

低温 SDB 技术研究及硅表面吸附态的影响*

焦继伟 陆德仁 王渭源

(中国科学院上海冶金研究所 上海 200050)

(传感技术国家重点实验室 上海 200050)

摘要 研究了低温(500℃以下)硅—硅直接键合(SDB)技术,在低至120℃条件下获得了优良的键合结果,其键合强度可达到10MPa以上。结合现有SIMS和TDS测试结果,研究了硅表面吸附态对SDB的影响,并对低温SDB的可能机制进行了讨论。

PACC: 6845, 8265, 3520G, 8190

1 引言

硅固相键合技术在SOI结构、硅功率器件、硅传感器和硅微机械加工等研究领域中日益得到重视和广泛应用。至今,硅固相键合技术按其键合温度可分为两类。研究得较多的一类,是在较高温度范围,一般高于800℃,将两单晶硅片(表面可有热生长SiO₂层)牢固键合起来,键合强度可达12MPa以上^[1-3],这也被称为硅—硅直接键合技术(Silicon Direct Bonding,简称SDB)。另一类则是在较低温度完成键合过程,但键合的硅片对之间包含有中间层,如低熔点的硼硅玻璃等,也能达到一定的键合强度,满足特定工艺需要,并因其低键合温度而与硅半导体器件常规工艺兼容^[4]。B. Muller^[5]等研究了低温SDB技术,得到了较好的结果。

关于硅固相键合,尤其是无中间层的键合机制,至今还未建立一个令人信服的、能得到实验确切支持的机制。比较可以接受的是所谓的二步进行机制^[6],即在较低温度下,由于硅表面吸附的OH基团或水分子之间的氢键作用而将两硅片拉在一起,这有时又称为预键合,此为第一步,但经过这一步处理的硅片对仍可用机械或其它方法使之完整分开^[7];第二步则是在较高温度,一般认为在800℃以上,经一段时间后发生化学反应而形成牢固的Si—O键(Si—O键的键能为190.9kcal/mol),而达到键合的目的。

本工作在于发展了一种在低至120℃的低温SDB技术^[8],显然在此条件下键合界面发生的反应过程与所谓的二步机制是不相同的,因此有必要对低温SDB的界面反应机制进行深入的研究。结合SIMS和硅片表面吸附态的TDS结果,本文对硅—硅直接键合的可能机制进行了探讨。

2 实验结果

Φ50mm, P或N型(100)硅片经标准RCA工艺清洗,将硅片分为三组。第一和第二

* 机械电子工业部“八五”攻关计划、中国科学院重大课题及国家自然科学基金资助项目
1993年10月28日收到初稿,1994年6月12日收到修改稿

组样品在 $\text{HF:H}_2\text{O} = 1:10$ 溶液中去除天然氧化层，而将第二组样品在热的浓 HNO_3 中进行亲合处理。第三组硅片表面先热生长 100—300nm 的氧化层，再在热的浓 HNO_3 中进行处理。所有这些样品都经去离子水冲洗、烘干，贴合成硅片对，最后，硅片对在 20—1100°C 温度范围， N_2 气氛中恒温 2 小时，其中第二组的部分硅片在键合过程中有外加电压。

键合过程结束后，将样品划成 $3 \times 3\text{mm}$ 的单元，对样品单元进行拉伸实验和破裂实验，并对断裂面进行了 SEM 观测。同时，在 CAWIECA ANALYSEUR IONIQUE SMI 300 分析仪上对不同温度下键合，以及在相同温度下有无外加电压条件下键合的样品进行了 SIMS 分析，测量键合界面以及体硅材料中 H，也即 $^{31}\text{SiH}_3^+$ 与 $^{28}\text{Si}^{++}$ 的相对离子流强度。

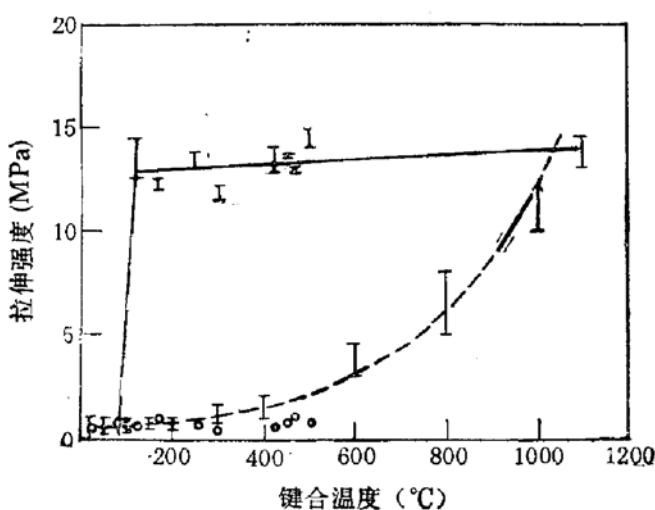


图 1 三组样品的平均拉伸强度与键合温度的关系

···· 第一组 ——— 第二组 - - - 第三组

如图 1 所示为三组样品的平均拉伸强度与键合温度的关系。可以明显看出，第一组样品未能键合成功；而对于第二和第三两组样品，都存在一阈值温度，分别在 120°C 和 800°C 附近，在各自的阈值温度以上，硅片能获得良好的键合结果，拉伸强度在 11—15MPa 之间，并与键合温度无关；而在阈值温度以下，拉伸强度急剧下降，一般在 2MPa 左右。

对第二和第三组样品进行的拉伸实验和破裂实验结果表明键合成品率分别在 80% 和 60% 以上，达到了实际应用的要求。图 2（见图版 I）为第二组样品经拉伸实验后的断裂面的典型 SEM 照片（键合温度为 300°C），从中可明显看出断裂是发生在体硅材料中，并无任何硅片原始抛光面出现。图 3（见图版 I）为第二组样品经破裂实验后截面的典型 SEM 照片（键合温度为 250°C）。

T. Abe 等^[9]对键合界面附近及硅材料体内 H 含量的 SIMS 分析结果表明，在不同键合温度下 H 含量的分布存在显著差异。当键合温度为 800°C 时，界面附近 H 的含量为 $5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ，体内则为 $4 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ ，而当键合温度为 1000°C 时，界面附近 H 的含量与体内相同。我们对第二组样品的测试结果如表 1 所示，结果表明：在键合界面附近 H 的相对含量的确高于硅体内；当有外加电压时，键合界面 H 的相对含量低于无外加电压情

形; 并随着键合温度的升高, 此差异越发显著。总之, H 在键合界面富集, 并随着键合温度的提高和电压的施加而趋于减少。

表 1 键合样品 SIMS 分析结果

样 品 号	中 心	边 缘	比 率
1#	0.167	0.113	1.48
2#	0.178	0.129	1.37
3#	0.158	0.119	1.32

1# (120°C, 2h, N₂, 未加电)

2# (120°C, 2h, N₂, 加电 $V_{bias} = 5V$)

3# (300°C, 2h, N₂, 加电 $V_{bias} = 5V$)

N. Yabumoto 等^[10]关于硅片表面吸附态的 TDS (热解吸谱, Thermal Desorption Spectroscopy) 及 SIMS 分析结果显示出经不同化学处理后的硅表面吸附态有明显区别。对应于本工作中三组样品, 第一组硅片经 HF 溶液处理而无自然氧化层, 表面的众多悬挂键为 H 所占据; 第二组, 在有自然氧化层的硅片表面, H₂O 吸附在氧化小岛上, 而 H 和 OH 基团则占据表面悬挂键; 第三组样品, 热生长氧化层表面只有吸附的 H₂O。

3 讨论和结论

由 SIMS 和 TDS 分析结果以及硅键合结果, 我们可以看出: 1. H 的吸附特性和运动特性与键合密切相关; 2. 表面吸附性质对 SDB 有重要影响, 只要硅片表面具有特定的、合适的吸附状态, 即使在低至 120°C 的温度条件下, SDB 所需的反应已经可以发生, 并不需要 800°C 以上的高温。

基于对硅表面吸附性质与键合结果之间相关性的分析, 我们提出了一种新的键合机制以解释低温条件下的 SDB 实验现象。我们认为, 硅片表面同时吸附足够数量的 Si—OH (或 H₂O 分子) 和 Si—H 是低温 SDB 获得成功的必要因素。其中 Si—OH 或 H₂O 分子之间能形成氢键, 而与 Si—O 键和 O—H 键相比, Si—H 键是最弱和最容易断裂的^[11]。因此, 硅片表面吸附的 Si—OH 和 H₂O 分子之间的较强的氢键作用, 可以克服硅片表面的微小不平整而将硅片拉到一相当近的距离内形成紧密接触, 只有在此相当近的距离内, 才可能在较低温度(低于 500°C)发生 Si—H 键的断裂而形成 Si—Si 键, 最终达到键合目的, 这正是在第二组样品中发生的情形。而在第一组中, 即使已吸附有较多的 Si—H, 而缺乏 Si—OH 或 H₂O 分子, 不能实现键合; 相似的, 在第三组中, 氧化层上吸附有大量的 H₂O, 而缺少易于断裂的 Si—H, 同样也无法实现低温的键合。当然, 在较高温度, 它们可按前述的二步机制实现键合(对此我们曾在第三组样品中得到 60% 以上的键合成品率)。

4 结语

实验结果表明, 在低温下进行硅—硅直接键合是可行的, 其键合强度达 10 MPa 以上,

与高温键合无明显区别。同时，我们研究了经不同预处理后硅表面的不同吸附性质对硅—硅直接键合，尤其是低温 SDB 的影响，并提出了一个新的键合二步机制来解释这一低温 SDB 现象。

参 考 文 献

- [1] P.W. Barth, *et al.*, Sensors and Actuators, 1990, **A21—23**: 919—926.
- [2] M. Shimbo, *et al.*, J.Appl. Phys., 1986, **60**(8):2987.
- [3] D. Lu, *et al.*, Materials Letters, 1986, **4**(11, 12):463—466.
- [4] L.A. Field, *et al.*, Sensors and Actuators, 1990, **A21—23**: 935—938.
- [5] B. Muller, *et al.*, J.Micromech. Microeng., 1991, **1**(3): 161—164.
- [6] C. Harendt, *et al.*, Sensors and Actuators, 1990, **A21—23**:927—930.
- [7] Q. Tong, *et al.*, J.J. Appl. Phys., 1993, **31**(11): 3483—3488.
- [8] J.Jiao, *et al.*, Proc. 2nd Intl. Symp. on Semiconductor Wafer Bonding Science Tech. & Appl., Honolulu, Hawaii, May 1993, 16—21.
- [9] T. Abe, *et al.*, J.J. Appl. Phys., 1991, **29**(12): L2315—L2318.
- [10] N. Yabumoto, *et al.*, J.J. Appl. Phys., 1990, **29**(3): pp. L490—L493.
- [11] A.G. Revesz, J. Non-Cryst. Solids, 1973, **11**: 122—130.

Study on Low Temperature SDB Influence of Surface Adsorbed States

Jiao Jiwei, Lu Deren and Wang Weiyuan

(Shanghai Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050;
State Key Laboratories of Transducer Technology, The Chinese Academy
of Sciences, Shanghai 200050)

Abstract The SDB technology at temperature low to 120°C has been developed. Tensile strength measurements, crude dicing tests and SEM observations have been undertaken to evaluate the bonding quality. The tensile strength is higher than 11MPa up to 15MPa. Based on the results of SIMS and TDS, a possible mechanism has been put forward to explain the phenomenon of low temperature SDB. Silicon surface wateradsorbed states which include Si—OH(and/or H₂O) and Si—H groups have important influence on the low temperature SDB.

PACC: 6845, 8265, 3520G, 8190