

硅/玻璃紫外固化中间层键合*

程文进^{1,2} 汤自荣^{1,2,†} 廖广兰^{1,2} 史铁林^{1,2} 林晓辉^{1,2} 彭 平^{1,2}

(1 华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074)

(2 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 利用玻璃的透光特性和紫外固化的成熟技术, 研究了一种使用紫外固化胶作为中间层的玻璃/硅室温键合工艺. 通过选择一定波段的紫外固化胶, 旋涂紫外胶后使用 365nm 光刻机作为紫外光源控制紫外固化, 从而实现了硅/玻璃的中间层键合. 分析测试结果表明, 紫外固化辅助的中间层键合可以成功应用于硅/玻璃键合, 中间层厚 5~6 μm , 键合强度达到 26MPa. 该工艺只需室温条件, 简单高效, 成本低廉, 无需额外的压力或电场, 对于硅/玻璃低温键合封装具有潜在的应用价值.

关键词: 室温键合; 中间层; 紫外固化

EEACC: 2530B

中图分类号: TN305

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)01-0179-04

1 前言

近年来, 微电子技术得到了广泛的应用和发展. 作为 MEMS 制作和封装的重要技术之一, 键合逐渐成为微电子制造中的一项关键工艺. 由于玻璃具有良好的电绝缘性、透光性、化学稳定性和机械强度, 并能与 IC 工艺兼容, 因此玻璃成为 MEMS 制造中仅次于硅的使用最多的材料, 玻璃和硅的键合封装在微流体管道、微传感器、微型仪表等方面得到了广泛的应用^[1~3].

目前硅/玻璃键合技术主要分为直接键合如阳极键合^[4,5]和中间层键合. 阳极键合可以达到良好的键合率和键合强度, 但是需要强电场辅助, 对表面粗糙度的严格要求也严重影响了它在 MEMS 中的应用, 并且阳极键合中玻璃的碱离子还可能对工艺造成污染. 中间层键合一般采用高分子材料作为玻璃/硅粘结剂. 采用有机高分子材料做中间层键合最早由 Besten^[6] 和 Arquint^[7] 等人开始研究. SU-8 光刻胶, AZ-4620, JSR, SP-341 等感光材料作为键合中间层材料也均有相关报道^[8,9]. 中间层键合具有工艺简单, 成本低廉, 键合温度低 (< 100 $^{\circ}\text{C}$), 键合材料不受限制, 不受热膨胀系数影响, 残余应力小, 键合强度高特点, 目前已广泛应用于 3D 微结构、微传感器、MEMS、VLSI 器件的键合封装等.

近年来, 紫外固化技术^[10] 由于其工艺简便, 快速稳定、效率高, 常温固化、粘结性能好, 几乎没有环境污染, 是公认的一种节能和环境友好型工艺而备受青睐. 紫外固化是在特殊配方的树脂中加入光敏剂的紫外固化胶, 在 UV 辐照过程中, 固化胶吸收 UV 能量并引发单体发生聚合反应形成固体, 从而快速实现中间层键合. 本文

研究了一种紫外固化辅助的硅/玻璃键合工艺, 通过采用感光紫外固化胶作为键合中介层、光刻机光源进行紫外固化进而实现硅/玻璃的中间层键合.

2 实验

实验中使用的紫外固化胶为华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室自行研制的紫外固化涂料, 是一种透明、无色、在紫外光照射下发生固化的聚合物, 由预聚物、活性单体、光引发剂等主成分以稳定剂、流平剂等辅助剂组成. 该固化胶通过紫外光固化, 在 350~380nm 范围具有最大的吸收率, 而且具有足够弹性以确保应力最小, 因而特别适合粘接断面相对较薄、具有不同膨胀系数的材质. 由于 365nm 紫外光正好位于其较大吸收率范围, 为此, 本实验采用 365nm 紫外光源光刻机 MA6 作为紫外固化设备来进行紫外曝光, 其示意配置如图 1 所示.

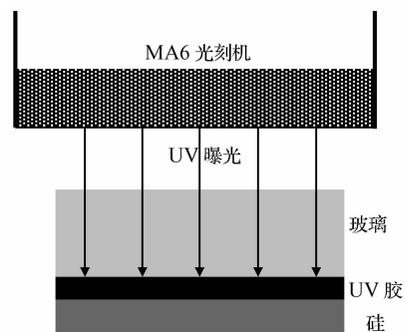


图 1 紫外固化示意图

Fig. 1 Schematic of UV curing set-up

* 国家重大基础研究发展规划(批准号:2003CB716207)和国家自然科学基金(批准号:50405033)资助项目

† 通信作者. Email: zirong@mail.hust.edu.cn

2007-06-20 收到, 2007-08-10 定稿

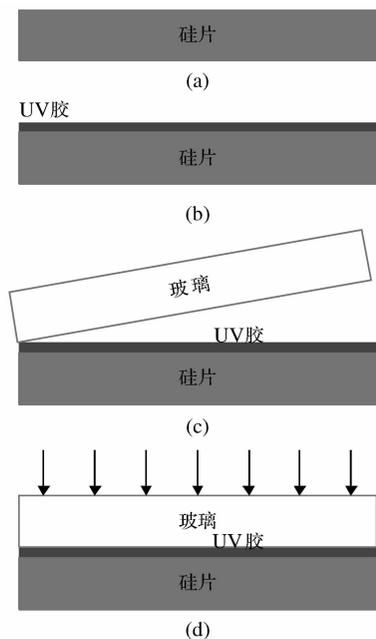


图 2 实验步骤示意图 (a)硅片和玻璃清洗;(b)旋涂紫外固化胶;(c)预键合;(d)紫外固化键合

Fig.2 Schematic of process flow

该固化方案有如下优点:(1)设备复用,无需额外购置紫外固化设备,在保证工艺简单前提下,大大降低设备成本;(2)光刻机作为传统曝光设备,紫外光源质量高,光源辐射均匀性好,特别是 MA6 光刻机紫外波长为 365nm,光谱范围窄,光源稳定高效;(3)操作简单,便于精确控制曝光时间、调节硅片位置等;(4)安全可靠。

实验材料采用单晶硅晶圆,掺杂类型为 p 型,〈111〉晶向,厚 $380\mu\text{m}$,半径 38mm,粗糙度等级为初级;玻璃圆片厚 $525\mu\text{m}$,切割成 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的方片.键合实验步骤如图 2 所示。

(1)硅片和玻璃片的清洗:首先利用超声清洗 10min,然后利用丙酮反复擦洗,去除表面的油脂等,经过去离子水冲洗 3min,放入浓硫酸和双氧水的混合溶液($\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 = 2 : 1$)中, 120°C 加热 15min,然后用去离子水多次冲洗,再用纯氮气吹干即可;

(2)烘烤硅片和玻璃:在 160°C 热板上加热玻璃和硅片,其键合面必须朝上,烘烤时间 20min,使得表面水分大部分蒸发,只留下单分子水膜层;

(3)涂覆光刻胶:采用匀胶机进行旋转涂覆紫外固化胶,旋涂一般在硅片上进行,转速为 4000r/s,时间 30s;

(4)预键合:在硅片上涂覆好紫外固化胶膜后,将玻璃基板压上硅片表面,利用其自重和胶的表面浸润作用完成硅片和玻璃的预键合;

(5)紫外固化:将完成预键合后的硅片/玻璃对放入 MA6 光刻机,使用透明玻璃作为掩膜,并使玻璃面朝上以实现透射紫外光对紫外胶进行持续曝光,使得紫外胶发生固化反应,完成键合。

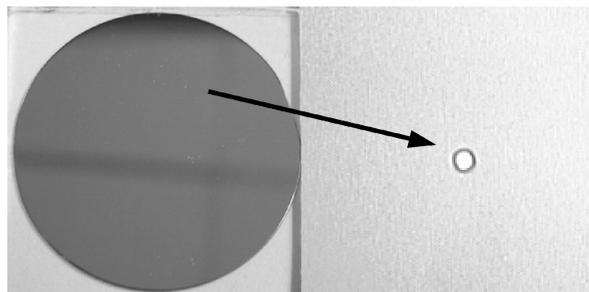


图 3 键合对效果图及中间层的少量气泡
Fig.3 Bonded Si-glass pair and the bubbles in the mediate layer

3 结果与讨论

通过上述工艺完成玻璃/硅的键合后,经切片切割为 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 样片,再进行键合强度测试和中间层界面分析.采用电子显微镜图像测量其键合率,分析非键合区域特别是气泡空洞产生的原因;通过单轴拉伸实验测试其键合强度;通过刀片插入法获得键合界面表面能量的表征,并进一步通过 SEM 分析其中间层厚度和质量。

3.1 键合率的影响因素

如图 3 所示,左边为一对键合好的硅/玻璃实物图,右边为键合界面气泡的放大图.可以看出,通过上述步骤可以获得良好的键合率,键合界面气泡较少而且小,采用简单的预键合方式可以较好地排除气泡,达到较好的键合率,大致估计出预键合率大于 95%。

影响键合率的最大因素是键合过程中的气泡,气泡空腔的产生主要受两个方面的影响.如图 4(a)所示,上面的气泡主要是由于键合过程中引入杂质形成了气泡残留,紫外固化过程中凝聚成团,形成气泡空洞,其放大图如 4(b)所示;另一个影响因素是键合过程中直接引入的气泡,或者是溶解在胶里的残留气泡,如图 4(c)所示.由此可见,真空下进行键合对于气泡的消除应该具有显著的改善,但是对于工艺设备的要求较高。

3.2 键合强度测试

3.2.1 抗拉强度测试

本文使用自行研制的单轴微样件拉伸测试仪进行拉伸实验.实验步骤为:将键合好的硅/玻璃片分割成 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的样件,将样件用粘接剂粘到夹具上,再将夹具用螺钉固定到测试仪拉杆上,最后利用测试仪对样件施加正向拉应力测试.测量得到如图 5 所示的 5 组数据。

进一步可以获得最大拉力值,计算出相应强度如表 1 所示。

其中 2# 样片经过拉伸测试后失效的样片如图 6 所示。

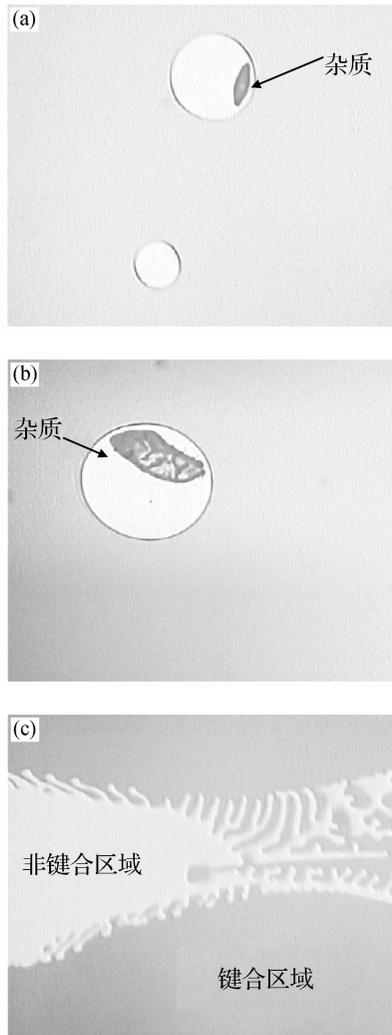


图 4 气泡对键合率的影响 (a)键合界面的气泡;(b)杂质的影响;(c)键合过程气泡移动影响

Fig.4 Effect of bubbles on bond ratio

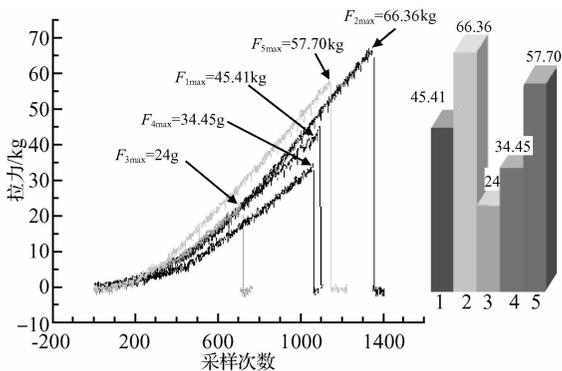


图 5 键合拉伸拉力曲线图

Fig.5 Curves of tensile test

表 1 拉伸实验结果

Table 1 Results of tensile test

样品	最大拉力/kg	样品面积	抗拉强度/MPa	拉断说明
1#	45.41	25mm ²	>18.2	AB 胶一端断开
2#	66.36		26.5	硅片撕裂
3#	24		>9.6	AB 胶一端断开
4#	34.45		>13.8	AB 胶一端断开
5#	57.70		23.1	硅片撕裂

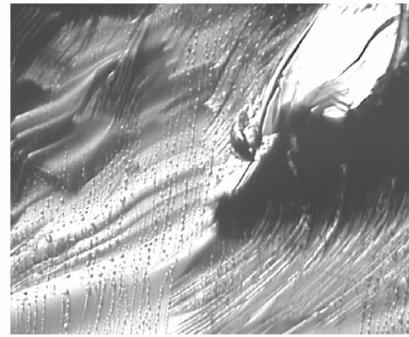


图 6 经过拉伸测试失效的键合样片

Fig.6 Fracture surface of bonded pairs after tensile test

可以看出,样片从硅片内部断裂,而不是在界面断裂,说明已经形成了强力键合.而从表 1 的测试结果表明,在室温条件下,没有进行任何加压加温措施,紫外固化中间层键合的强度达到了 26.5MPa,键合强度比其他中间层键合质量要优越得多,如 JSR 和 SU-8 键合大约在 100~200℃条件下进行,并需适当加温加压,获得的键合强度约为 10~20MPa,阳极键合虽然能够获得 35MPa 的键合质量,但是需要外加高强度的电场辅助.

3.2.2 粘结强度测试

粘结强度表征了键合表面相互结合的紧密程度,一般以功和能量的形式来表征键合强度.虽然这种方法测试得比较粗略,而且操作性很差,但是能够以能量的方式表征键合强度.测量这种表面能最传统的方法是刀片插入法^[11].本文尝试采用刀片插入法对键合质量进行测试,测试使用普通双面刀片,厚度约为 0.1mm.刀片插入法的实际效果如图 7 所示.

测量其开裂长度大约为 8.5mm,硅片厚度为 0.38mm,玻璃的厚度为 2.4mm,硅片沿裂纹方向的杨氏模量为 130~170GPa,普通玻璃的杨氏模量约为 80GPa,可以粗略估计表面能为:

$$W = G_{IC} = \frac{3h^2 E_1 d_1^3 E_2 d_2^3}{8c^4 (E_1 d_1^3 + E_2 d_2^3)} = 1.564J/m^2$$

接着对键合的硅/玻璃片进行了高温失效实验,样片放入退火炉中加温至 200℃处理 8h,在显微镜下观察,紫外胶内部无气泡产生,而拉伸实验证明其强度无变化;温度高于 200℃时,键合界面颜色变深,紫外胶开始发生分解,导致键合强度降低直至硅和玻璃分离.

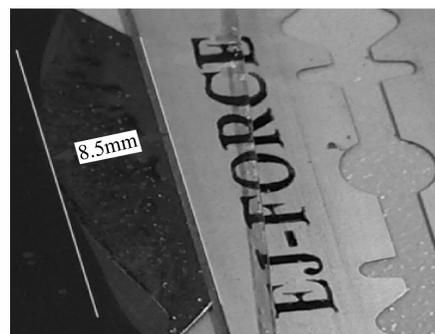


图 7 刀片插入法实物图

Fig.7 Photo of the DCB test

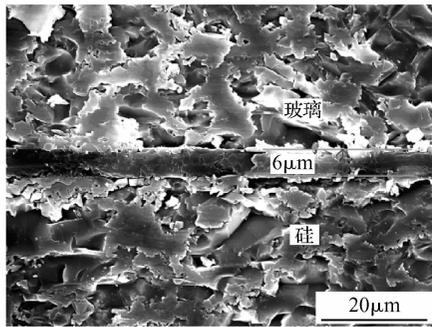


图 8 中间层 SEM 图

Fig. 8 SEM photo of intermediate layer

3.3 中间层测试与分析

将上述划片后的 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 小方块制样, 然后采用扫描电子显微镜观察中间层, 结果如图 8 所示。

可以看出, 紫外固化中间层薄膜厚度均匀, 大约为 $6\mu\text{m}$ 。表 2 给出了国外研究者对一些材料中间层键合的厚度范围。相比较而言, 紫外固化中间层键合能够获得均匀、较薄的中间层, 厚度小于其他同类光敏固化材料键合的中间层, 在满足较好键合强度的同时尽量减小了中间层对器件厚度的影响。

表 2 常见中间层键合厚度^[9]

Table 2 Thickness of common material intermediate layers

中间层材料	厚度/ μm
SU-8	20~30
BCB	15~25
JSR-137N	20~30
SP-341	15~20
AZ-4620	10~20

4 结论

研究开发了紫外固化键合工艺, 并对紫外固化键合强度分别进行了强度拉伸实验和刀片插入法的实验, 获得了键合质量的力学强度和能量强度的表征, 同时也

对中间层厚度进行了测量和分析。结果表明, 紫外固化能成功应用于玻璃和硅的中间层键合, 在室温条件下, 无需施加压力、电场等其他额外条件, 键合率接近 100%, 键合强度超过 26MPa。

参考文献

- [1] Rogers T, Kowal J. Selection of glass, anodic bonding conditions and material compatibility for silicon-glass capacitive sensors. *Sensors & Actuators A*, 1995, 46/47: 113
- [2] Gao Z Y, Yuan G, Yao Y H, et al. Advance on micromachined inertial instruments. *Proceedings of the China-Japan Joint Workshop on Micromachine/MEMS*, 1997: 84
- [3] Wang Peisen, Yu Ying, Luo Zhongzi, et al. Application of Si/glass bonding in the facture of RF-MEMS switches. *MEMS Device & Technology*, 2007, 1: 30 (in Chinese)[王培森, 于映, 罗仲梓, 等. 硅/玻璃键合技术在 RF-MEMS 开关制作中的应用. *MEMS 器件与技术*, 2007, 1: 30]
- [4] Puers B, Peeters E, Van den Bossche A, et al. Capacitive pressure sensor with low impedance output and active suppression of parasitic effects. *Sensors and Actuators A*, 1990, 21(1~3): 108
- [5] Mastrangelo C H, Muller R S. Vacuum-sealed silicon micromachined incandescent light source. *Technical Digest - International Electron Devices Meeting*, 1989: 503
- [6] Den Besten C, van Hal R E G, Munoz J, et al. Polymer bonding of micro-machined silicon structures. *IEEE Conference of MEMS*, 1992: 104
- [7] Arquint P, van der Wal P D, van der Schoot B H, et al. Flexible polysilicon interconnection between two substrates for microsystem assembly. *Transducers*, 1995: 263
- [8] Niklaus F, Andersson H, Enoksson P, et al. Low-temperature full wafer adhesive bonding. *J Micromech Microeng*, 2001, 11: 100
- [9] Pan C T, Cheng P J, Chen M F, et al. Intermediate wafer level bonding and interface behavior. *Microelectronics Reliability*, 2005, 45: 657
- [10] Tang Xun, Pan Shancun. Progress of research works on UV-curable adhesive. *Information Recording Materials*, 2003, 4(2): 32 (in Chinese)[唐薰, 潘山存. UV 固化胶粘剂的研究进展. *信息记录材料*, 2003, 4(2): 32]
- [11] Vallin O, Jonsson K, Lindberg U. Adhesion quantification methods for wafer bonding. *Materials and Engineering R*, 2005, 50: 113

Intermediate Layer Bonding for Silicon and Glass Based on UV Adhesive*

Cheng Wenjin^{1,2}, Tang Zirong^{1,2,†}, Liao Guanglan^{1,2}, Shi Tielin^{1,2},
Lin Xiaohui^{1,2}, and Peng Ping^{1,2}

(1 School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(2 Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China)

Abstract: Taking advantage of the transparency of glass and the maturity of UV curing technology, an intermediate layer bonding process with ultraviolet curable adhesive was investigated to bond silicon wafer to glass substrate. Following the spin-coating of UV-curable adhesive onto the wafer, the silicon wafer and glass substrate were bonded under UV light with a wavelength of 365nm. Experimental results demonstrate that the UV curing approach can be applied in the silicon-glass intermediate layer bonding. The bonding strength can reach over 26MPa and the thickness of the intermediate layer is about $5\sim 6\mu\text{m}$. The process is effective, simple, and low cost, and it will have potential applications in low-temperature microelectronics packaging.

Key words: room-temperature bonding; intermediate layer; UV curing

EEACC: 2530B

Article ID: 0253-4177(2008)01-0179-04

* Project supported the National Key Basic Research Project (No. 2003CB716207) and the National Natural Science Foundation of China (No. 50405033)

† Corresponding author. Email: zirong@mail.hust.edu.cn

Received 20 June 2007, revised manuscript received 10 August 2007