

硅直接键合工艺对晶片平整度的要求

付兴华 黄庆安 陈军宁 童勤义

(东南大学微电子中心 南京 210018)

摘要 本文用弹性力学近似,给出了键合工艺对硅片表面平整度的定量要求以及沾污粒子与孔洞大小之间的关系,并用X射线双晶衍射技术和红外透射图象对键合硅片进行了实验研究。

关键词 键合工艺,硅材料,平整度,双晶衍射技术

1 引言

硅直接键合工艺自1986年Lasky^[1]报道以来,日益受到重视。该工艺为微电子学的发展提供了一种灵活的加工手段,已在电力电子^[2]、传感器^[3,4]和SOI材料^[5,6]等方面得到应用。键合工艺最为关键的问题就是要消除两键合硅片界面的孔洞。目前认为孔洞的形成有三个原因^[7]:(1)硅片表面不平整,(2)外来粒子沾污,(3)陷入的气体。通过横向间隙扩散或键合工艺在O₂中完成,可以消除陷入气体引起的孔洞^[8]。因此,键合工艺本质上就与硅片平整度和键合环境有关。本文利用弹性力学近似,分析了键合工艺对硅片平整度的定量要求和沾污粒子在键合工艺中的作用。结合X射线双晶衍射技术和红外透射图象对键合硅片进行了实验研究。

2 键合形变模型

2.1 硅片键合过程中的能量守恒

商用硅片表面总有一定起伏,我们用高精度台阶仪沿硅片表面径向方向测量了一些抛光硅片的起伏情况。图1(a)和1(b)分别给出了一片典型抛光硅片和一片热氧化硅片表面起伏数值。由图可见表面起伏达数千埃范围,也存在起伏为数十埃的微观粗糙区。两硅片相互贴合后,可进行键合。目前的键合机理一般认为^[7]:温度低于300℃时,硅片表面吸附OH团之间的氢键或范德瓦尔斯力起主要作用;在300~800℃之间,新的化学键

1992-12-28收到,1993-04-12定稿

付兴华 男,1951年生,副教授,主要研究方向为器件模拟分析,SOI/SDB技术在超高频模拟电路中的应用等。现在通信地址:贵阳市贵州大学物理系,邮政编码550025。

黄庆安 男,1963年生,副教授,目前主要研究微机械加工和真空微电子学。

陈军宁 男,1953年生,副教授,主要研究SOI器件。现在通信地址:合肥市合肥工业大学应用物理系,邮政编码:230009。

童勤义 男,1939年生,教授,博士生导师,目前从事ASIC设计,微机电系统,VLSI等研究工作。

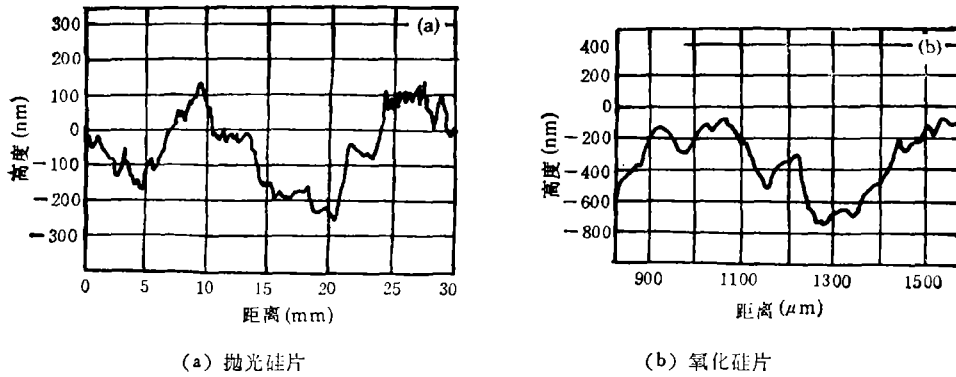


图1 硅片表面起伏状况

Si-O-Si 形成;在高于 800°C 时, 伴随着塑性形变、固态扩散和粘滞流动。由于硅片表面有起伏或微观粗糙度的存在, 键合过程伴随有两硅片表面相互匹配而引起的弹性变形, 其过程示于图 2。实验结果指出, 弹性变形在低于 300°C 下就基本完成^[5,7]。因此, 硅片表面起伏对键合过程的影响可以用低于 300°C 的情况描述。同时, 因为低于 300°C 时, 硅片由范德瓦耳斯力相吸引, 弹性变形过程只是一种物理过程, 并没有发生化学反应(化学反应伴随有吸热或放热过程)。所以, 如果设 p 表示单位硅表面面积上所受到的吸引力, ε 为界面能, 由于键合的匹配过程引起硅片表面位移为 h , 则根据能量守恒定律, 吸引力 p 所做的功等于界面能的增加。鉴于 p 与两硅片之间的距离有着复杂的函数关系, 因此, 作为一级近似, 就有

$$ph \approx \varepsilon. \quad (1)$$

在低于 300°C 时, 实验测出的界面能约为^[7] $(100 \sim 150) \times 10^{-3} \text{J/m}^2$ 。下述的计算均取 $\varepsilon = 100 \times 10^{-3} \text{J/m}^2 = 0.1 \text{J/m}^2$ 。

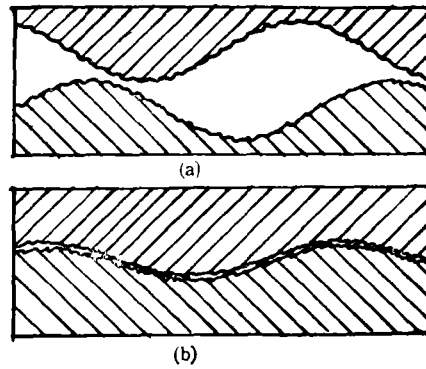
2.2 表面不平整引入的应力

如图 2 所示, 抛光硅片表面起伏可用正弦波形象描述(当然每次起伏的幅度和周期不同)。如果考虑最大形变, 并假定硅片凸起顶部用球面近似, 由于形变, 引起位移 h (如图 3), 则根据弹性力学得知, 接触顶部所受的应力为^[9]

$$\sigma = \frac{4Eh}{\pi(1-\nu)^2((a/2)^2+h^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

式中 $E = 1.66 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ 是硅的杨氏模量, $\nu = 0.23$ 是硅的泊松比。

同理, 对表面凹部用球面描述, 若形变为 h , 就可键合完好; 若高度高于 h , 则有可能形成孔洞。形成孔洞的尺寸显然与凹部的长度和高度有关, 下面将给出判据。



(a) 键合前 (b) 键合后
图2 键合匹配过程

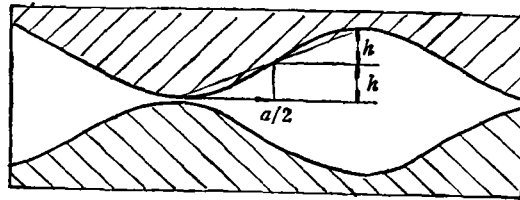


图3 计算应力时简化的表面拓扑

2.3 表面不平整引入的孔洞

如图4所示,设单个硅片的厚度为 H ,表面起伏高度为 $2h$,凹部为一圆形区域且半径为 a ,由于引力 P 作用使硅片表面位移 w 。

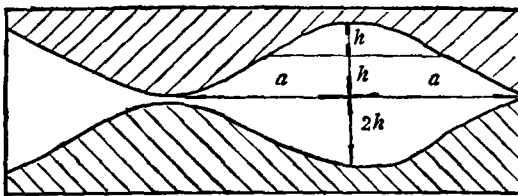


图4 计算表面形成孔洞时的简化拓扑的位移^[10]

$$w = pa^4/(64D), \quad (3)$$

式中 $D = EH^3/[12(1 - \nu^2)]$ 称为弯曲刚度。若凹部中心点处能键合上,就不会形成孔洞,所以

$$h = pa^4/(64D). \quad (4)$$

结合(1)式,上式可写为

$$h^2/a^4 = \varepsilon/(64D). \quad (5)$$

因键合能为固定值,故(5)式就是键合过程不形成孔洞的阈值条件,即表面起伏高度和宽度满足的方程。一般情况,不形成孔洞的判据为

$$h^2/a^4 \leq \varepsilon/(64D). \quad (6)$$

上述情况下,弹性变形引入的应力为

$$\sigma_r = \sigma_\theta = 3(1 + \nu)\varepsilon a^2/(8H^2h), \quad (7)$$

式中 σ_r 和 σ_θ 分别是径向应力和切向应力。

判据2 若假定键合过程中,接触点键合不牢固,凹部的弹性变形引起了键合接触点的横向位移,这样则满足弹性力学接触点简支的边界条件。类似于判据1的推导,可得到不形成孔洞的判据为

$$h^2/a^4 \leq [(5 + \nu)/(1 + \nu)]\varepsilon/(64D). \quad (8)$$

这种情况下,弹性变形引入的应力为

$$\sigma_r = -\sigma_\theta = 3(3 + \nu)\varepsilon a^2/(8H^2h). \quad (9)$$

由于键合过程是一种复杂过程,接触点处可能位移,但不是自由位移,所以,周边固定或周边简支的边界条件是两种极端情况。又因 $\nu = 0.23$,故(6)和(8)式有相同量级。考虑到周边固定对硅片平整度要求更严格,所以下面以判据1作为不形成孔洞时表面起伏

高度和宽度所满足的条件。

例 1 实验中测出 $a/2 = 0.25\text{mm}$, $h = 10\text{nm}$, $H = 350\mu\text{m}$, 无孔洞。

按(2)式算出的应力 $\sigma \approx 8.5 \times 10^6\text{N/m}^2$ 。按(7)式算出的应力 $\sigma \approx 3.8 \times 10^5\text{N/m}^2$ 。按(9)式算出的应力 $\sigma \approx 1 \times 10^6\text{N/m}^2$ 。 $\epsilon/(64D) \approx 2.6 \times 10^{-7}\text{cm}^{-2}$, 而 $h^2/a^4 \approx 1.6 \times 10^{-7}\text{cm}^{-2}$, 这满足判据 1, 将不形成孔洞。

虽然(2)式是按最大应力估计得出的, 但三种情况估计出的应力仍然很接近。

2.4 沾污粒子的影响

下面考虑硅片表面沾污粒子对键合的影响。如图 5 所示, 设沾污粒子是直径为 r 的刚性球。由于两硅片表面的引力 p 的作用, 引起沾污粒子附近硅片的弹性变形, 远离沾污粒子的硅片可以键合上。由于沾污粒子不会与硅片形成键合, 满足弹性力学中心点简支的边界条件。根据弹性力学知识, 离刚性球 R 处, 硅片纵向位移为^[10]

$$w = pR^4/(64D). \quad (10)$$

利用(1)式, 上式可写为

$$w^2 = \epsilon R^4/(64D). \quad (11)$$

在距离粒子 a 处, 硅片已能键合上, 又因粒子是刚性, 则有

$$w^2 = (r/2)^2 = \epsilon a^4/(64D) \quad (12)$$

或

$$a^2 = 4r\sqrt{D/\epsilon}. \quad (13)$$

因为在 $R < a$ 的范围内, 硅片未键合上, 也就是孔洞的半径为 a 。故(13)式表述了沾污粒子大小与引起孔洞大小之间的关系。

例 2 $r = 1\mu\text{m}$, $H = 350\mu\text{m}$, 测量出的孔洞直径约为 3mm 。

由(13)式知 $a = 2.1\text{mm}$, 即直径为 $1\mu\text{m}$ 的粒子引起键合孔洞的直径为 4.2mm 。可见沾污粒子对键合的影响是何等严重!

因温度升高, 硅材料的弹性增加, 所以理论计算略高于实测的孔洞大小。

推论 硅片越薄, 键合孔洞越易消除。

从(6), (8)和(13)式可知, 硅片变薄(即 H 越小), 对硅片表面的平整度要求降低, 键合易于进行, 沾污粒子引起的孔洞变小。其物理本质就是较薄的硅片弹性变形容易发生。我们进行的大量硅片键合实验已证实了上述推论。

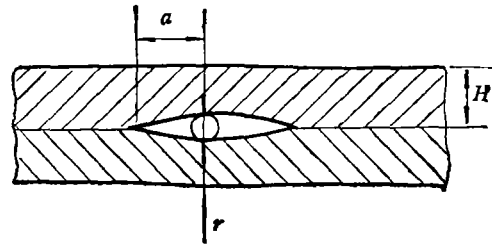


图 5 沾污粒子对键合的影响示意图

3 键合测试和讨论

3.1 键合工艺

键合工艺中所用的是商用抛光硅片(901厂提供)和热氧化硅片。首先两硅片经标准 IC 工艺清洗后, 用含 OH^- 的溶液浸泡。室温重合, 高温(1100°C)键合。由于长时间的

高温键合,键合强度趋于饱和,所以高温键合时间控制在 1.5~2h。

3.2 孔洞检测

用红外透射系统对键合硅片的界面孔洞进行检测。对一批片子键合情况的观察表明,有的键合片存在 3—4mm 的孔洞。为深入了解未键合区域或孔洞起因。用化学腐蚀先将一个硅片完全腐蚀掉,进行显微检查,空隙内部的沾污颗粒是显而易见的。图中的孔洞是由直径约 1 μ m 的颗粒引起的。孔洞的直径约为 3mm,这与(13)式的估计相吻合。

大量的实验表明,对于我国的商用抛光硅片或氧化硅片均满足判据 1。只要抛光硅片表面没有划痕和麻点,键合界面就不会形成孔洞,满足键合工艺的要求。我们深信,抛光硅片(或氧化硅片)键合的孔洞均是由于硅片表面沾污粒子所引起的。

3.3 应变检测

用 X 射线双晶衍射技术测量键合硅片表面的局部应变,实验中沿硅片径向测试,表 1 给出了测出的 X 射线摆动角和对应的应变 ε_m 。应力与应变的关系近似为

$$\sigma = \varepsilon_m E / (2\nu). \quad (14)$$

显而易见,键合引起的应变沿表面方向不均匀,呈压缩、膨胀或原始状态。这是由于键合硅片表面起伏在键合过程中匹配引起的。虽然目前还不能将表面微观起伏数据与测出的应变一一对应起来,但就我国抛光硅片和氧化硅片的键合实验表明,应力最大不超过 $7 \times 10^7 \text{N/m}^2$ 量级。计算表明^[11],硅中应力达 $1 \times 10^8 \text{N/m}^2$ 时,才开始对器件性能产生影响。因此,我国商用抛光硅片(或氧化硅片)的键合工艺不会对硅材料提出新的要求。

表 1 X 射线双晶衍射测试结果

摆角 $\Delta\phi(\rho)(^\circ)$	0	+41	0	+22	-8	-36	0	-18	+56
$\varepsilon_m (\times 10^{-3})$	0	1.6	0	0.88	0.32	1.4	0	0.72	2.2
状 态	平	凹	平	凹	凸	凸	平	凸	凹

硅片表面平整度对键合的影响体现在两方面:可能引入应力和孔洞。对商用抛光硅片而言,规范化的键合工艺不会引起孔洞;键合引入的应力不会对器件产生附加影响。

由于沾污粒子对硅片键合有严重影响,所以局部超净环境对键合工艺是必需的。

4 结 论

根据弹性力学理论,给出了键合工艺对硅片平整度的定量要求和沾污粒子在键合工艺中的作用。虽然比较近似,但还是从经验上升为定量的标准。对键合工艺有指导意义。

致谢 对中科院上海冶金所为本工作进行的 X 射线双晶衍射测试表示感谢,并对东南大学土木工程系陈忠范博士的有益讨论和微电子中心张会珍老师在键合工艺方面的帮助致谢。

参 考 文 献

- [1] Lasky J B. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 48(1): 78—80.
- [2] Nakagawa N, *et al.* 1800V bipolar-mode MOSFETs: a first application of SDB technique to a power device. *Proc. IEDM. CA, USA*: 1986, 122—125.
- [3] Barth P W. *Sensors and Actuators*, 1990, A23(1): 919—926.
- [4] Lu S J. *Sensors and Actuators*, 1990, A23(1): 916—963.
- [5] Maszara W P. *J. Electrochem. Soc.*, 1991, 138(1): 341—347.
- [6] Tong Q Y, *et al.* *IEEE Electron Device Lett.*, 1991, 12(3): 101—103.
- [7] Maszara W P, *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1988, 64(10): 4943—4950.
- [8] Tong Q Y, *et al.* *Electron Lett.*, 1991, 27(3): 288—289.
- [9] 吴家龙. 弹性力学. 上海: 同济大学出版社, 1987, 317—325.
- [10] 徐芝伦. 弹性力学教程. 北京: 高等教育出版社, 1980, 288—294.
- [11] 黄庆安, 等. 电子科学学刊, 1992, 14(6): 574—578.

REQUIREMENT OF SILICON FLATNESS FOR SILICON DIRECT BONDING TECHNOLOGY

Fu Xinghua Huang Qingan Chen Junning Tong Qinyi
(*Microelectronic Center, Southeast University, Nanjing 210018*)

Abstract The influence of silicon slice flatness on bonding technology and the relation between foreign particle and resulting bubble are quantitatively presented by the elastic theory. It is demonstrated experimentally by X ray double crystal diffractometry and infrared transmission imager.

Key words Bonding technology, Silicon material, Flatness, Double crystal diffractometry