

基于 UV 光照的圆片直接键合技术*

马沧海 廖广兰[†] 史铁林 汤自荣 刘世元 聂磊 林晓辉

(华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 研究了 UV 辅助活化与湿化学清洗活化相结合的圆片直接键合技术, 并利用红外测试系统、单轴拉伸测试仪和场发射扫描电子显微镜, 结合恒温恒湿实验、高低温循环实验对键合质量进行了测试. 结果表明, 采用该技术可以实现较好的圆片直接键合, 提高键合强度, 控制合适的 UV 光照时间可以获得更高的强度, 对键合硅片进行恒温恒湿和高低温交变循环处理后, 硅片仍能保持较高的键合强度. 因此, 该工艺对于改进圆片直接键合技术是行之有效的, 具有很大的应用潜力.

关键词: 圆片直接键合; 紫外光照射; 键合质量; 可靠性

EEACC: 2530B

中图分类号: TN305

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)07-1369-04

1 引言

圆片直接键合 (wafer direct bonding, WDB) 是两圆片经表面清洗和活化处理, 在室温下直接贴合, 再经过热处理使之结合的技术. 使用 WDB 技术, 不仅可以制备 SOI (silicon on insulator)^[1], 硅薄膜^[2] 材料, 还可以用于高集成度的圆片级封装^[3] 和制造光波导^[4] 等.

目前圆片直接键合主要的研究包括了疏水键合和亲水键合. 疏水键合的原理^[5] 是在键合界面悬挂 H 和 F, 生成的 Si-H 和 Si-F 通过氢键作用形成 Si-F...H-Si, 高温退火后形成 Si-Si 共价键, 实现键合. 亲水键合^[6] 则是在硅片表面形成大量悬挂的 -OH, 贴合后界面的 Si-OH 通过氢键的桥连和 -OH 之间的脱水反应形成 Si-O-Si 共价键, 实现硅片之间的键合. 为了提高亲水键合表面活性, 需在表面形成大量悬挂的 -OH. 目前, 国内外学者对于表面活化提出了许多方法, 主要包括湿化学法^[7] 和干法表面处理^[8]. 湿化学法的优点在于可以批量对硅片进行表面处理, 其过程可与 IC 工艺兼容、成本低, 缺点是活化过程比较繁杂, 并且采用的氢氟酸等试剂具有毒性. 对于干法表面处理, 使用等离子法可以获得较高的表面能, 活化效果好, 但等离子法设备要求高、成本昂贵, 且对器件表面可能造成伤害.

为此人们不断探索新的活化工艺. Holl 等人^[9] 提出了利用 UV 光辅助表面活化进行疏水圆片键合的工艺, 而本文作者则探索采用 UV 光辅助亲水圆片键合的工艺, 该方法将湿化学法活化与干法活化结合, 具有以下优点: (1) 该方法在常温常压的环境中进行, 是一种非接触式的干法清洗技术; (2) UV 光中的短波紫外线能够深入材料表面细微的部位, 发生光敏氧化反应, 生成可

挥发性气体, 可彻底去除表面微小颗粒, 不会造成二次污染; (3) UV 光辐射改质不会造成晶体缺陷; (4) 设备简单、成本低廉、活化时间短; (5) 对于硅以外其他材料, 如 III-V 族元素、玻璃等也具有很好的辅助键合效果.

2 UV 辅助键合实验

实验采用 37.5mm 单面抛光 p 型 (111) 晶向圆片, 其初始表面粗糙度 RMS 约为 0.3nm ($2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ 区域), 基本实验流程如图 1 所示.

实验过程中 UV 光源选用真空低压紫外汞灯, 它是一种包含 C 波段 (波长 254nm, 4.8eV) 和 V 波段 (波长 185nm, 6.7eV) 两种能量的混合紫外光. 将硅片置于离 UV 面光源 5mm 处进行照射, 照射光强约为 $15\text{mW}/\text{cm}^2$. 根据实验设计, 对硅片分别照射 3, 5, 7 和 9min, 另外一组不进行 UV 光照.

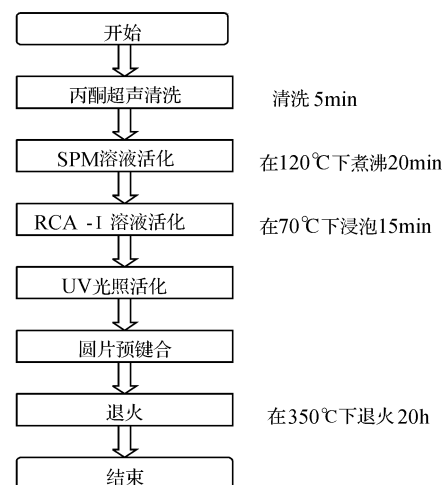


图 1 UV 辅助键合实验流程图

Fig.1 Sketch of wafer bonding with UV

* 国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2003CB716207), 国家自然科学基金 (批准号: 50405033, 50775091) 和新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-06-0639) 资助项目

[†] 通信作者. Email: g.l.liao@mail.hust.edu.cn

2007-12-18 收到, 2008-01-09 定稿

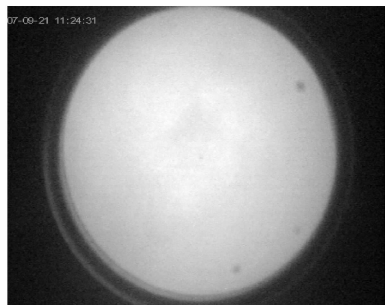


图 2 UV 辅助预键合红外图像

Fig. 2 Infrared image of bonded wafers with UV

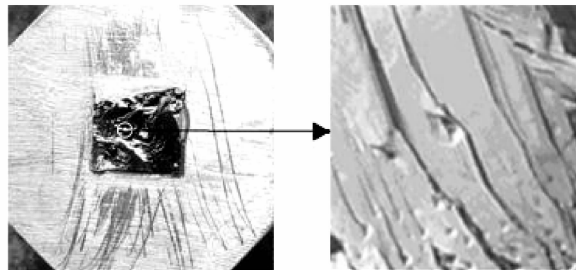


图 3 UV 光照 3min 后断裂界面

Fig. 3 Fracture image with 3min UV exposure

3 键合质量及可靠性讨论

3.1 键合质量测试及讨论

将使用 UV 辅助键合的硅片采用红外测试系统进行观测,如图 2 所示,其中浅灰色区域代表成功键合的部分.由此可见,硅片成功键合在一起,界面没有明显颗粒,获得了较大的键合率.

将退火处理后的硅片切割为 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的方形片,利用单轴拉伸测试仪测试其键合强度,结果比较如表 1 所示.

从拉伸强度比较可以看到,UV 光照 3,5,7 和 9min 后的键合强度明显高于未进行 UV 光照的硅片键合强度,而且 UV 光照 3min 时硅片键合强度达到最大值 (10.3MPa).随着 UV 光照时间大于 3min 并逐渐增加时,硅片键合强度逐渐减弱,但仍然大于未进行 UV 光照的硅片键合强度. Vig 等人^[10]指出,较长时间的 UV 光照会在硅表面已有氧化层上形成一层新的、厚度为 0.3~1.5nm 的 SiO_2 氧化层,导致表面粗糙度增加.另外,长时间 UV 光照可能造成表层水分子的蒸发而减少—OH 的形成,不利于氢键的桥连和—OH 之间的脱水反应,从而导致键合强度下降.因此,应选择合适的 UV 光照时间以获得较高的键合强度(如本实验中,UV 光照 3min 可获得最佳键合强度).

对拉伸实验后的硅片断裂界面进行观察,如图 3 所示.可见 UV 光照 3min 后进行键合的硅片经单轴拉伸测试仪拉断后,界面十分粗糙,断裂出现在体硅部分,键合中间界面没有被拉开,证明获得了较大的键合强度.

为了进一步观察键合界面过渡层,对试样进行了 FSEM 测试,为此采用 10% HF 溶液腐蚀键合界面约 1min,在 FSEM 下观察键合截面.图 4 为 UV 光照射 3min 后键合硅片的界面形貌,其中间过渡层很窄,厚度仅为 54.0nm,表明键合界面非常紧密,键合质量比较好.

表 1 不同 UV 光照时间下的键合强度

Table 1 Tensile strength of samples with different UV exposure times

UV 光照时间/min	0	3	5	7	9
键合强度/MPa	4.2	10.3	6.9	6.5	5.2

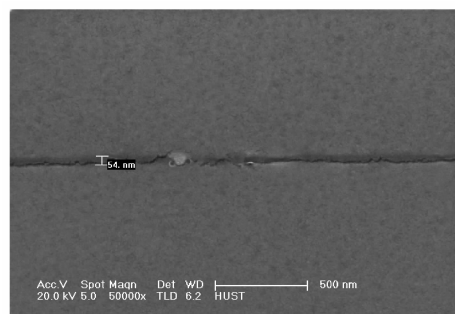


图 4 UV 光照 3min 后键合中间过渡层形貌

Fig. 4 Transition layer with 3min UV exposure

3.2 恒温恒湿实验

恒温恒湿实验是模拟湿热环境,广泛用于确定电工、电子产品对高温环境及湿热环境的适应性,特别适用于产品的电气性能和机械性能的变化情况,也可用于检查试样耐受某些腐蚀的能力.实验过程中对上述相同批次切割后的小片进行恒定湿热实验.实验选用 HS-100 型恒定湿热试验箱,设定湿度为 85% R. H,温度为 81°C ,实验时间 336h.恒温恒湿实验结束后,测试硅片的键合强度,结果如图 5 所示.

从图 5 可以看出,经过恒温恒湿实验后,硅片键合强度仍然保持实验前键合强度变化趋势,即 UV 光照 3min 时硅片键合强度达到最大值,随着 UV 光照时间继续增加,硅片键合强度将逐渐减弱.硅片经过恒温恒湿实验后,相对于处理前,在相同的 UV 光照时间下,键

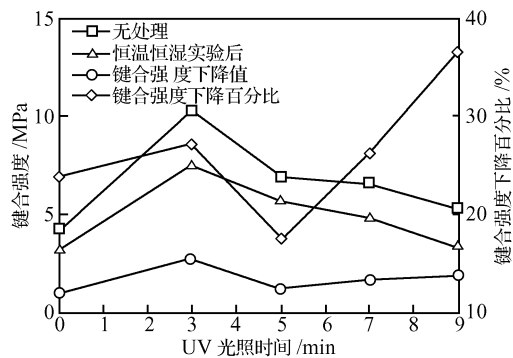


图 5 恒温恒湿对键合强度的影响

Fig. 5 Tensile strength of samples with constant temperature and humidity treatment

表 2 高低温循环实验条件

Table 2 Conditions for high and low temperature circulation

实验指标	参数
最高温度/℃	150
最低温度/℃	-55
升温时间/min	30
高温暴露时间/min	10
降温时间/min	120
低温暴露时间/min	10
循环次数	15
持续时间/min	2500

合强度明显下降,平均键合强度下降了约 26.2%,但处理后 UV 光照 3,5 和 7min 的键合强度仍比处理前未用 UV 光照的高.可见采用 UV 辅助活化的直接键合对强度有很明显的改善作用.

3.3 高低温循环实验

高低温循环会给器件带来较大的热应力和热冲击,可以测试结构或器件的可靠性.高低温循环实验参考的是美国电子工业协会(EIA)下设的半导体工程标准化组织 JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council)推出的温度循环实验标准 JESD22- A104C,使用 ESPEC ESL-04AGP 温湿度试验箱,应力强度指标是按照 JESD22-A104C 和 ESPEC ESL-04AGP 温度试验箱实际情况来设定,参数如表 2 所示.

实验中,温度设定曲线和实际曲线的趋势对照如图 6 所示.

高低温循环实验结束后,取出样品在红外测试系统下观察其键合界面,无明显变化,未出现新的裂缝或界面分离.对温度循环实验后的同一批样片进行拉伸强度测试,结果如图 7 所示.

由图 7 可见,经过高低温循环后,硅片键合强度保持处理前变化的趋势,经过高低温循环实验后,相对于处理前,在相同的 UV 光照时间下,键合强度有所下降,但仍保留了较好的强度.

由于在高低温交替环境中,体硅及键合界面承受外界温度急剧变化,造成应力增大,降低键合结构稳定性;同时,键合硅片在界面处存在本征的非常微观的缺陷,

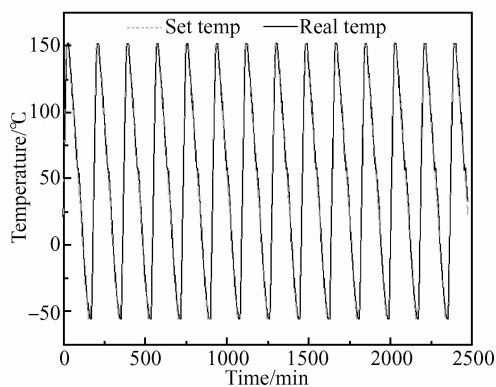


图 6 高低温循环温度变化曲线

Fig. 6 Curve of high and low temperature circulation

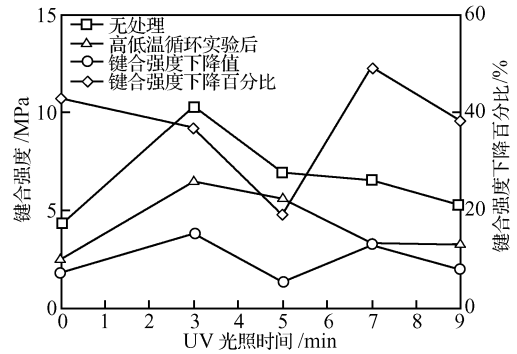


图 7 高低温循环对键合强度的影响

Fig.7 Tensile strength of samples with high and low temperature circulation

包括裂纹、位错等等,这些缺陷在一般情况下无法检测.而高低温交替环境会加速界面处位错的聚集,导致应力集中,加速微细裂缝的扩展,最终表现为键合强度下降.这也是常规条件下很难失效的器件结构(如电子芯片、产品等)通常采用高低温交替环境来进行加速寿命实验的原因.

4 结论

研究了 UV 辅助活化的低温圆片直接键合技术.结果表明,采用该技术可以较好地实现圆片键合,提高键合强度,并且控制 UV 光照时间可以获得更高的强度.对键合后的硅片进行了恒温恒湿和高低温交替循环处理,实验后仍能保持较高的键合强度.因此,该工艺对于改进圆片直接键合是行之有效的.

参考文献

- [1] Zhan Da, Ma Xiaobo, Liu Weili, et al. Fabrication of SOI material using low temperature bonding technology. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(12): 189
- [2] Zhang Zhengyuan, Xu Shiliu, Feng Jian, et al. A technology for making silicon film on trench silicon substrate. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(5): 1401 (in Chinese) [张正元, 徐世六, 冯建, 等. 基于带图形的硅衬底上制备硅薄膜的技术. 传感技术学报, 2006, 19(5): 1401]
- [3] Wang Yuchuan, Zhu Dapeng, Xu Wei, et al. Wafer-level hermetic package with through-wafer interconnects. Journal of Functional Materials and Devices, 2006, 12(6): 469 (in Chinese) [王玉传, 朱大鹏, 许薇, 等. 圆片级气密封装及通孔垂直互连研究. 功能材料与器件学报, 2006, 12(6): 469]
- [4] Berini P, Mattiussi G, Lahoud N, et al. Wafer-bonded surface plasmon waveguides. Appl Phys Lett, 2007, 90: 061108
- [5] Tong Q Y, Schmidt E, Gösele U. Hydrophobic silicon wafer bonding. Appl Phys Lett, 1994, 64(5): 625
- [6] Tong Q Y, Xu Xiaoli. Mechanism of wafer direct bonding. J Appl Sci, 1990, 8(4): 303 (in Chinese) [童勤义, 徐晓莉. 硅片直接键合机理研究. 应用科学学报, 1990, 8(4): 303]
- [7] Tong Q Y, Gösele U. Low temperature wafer direct bonding. J Microelectromech Syst, 1994, 3(1): 29
- [8] Amirfeiz P, Bengtsson S, Bergh M, et al. Formation of silicon structures by plasma-activated wafer bonding. J Electrochem Soc, 2000, 147(7): 2693

- [9] Holl S L, Colinge C A, Hobart K D, et al. UV activation treatment for hydrophobic wafer bonding. *J Electrochem Soc*, 2006, 153(7): 613
- [10] Vig J R, Le Bus J W. UV/ozone cleaning of surfaces. *IEEE Trans Parts, Hybrids Packag*. 1976, 12(4): 365

Wafer Direct Bonding Based on UV Exposure*

Ma Canghai, Liao Guanglan[†], Shi Tielin, Tang Zirong, Liu Shiyuan, Nie Lei, and Lin Xiaohui

(*Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China*)

Abstract: Wafer direct bonding technology has extensive application and broad prospects. UV activation combined with wet chemical cleaning in wafer direct bonding is investigated. An IR detection system, single tensile machine, and FSEM are employed to evaluate the bonding quality. The constant temperature and humidity experiment, and the high and low temperature cycle experiment are also performed. It has been demonstrated that this approach can realize wafer direct bonding and enhance the bonding strength. A higher strength can be obtained by controlling the UV exposure time. The bonded wafer treated by constant temperature and humidity and high and low temperature cycle can retain a higher bonding strength. Therefore, the process is effective for the wafer direct bonding and has great potential for application.

Key words: wafer direct bonding; UV exposure; bonding quality; reliability

EEACC: 2530B

Article ID: 0253-4177(2008)07-1369-04

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2003CB716207), the National Natural Science Foundation of China (Nos. 50405033, 50775091), and the Plan of Supporting Excellent Talented Person in New Century (No. NCET-06-0639)

[†] Corresponding author. Email: g.l.liao@mail.hust.edu.cn

Received 18 December 2007, revised manuscript received 9 January 2008

©2008 Chinese Institute of Electronics