

乙二醇辅助多层硅/硅直接键合*

杨道虹 徐 晨 沈光地

(北京工业大学电子信息与控制工程学院,北京市光电子技术实验室,北京 100022)

摘要: 利用乙二醇的分子结构和氢键在 10 万级的超净环境下成功地进行了多层乙二醇环境下的硅/硅直接键合,并在氮气保护下 1100 °C 热处理后进行了拉力强度测试,平均键合强度达到了 10MPa. SEM 观测表明,在键合界面没有发现孔洞和空隙.该方法同样适用于 Si-III 族化合物的直接键合.这为发展多层结构、多功能集成的 MEMS 结构器件奠定了良好的工艺基础.

关键词: 微电子机械系统;乙二醇;键合

PACC: 3520G; 7280

中图分类号: TN365 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)02-0395-04

1 引言

硅片直接键合技术 (silicon directly bonding, SDB) 就是把两抛光硅片经表面清洗和亲水活化处理,在室温下直接贴合后经热处理增加键合强度的一种技术. SDB 技术最早由 Lasky 于 1985 年提出并引入微电子领域^[1]. 随着 MEMS 技术的发展, SDB 技术更是得到了广泛和深入的研究和应用^[2~7]. 目前, SDB 已经发展成为 MEMS 领域一项独具特色的技术.

在常规的 SDB 技术中,对键合表面的平整度和超净环境级别的要求十分苛刻. 对键合的硅片一般要求表面起伏不超过 1nm,同时只有在超净级别为 100 级以下的超净环境下才有可能实现较好质量的硅/硅直接键合^[1,3]. 这大大限制了该技术的推广及应用.

根据亲水键合的基本原理,本文对在乙二醇环境中的硅/硅键合技术进行了研究,并初步分析了用该方法实施键合的特点,实验上也证明了该方法的可行性.

2 实验

选用两种国产硅片:一种是 p 型 100 双抛光原始裸片,电阻率为 $20 \sim 30 \Omega \cdot \text{cm}$,厚度为 $260 \pm 10 \mu\text{m}$;另一种是 p 型 100 单抛光原始裸片,电阻率为 $20 \sim 30 \Omega \cdot \text{cm}$,厚度为 $550 \pm 10 \mu\text{m}$. 整个操作环境的超净级别为十万级.

2.1 表面活化

常规清洗和表面活化处理具体工艺步骤如下:

- (1) 加去离子水超声 10min;
- (2) 分别加丙酮或无水乙醇各煮约 15min 后用去离子水冲洗;
- (3) 稀 HF 中漂洗数秒后用去离子水冲洗;
- (4) $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 = 1 : 1, 40^\circ\text{C}$, 5min 后用去离子水冲洗;
- (5) 将活化处理好的硅片放入乙二醇中超声约 20min.

2.2 预键合

- (1) 将预键合的硅片在乙二醇中贴合在一起后,

*北京市教委(批准号:KM200310005009)和国家高技术研究发展计划(批准号:2002AA312070)资助项目

杨道虹 男,1975 年出生,博士研究生,现从事 MEMS 器件设计和制备工艺研究.

徐 晨 男,1958 年出生,教授,现主要从事微电子技术教学和 MEMS 相关研究.

沈光地 男,1939 年出生,教授,现主要从事半导体光电子学及其相关研究.

2004-01-17 收到,2004-06-07 定稿

取出放在平整光滑的铁板电炉上加热,温度不高于 200 .加热时间约为 180min;

(2)放入 300 烘箱烘烤约 3h,使用氮气保护,完成预键合.

2.3 退火

将预键合好的硅片在氮气的保护下进行退火处理,退火温度为 1100 ,退火时间为 60min.

3 结果与讨论

3.1 实验结果

在进行硅硅直接键合实验之前先用台阶仪 (KLA Tencor Alpha-Step IQ)对硅片表面的粗糙度进行测试,典型的测试结果如图 1 所示.测试结果表明,硅片表面的粗糙度已经超过了 2.0nm.

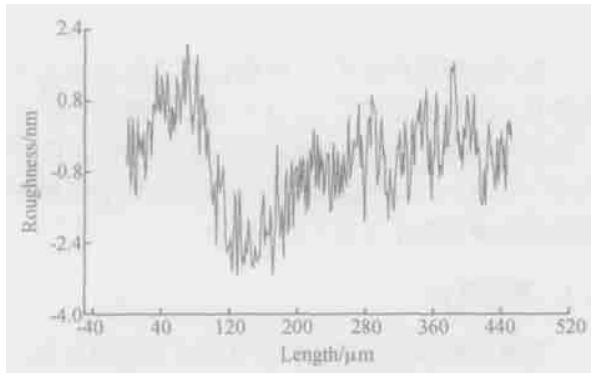


图 1 键合硅片表面起伏分布

Fig.1 Roughness distribution of native silicon

将完成键合的硅片分别进行拉力强度测试和键合界面观察.拉力强度测试是在电子万能试验机 (SCHENCK,kraftaufnehmer,PM250Rn)上测试的.各种典型温度下的键合平均强度测试结果如表 1 所示,并将这个结果与采用常规亲水键合的平均强度进行了比较.

表 1 两种键合方法的平均键合强度比较 MPa

Table 1 Silicon bonding intension compared with traditional method MPa

温度	室温	180	400	700	1100
常规键合 键合强度	~0.02	~0.07	~1.1	5.7	7.3
乙二醇辅助键合 键合强度	1.2	3.1	3.4	8.2	10.0

用扫描电镜(日立 HITACHI,S-3500)观察键合界面和拉力拉开后的键合剖面.图 2 和图 3 为两层硅片键合后硅片的截面的 SEM 照片.图 4 和图 5 为三层和四层硅片键合后截面的 SEM 照片.

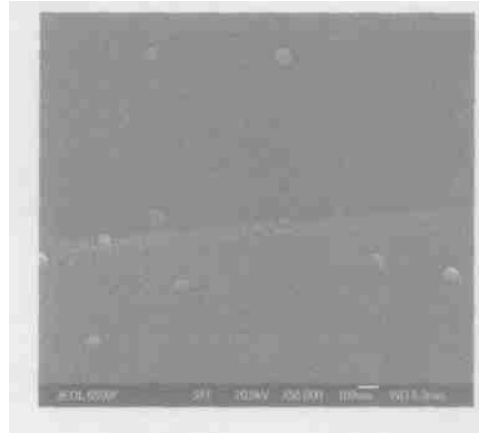


图 2 键合硅片(550μm)截面的 SEM 图像

Fig.2 SEM photograph in a cross-sectional view of the fracture after SDB

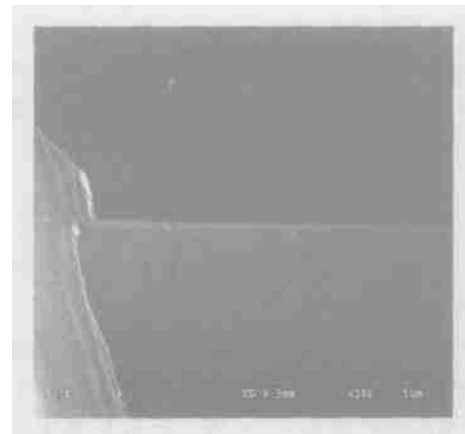


图 3 键合硅片(260μm)截面的 SEM 图像

Fig.3 SEM photograph in a cross-sectional view of the fractures after SDB

在相同的键合材料和工艺条件下,我们分别在去离子水、乙二醇中进行了硅片的预键合,然后在 200 以下加热烘干约 180min.结果发现,用乙二醇处理过的键合硅片的预键合强度明显大于用去离子水处理过的预键合强度(预键合平均强度分别为 1.2MPa,0.02MPa).

实验结果表明,如果按以往的方法在十万级以下的水汽环境中将经过亲水处理的硅片直接贴合在一起,再进行与乙二醇环境中相同的处理,往往键合失败或键合面积比例很小.

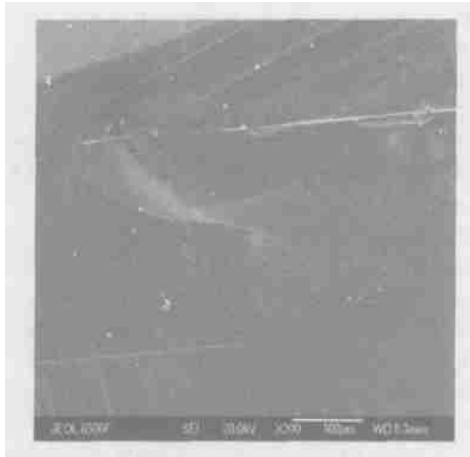


图 4 键合硅片截面的 SEM 图像(三层)

Fig.4 SEM photograph in a cross-sectional view of the fractures after three layers of SDB

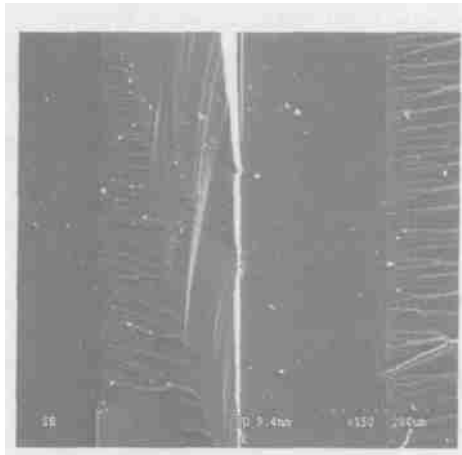


图 5 键合硅片截面的 SEM 图像(四层)

Fig.5 SEM photograph in a cross-sectional view of the fractures after four layers of SDB

造成这种现象的原因有键合硅片本身的原因^[7-9],也与键合环境的超净程度有很大关系.如果空气中的微尘颗粒太多就会使界面在贴合之前被污染,所以一些专用的键合设备都对键合的超净环境做了处理^[10],使键合的局部环境甚至达到了 10 级.这显然提高了键合难度,限制了硅/硅直接键合技术的推广应用范围.

3.2 讨论

分析认为,与普通的亲水键合相比较,乙二醇在硅/硅直接键合中有两个特点:

(1) 对称羟基直链结构.乙二醇与水分子的区别在于其在分子结构上带有羟基,并且是两个羟基,这

就使乙二醇分子与其他结构上带有羟基的物质之间产生相当强的氢键吸引力^[5].同普通亲水键合水分子在硅片表面结构相比较^[10],在室温下经过亲水处理的硅片乙二醇中贴合后表面的氢键以及乙二醇分子的典型立体结构如图 6 所示.

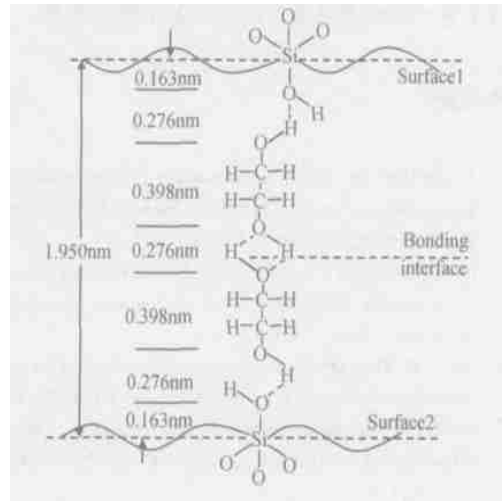


图 6 室温下硅片表面氢键键合模型示意图 ---: 氢键; —: 共价键

Fig. 6 Bonding model for hydrophilic Si wafer bonding at room temperature ---: hydrogen bond; —: covalent bond

乙二醇分子是左右对称的直链分子结构,在分子的两端各有一个羟基,且乙二醇分子可以在硅片表面做直列排列^[5].由于乙二醇分子的这种特殊性,同普通亲水键合方法相比,该方法可将具有更粗糙表面的硅片(普通亲水键合为 1.154nm,乙二醇亲水键合为 1.950nm)通过乙二醇分子键合在一起.

(2) 毛细管力作用显著.由于乙二醇在室温下相比水而言有一定的粘度,当硅片在乙二醇溶液中贴合在一起时,借助乙二醇,硅片之间较强的毛细管力会使两硅片贴合的更加紧密^[11].而且毛细管力随贴合面间距的减小而进一步增大^[12],从而有助于键合硅片在室温下更紧密地接触.

4 结论

根据硅/硅亲水键合的理论,提出借助乙二醇进行硅/硅直接键合方法,实验上也实现了在较低超净环境下的多层硅/硅直接键合,并给出了初步的理论解释,它是一种颇有吸引力的新型硅/硅键合方法.

致谢 对北京工业大学光电子实验室老师、同学及实验技术人员在研究中给予的指导和帮助表示感谢。感谢中芯国际集成电路制造有限公司谢欣云博士、复旦大学化学系李襄宏博士、北京师范大学化学系韦美菊博士、北京矿冶研究院陶淑凤研究员和北京工业大学材料科学与工程学院吉元教授在键合理论与工艺、SEM 测试等方面给予的帮助与指导。

参考文献

- [1] Huang Qing'an. Silicon micro-machine process technology. Beijing: Science Press, 1996: 229 (in Chinese) [黄庆安. 硅微机械加工技术. 北京: 科学出版社, 1996: 229]
- [2] Ayon A A, Zhang Xin, Turner K T. Characterization of silicon wafer bonding for power MEMS applications. Sensors and Actuators A, 2003, 103: 1
- [3] Gosele U, Tong Q Y, Schumacher A. Wafer bonding for microsystems technologies. Sensors and Actuators, 1999, 74: 161
- [4] Barth P W. Silicon fusion bonding for fabrication of sensors actuators and microstructures. Sensors and Actuators A, 1990, 23: 919
- [5] Zeng Zhaoqiong. Organic chemistry. Beijing: Higher Education Press, 1993: 257 (in Chinese) [曾昭琼. 有机化学. 北京: 高等教育出版社, 1993: 257]
- [6] Beijing Normal University, Huazhong Normal University, Nanjing Normal University. Inorganic chemistry. Beijing: Higher Education Press, 1989: 292 (in Chinese) [北京师范大学, 华中师范大学, 南京师范大学. 无机化学. 北京: 高等教育出版社, 1989: 292]
- [7] Han Weihua, Yu Jinzhong, Wang Qiming. Theoretical analysis on bonding energies for silicon direct bonding. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(2): 140 (in Chinese) [韩伟华, 余金中, 王启明. 直接键合硅片界面键合能的理论分析. 半导体学报, 2001, 22(2): 140]
- [8] Han Weihua, Yu Jinzhong. Criterion of gap closing for silicon wafer bondability. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(12): 1516 (in Chinese) [韩伟华, 余金中. 硅片发生室温键合所需的平整度条件. 半导体学报, 2001, 22(12): 1516]
- [9] Tong Q Y, Gosele U M. Semiconductor wafer bonding: Science and technology. John Wiley & Sons, 1999
- [10] Lyer S S, Aubertor Herve A J. Silicon wafer bonding technology for VLSI and MEMS applications. INSPEC, 1988: 4
- [11] Jerez-Hanckes C F, Qiao D, Lau S S. A study of Si wafer bonding via methanol capillarity. Materials Chemistry and Physics, 2002, 77: 751
- [12] Liaua Z L. Semiconductor wafer bonding via liquid capillarity. Appl Phys Lett, 2000, 77(5): 651

A Novel Method of Silicon Directly Bonding Technology with Glycol *

Yang Daohong, Xu Chen, and Shen Guangdi

(Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, College of Electronic Information,
Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: A novel method to make silicon wafers successfully bonded with the help of glycol is presented. Three and four layers of silicon could be bonded together successfully with glycol. The strength intension is as much as 10MPa after an intension test and no air gap is found in the bonding interface by SEM observation. This method and theory is also applicable to - compounds' bonding, such as GaAs and InP.

Key words: MEMS; SDB; glycol; bonding

PACC: 3520G; 7280

Article ID: 0253-4177(2005)02-0395-04

* Project supported by Beijing Committee of Education Funds(No. KM200310005009) and National High Technology Research and Development Program of China(No. 2002AA312070)

Yang Daohong male, was born in 1975, PhD candidate. He is engaged in the research on MEMS design and fabrication.

Xu Chen male, was born in 1958, professor. His interests include microelectronic devices and MEMS.

Shen Guangdi male, was born in 1939, professor. His interests include semiconductor optoelectronic devices.

Received 17 January 2004, revised manuscript received 7 June 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics