{m}$ , 深度为 227 $\mu\text{m}$ , 根据 MIL-STD-833E 及 GJB 548A-96 标准: 在 500kPa 的压强、最小保压时间 2h、最大滞留时间 1h 的条件下, 其漏率极限为  $5 \times 10^{-3} \text{ Pa cc/s He}$ <sup>[10,11]</sup>. 测试得到的氦气精检结果如图 4 所示, 可见器件的气密性均比标准要求的漏率极限好一个数量级以上. 同时经过氟油粗检, 测得成品率达到 100%.

剪切试验在 Dage Series 4000 键合强度测试机上进行, 测得 BCB 封装样品的剪切力在 9.0~

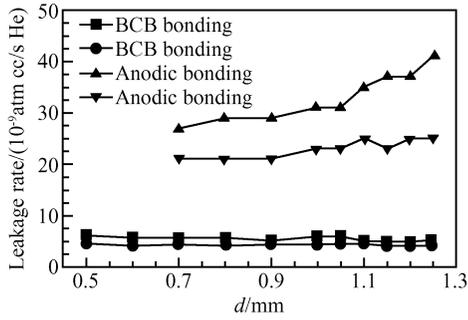


图 4 He 气检漏结果

Fig.4 Results of the He leak detection

13. 4MPa 之间,硅玻璃直接阳极键合样品的剪切力在 5.3~9.2MPa 之间. 这表明应用 BCB 材料封装达到了封装剪切力强度的要求.

### 3.3 渗流理论模型的讨论

根据渗流简化模型,器件的渗流率  $J$  (单位: atm cc/s He) 为:

$$J = 4LDh \frac{\Delta P}{d}$$

其中各参数物理含义如图 5 所示,  $D$  为待拟合参数. 当存在渗流时,腔体内外压强差为:

$$\Delta P = P_0 - \frac{1}{L^2 H} \int J dt$$

据此可得:

$$J = \frac{4LDh}{d} P_0 (1 - e^{-\frac{4Dh}{dLH} t_1}) e^{-\frac{4Dh}{dLH} t_2}$$

其中  $t_1, t_2$  分别为保压时间和滞留时间. 实验中  $L = 500 \sim 2000 \mu\text{m}$ ,  $d = 500 \sim 1250 \mu\text{m}$ ,  $h = 0.2 \mu\text{m}$ ,  $P_0 = 500 \text{kPa}$ ,  $H = 227 \mu\text{m}$ ,  $t_1 = 7200 \text{s}$ ,  $t_2 = 1200 \sim 1700 \text{s}$ , 渗流率  $J$  实验测量值如图 4 所示. 通过计算程序迭代逼近得到参数  $D$ , 如图 6 所示,  $D$  与  $d$  (开孔边缘到划片边缘的间距) 的关系是很好的线性关系, 线性相关系数大于 0.99. 则参数  $D^* = D/d$  是一个与  $d$  不相关的参数, 其关系曲线如图 7 所示. 代入  $D^* = D/d$ , 理论上得到:

$$J = 4LD^* h P_0 (1 - e^{-\frac{4D^* h}{LH} t_1}) e^{-\frac{4D^* h}{LH} t_2}$$

它是一个与  $d$  无关的物理量, 仅由实验设计参数和 BCB 材料性质决定.

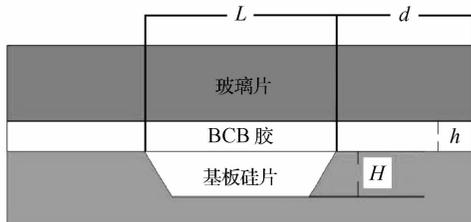


图 5 渗流模型中的参数

Fig.5 Parameters of the seepage model

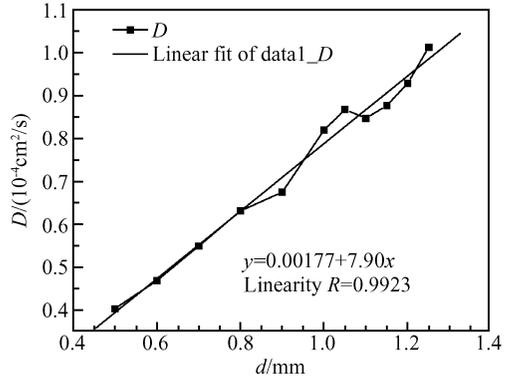


图 6  $D$  与  $d$  关系曲线

Fig.6 Relationship between  $D$  and  $d$

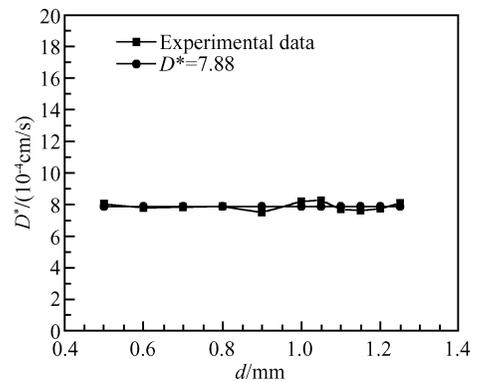


图 7  $D^*$  与  $d$  关系曲线

Fig.7 Relationship between  $D^*$  and  $d$

## 4 结论

基于苯并环丁烯材料的物理和化学特性,结合半导体加工工艺、设备条件,针对 MEMS 器件的圆片级低温气密性键合封装进行了实验研究,对键合后样品的气密性和键合剪切力进行了测试. 实验结果表明 BCB 材料在半导体器件的制作封装过程中可以在  $250^\circ\text{C}$  的温度条件下实现  $10^{-4} \text{Pa cc/s}$  的优越气密性能,是一种较理想的圆片级低温气密性键合封装材料,它除了应用于普通的半导体器件的封装,还可以应用于流体、光学器件等特殊器件的封装.

结合渗流简化模型的基本理论,通过实验数据的拟合分析和迭代计算得到:参数  $D^*$  和渗流率  $J$  是与开孔边缘到划片边缘的间距  $d$  无关的物理量.

## 参考文献

[1] Wang Jing, Zhang Fuxin, Shen Xuening, et al. Benzocyclobutene polymer and composite materials; Part I. Fiber Reinforced Plastics/Composite, 2002, 3(2): 50 (in Chinese) [王靖, 张富新, 沈学宁, 等. 苯并环丁烯及其材料(I). 玻璃

- 钢/复合材料,2002,3(2):50]
- [ 2 ] Wang Jing, Zhang Fuxin, Shen Xuening, et al. Benzocyclobutene polymer and composite materials; Part II. Fiber Reinforced Plastics/Composite,2002,5(3):44 (in Chinese) [王靖,张富新,沈学宁,等. 苯并环丁烯及其材料(II). 玻璃钢/复合材料,2002,5(3):44]
- [ 3 ] Jiang Yuqi. The study of the package about the high-g MEMS accelerometer. PhD Dissertation, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,2004 (in Chinese)[蒋玉齐. 高量程 MEMS 加速度计封装研究. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所博士学位论文,2004]
- [ 4 ] Tilmans H A C, Van de Peer M D J, Beyne E. The indent reflow sealing(IRS) technique-a method for the fabrication of sealed cavities for MEMS devices. Journal of Microelectromechanical Systems,2000,9(2):206
- [ 5 ] Moor De P, Sedky S, Sabuncuoglu D, et al. Uncooled Irbometers using surface micromachined poly SiGe. Pasadena, California, USA: Int Integrated Micro-manatechnol Space Applicat,1999:43
- [ 6 ] Neysmith J, Baldwin D F. A modular, chip scale, direct chip attach MEMS package; architecture and processing. Int J of Microcirc and Electron Packag,2000,23(4):474
- [ 7 ] Niklaus F, Andersson H, Enoksson P, et al. Low temperature full wafer adhesive bonding of structured wafers. Sensors and Actuators,2001, A92:235
- [ 8 ] Oberhammer J, Niklaus F, Stemme G. Selective wafer-level adhesive bonding with benzocyclobutene for fabrication of cavities. Sensors and Actuators,2003, A105:297
- [ 9 ] Oberhammer J, Niklaus F, Stemme G. Sealing of adhesive bonded devices on wafer level. Sensors and Actuators,2004, A110:407
- [10] MIL-STD-833E, method 1014.9
- [11] GJB 548A-96, method 1014A

## Si-Glass Hermetic Package with the Benzo-Cyclo-Butene Material

Liu Yufei<sup>1,2,†</sup>, Liu Wenping<sup>1,2</sup>, Li Sihua<sup>1</sup>, Wu Yaming<sup>1</sup>, and Luo Le<sup>1</sup>

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

(2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The characteristics of the wafer level low-temperature bonding with the benzo-cyclo-butene (BCB) material are studied experimentally and compared with the 300°C anodic bonding. The results show that the bonding temperature with BCB is below 250°C, the hermeticity is  $(5.5 \pm 0.5) \times 10^{-4}$  Pa cc/s He, the shear strength is from 9.0 to 13.4MPa, and the yield is 100%. It shows that using the BCB material is an effective way for wafer level low-temperature hermetic package. According to the simplified seepage model, the relationship between the leakage rate and the distance from the hole to the device border is also studied.

**Key words:** low-temperature bonding; hermetic package; benzo-cyclo-butene (BCB); seepage model

**PACC:** 4283; 0730; 3520G

**Article ID:** 0253-4177(2006)S0-0407-04

† Corresponding author. Email: yufeiliu@mail.sim.ac.cn

Received 11 October 2005, revised manuscript received 16 January 2006