

# 硅片发生室温键合所需的平整度条件\*

韩伟华 余金中

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083)

**摘要:** 根据薄板弹性力学, 推导了室温键合过程中硅片接触表面缝隙封闭的临界条件. 硅片的表面起伏幅度、起伏的空间波长、表面张力、材料弹性和硅片厚度都是影响接触表面缝隙封闭的重要因素. 越薄的硅片越容易室温键合.

**关键词:** 室温键合界面缝隙; 粗糙度; 薄板弹性形变

**EEACC:** 2520C; 2530B

**中图分类号:** TN304.1<sup>+</sup>2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2001)12-1516-03

## 1 引言

晶片键合技术可将两个表面平整洁净的硅片不加任何粘合剂就粘合在一起. 两个接触的硅片表面必须有足够的平整度才能发生室温键合. 硅片表面越平整, 硅片相互接触的面积越大. 表面的起伏、表面吸附力和弹性形变是影响硅片发生室温键合的重要因素. 那么接触硅片表面的缝隙必需满足什么条件才能封闭呢? 许多文献已经对室温键合晶片表面形貌及其接触机理进行了研究. Maszara<sup>[1]</sup>考虑了表面形貌对接触点局域应力的影响. Tong<sup>[2]</sup>给出了室温下晶片接触界面缝隙封闭的条件. Yu<sup>[3]</sup>分析了接触表面的三维弹性应力场, 给出了发生室温键合的平整度条件. Gui<sup>[4]</sup>假设表面起伏具有高斯分布几率, 给出了估计实际接触面积和发生室温键合所需平整度条件的理论模型. 本文根据薄板弹性力学, 给出了推导接触硅片表面缝隙封闭临界条件的简单过程.

## 2 理论模型

我们可以用表面能的降低来解释室温接触硅片表面的相互吸附作用. 假设  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  分别是两个

硅片接触前的表面张力,  $\gamma_{12}$  是接触后的界面张力, 那么两个表面的张力必然比接触界面张力大, 即

$$\Gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} > 0 \quad (1)$$

所以室温的键合使得表面自由能得以降低. 硅片表面的相互接触引起表面弹性形变, 直到整个表面的形变增加与表面自由能的降低达到平衡. 表面的弹性形变不仅与表面起伏的幅度有关, 而且也与表面的起伏频率相关.

硅片的表面形貌可以由周期性的傅里叶级数表示, 为了简单起见我们将表面形貌近似为正弦函数  $h(x) = h_0 \sin \omega x$ , 其中  $h_0$  是初始起伏幅度,  $\omega$  是表面空间波动频率. 空间波动频率可表示为  $\omega = 2\pi/\lambda$ , 其中  $\lambda$  是表面波动的典型空间波长(如图 1 所示). 因此两个接触硅片的表面形变形成的弹性应力场应与  $h/\lambda$  相关. 如果表面波动的空间波长远小于硅片的厚度, 垂直于界面方向的形变范围可以认为在一个表面波动的空间周期大小内, 于是每个周期单元体

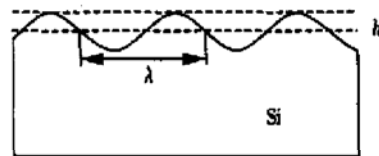


图 1 硅片表面形貌的正弦线形近似示意图  
FIG. 1 Diagram of Ideal Sinuous Silicon Surface

\* 国家自然科学基金(批准号: 69990540 及 69896260-06), 科技部 973(合同号: G20000366) 资助项目.

韩伟华 男, 1973 年出生, 博士生, 研究方向为硅基键合材料.

2000-12-15 收到, 2001-04-04

积的弹性能可表示为

$$U \propto E^* (h/\lambda)^2 \lambda^3 \quad (2)$$

其中  $E^* = \frac{E}{1-\nu^2}$  是弹性模量, 硅片的杨氏模量  $E = 1.66 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ , 泊松比  $\nu = 0.29$ . 每个周期单元的表面能的降低为  $\Gamma \lambda^2$ . 这样对于每个周期单元, 如果硅片表面的弹性能的增加量小于表面能的减少量, 那么两个硅片可以发生室温键合, 即  $U/\Gamma \lambda^2 < 1$ . 因为表面张力越大, 表面越平整越光滑, 硅片越容易发生室温键合. 引入一个无量纲吸附参数  $\theta$  来衡量室

温键合能力<sup>[4]</sup>, 即  $\theta$  越小两个硅片越易吸附.

$$\theta = E^* h^2 / \Gamma \lambda \quad (3)$$

可以看到, 有三个因素决定着室温键合能力, 即弹性模量  $E^*$ 、表面张力  $\Gamma$  和表面形貌. 其中表面形貌是影响室温键合的最重要的因素. 在空间波长远小于硅片厚度的条件下, 当表面起伏幅度

$$h > \sqrt{\frac{\theta \Gamma \lambda}{E^*}} \quad (4)$$

时, 硅片将不能发生室温键合.

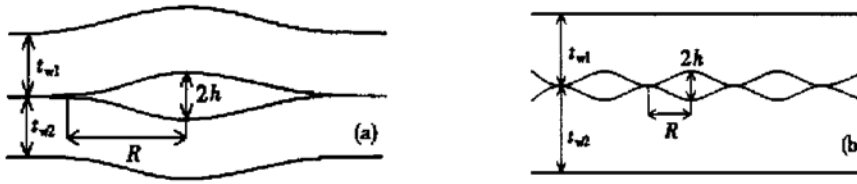


图2 硅片接触表面间隙示意图 (a)  $R > 2t_w$ , (b)  $R < 2t_w$

FIG. 2 Diagrams of Gaps at Contact Silicon Surface for (a)  $R > 2t_w$  and (b)  $R < 2t_w$

假设硅片表面起伏局部凸起的半径为  $R$  (即缝隙扩展半径, 相当于  $1/2$  空间波长) 远大于凸起高度  $h$ , 那么界面缝隙封闭的条件依赖于  $R$  与硅片厚度  $t_w$  的比率, 如图2所示. 设封闭缝隙所需的弹性形变力为  $F$ , 则在凹陷区的应力为

$$\sigma = F/\pi(R/2)^2 \quad (5)$$

在每个硅片上产生的弹性能为

$$U = Fh/2 \quad (6)$$

根据薄板弹性形变理论,

$$\sigma(R) = 64Dh/R^4 \quad (7)$$

其中  $D = E^* t_w^3/12$ , 于是缝隙封闭产生的弹性能为

$$U(R) = \frac{8\pi E^* t_w^3 h^2}{12R^2} \quad (8)$$

缝隙封闭过程中, 降低的表面能为

$$\Gamma = \gamma\pi R^2 \quad (9)$$

那么当室温键合过程中硅片表面的弹性能的增加量与表面能的减少量达到平衡时, 总自由能最小, 即

$$\frac{\partial E}{\partial R} = \frac{\partial U}{\partial R} + \frac{\partial \Gamma}{\partial R} = 0 \quad (10)$$

从(10)式解得缝隙扩展半径的最大值

$$R_0 = \left[ \frac{2}{3} E^* \frac{t_w^3}{\gamma} \right]^{1/4} h^{1/2} \quad (11)$$

因此, 当  $R > 2t_w$  时, 界面缝隙的封闭依赖于硅片的厚度  $t_w$ , 表面起伏局部凸起的高度满足

$$h < R^2 \sqrt{\frac{2}{3} \times \frac{E^* t_w^3}{\gamma_{12}}} \quad (12)$$

界面缝隙才能封闭. 当  $R = 2t_w$  时, 由(11)式有

$$h = 3.57(R\gamma_{12}/E^*)^{1/2} \quad (13)$$

比较(4)式, 可以得到吸附参数  $\theta = 3.57$ . 当  $R < 2t_w$  时, 界面缝隙的封闭不依赖于硅片的厚度  $t_w$ , 缝隙封闭要求凸起的高度满足

$$h < 3.57(R\gamma_{12}/E^*)^{1/2} \quad (14)$$

如果两个室温键合的硅片具有不同的厚度  $t_{w1}$  和  $t_{w2}$ , 它们将具有不同的杨氏模量  $E_1$  和  $E_2$ . 若  $R$  足够大, (12)式应变为

$$h < R^2 \sqrt{\frac{4}{3} \times \frac{E_1^* t_{w1}^3 E_2^* t_{w2}^3}{\gamma_{12}(E_1^* t_{w1}^3 + E_2^* t_{w2}^3)}} \quad (15)$$

而  $R$  足够小时, 则(14)式变为

$$h < 3.57(R\gamma_{12}/2)^{1/2} \left[ \frac{1}{E_1^*} + \frac{1}{E_2^*} \right]^{1/2} \quad (16)$$

临界点  $R_0$  近似为

$$R_0 \cong 2 \left[ \frac{E_1^* + E_2^*}{E_1^* t_{w1}^3 + E_2^* t_{w2}^3} \right]^{1/3} t_{w1} t_{w2} \quad (17)$$

界面缝隙的封闭主要是由较薄的硅片所决定的. 图3给出了不同厚度的硅片界面缝隙封闭所需要满足的表面形貌临界条件, 即表面凸起高度在临界曲线以下的缝隙都可封闭, 其中硅片的杨氏模量  $E = 1.66 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ , 泊松比  $\nu = 0.29$ , 室温键合界

面能取  $\gamma_{12} = 100 \text{ mJ/m}^2$ . 我们可以看到室温键合硅片厚度越薄, 对表面的平整度要求就越低, 硅片也就越容易发生室温键合, 这已经被 Maszara 的实验所证实<sup>[5]</sup>.

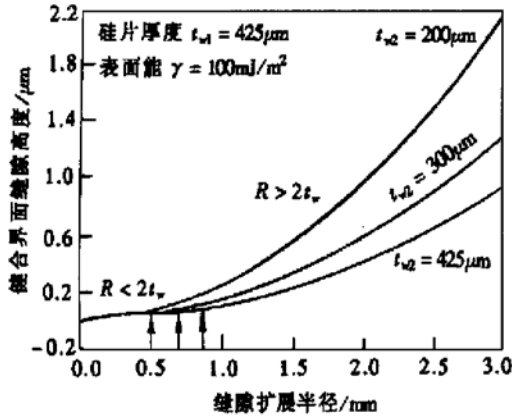


图3 硅片接触表面缝隙高度的临界曲线

FIG. 3 Curves for Critical Height of Gap at Contact Surfaces

上述模型也适用于分析室温键合表面沾污粒子所产生的缝隙. 对于厚度都为  $425 \mu\text{m}$  的两个硅片, 如果表面沾污粒子的直径为  $1 \mu\text{m}$ , 那么产生的缝隙直径约为  $4.4 \text{ mm}$ . 室温键合硅片表面沾污的微小颗

粒产生的缝隙直径是其  $10^4$  倍. 这样, 沾污粒子周围较大范围的硅片表面就难以接触, 所以硅片表面具有良好的平整度是发生室温键合所需的十分重要的条件.

### 3 结论

本文利用薄板弹性理论推导了室温键合界面缝隙封闭的临界条件. 当缝隙的扩展半径较小时, 缝隙临界高度较小, 并且与硅片厚度无关. 当缝隙扩展半径较大时, 缝隙的临界高度与硅片厚度相关, 硅片厚度越薄, 缝隙临界高度就越大, 硅片也就越容易室温键合.

### 参考文献

- [ 1 ] W. P. Maszara, B-L. Jiang and A. Yamada, J. Appl. Phys., 1991, **69**: 257.
- [ 2 ] Q. -Y. Tong and U. Gösele, Materials Chemistry and Physics, 1994, **37**: 101.
- [ 3 ] H. H. Yu and Z. Suo, J. Mech. Phys. Solids, 1998, **46**: 829.
- [ 4 ] C. Gui, M. Elwenspoek, N. Tas and J. G. E. Gardeniers, J. Appl. Phys., 1999, **85**: 7448.
- [ 5 ] W. P. Maszara, G. Goetz, A. Caviglia *et al.*, J. Appl. Phys., 1988, **64**(10): 4943.

## Criterion of Gap Closing for Silicon Wafer Bondability\*

HAN Wei-hua and YU Jin-zhong

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,  
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A criterion of the gap closing between contact surfaces is studied according to elastic mechanics of thin plate. The important factors influencing the gaps closing include the gap height, the spatial wavelength, the specific surface energy of adhesion, the material deformability and the silicon wafer thickness. It is easier for the thin silicon wafers bonding than for the thick one.

**Key words:** gaps between contact surfaces, roughness, the elastic deformation of thin plate

**EEACC:** 2520C; 2530B

**Article ID:** 0253-4177(2001)12-1516-03

\* Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant Nos. 69990540 and 69896260-06, and by Project 973 of Ministry of Science and Technology Under Grant No. 20000366.

HAN Wei-hua male, was born in 1973, PhD candidate. He is engaged in the research on bonding materials on Si substrate.

Received 15 December 2000, revised manuscript received 4 April 2001

©2001 The Chinese Institute of Electronics