

前 言

众所周知,集成电路的迅速发展促使了计算机的改朝换代。利用不断更新的计算机,人们处理信息的能力大大增强。然而,作为获取和转换信息一种工具的传感器,它的发展则显得有些缓慢,出现了“信息处理能力过剩,信息获取能力不足”的不正常现象,这主要与传感器的材料及生产工艺落后有关。

SOI (Silicon on Insulator) 材料是制备传感器的一种重要的新材料,它的制备方法很多,最早人们是在蓝宝石衬底上生长一层硅(简称SOS),然后在硅膜上制作器件,用蓝宝石作为绝缘材料。对SOS的研究一直持续了二十多年,尽管硅膜的特性有了很大改善,然而与体硅相比,它的性能却相差甚远。接着人们又采用了氧离子注入方法,但这种方法受注入机束流的限制,其不足之处是注入时间较长,获得的SOI材料缺陷多,界面态高。此外还有一些其他方法,但效果也不理想。然而,采用一种称之为硅—硅键合的技术则完全可以克服以上缺点,从而得到高质量的SOI结构,其硅膜具有与体硅相同的性能,并且膜厚可以精确控制,缺陷少,界面态低,工艺简单,性能/价格比要比其他SOI技术高。

硅—硅键合技术不仅可用于制备SOI结构,还可以直接用来制造传感器。以前传统的固态传感器,其敏感

元件与基座之间均采用胶粘的方法进行封接,由于胶的应力及蠕变没有规律,很难对其加以补偿,这样就导致了传感器力学特性和电学特性的不稳定。而采用硅—硅键合技术不需任何中间媒介就可以在硅膜片和基座之间实现真正的接合,没有应力和蠕变,从而也就消除了传感器力学特性和电学特性的不稳定。用此技术还可以制造高温压力传感器,这种传感器在 250°C 以上仍具有较好的精度,其线性、电压补偿的稳定性及压力灵敏度等特性都非常优良。选择适当的P型和N型硅片进行键合,可以获得高反压大功率管等。此外,常规工艺难以实现的高阻厚外延片以及要数天高温处理才能得到的深结扩散,用此技术几小时就能完成。

硅—硅键合工艺还为传感器向集成化方向发展开辟了一条新的途径。我们知道,传统的硅杯型压力传感器在制作工艺上与标准IC工艺不兼容,使得传感器与信号处理电路很难做在同一个硅芯片上。而采用一种硅盒结构并且利用键合技术,这样只需进行单面加工即可,与标准IC工艺完全兼容,所以该技术对于推动传感器的集成化具有重要的意义。

总之,由于键合技术的工艺灵活性,使它在微机械装置、特种器件及新型传感器中均有广泛的应用,正越来越受到人们的重视。本论文的工作将结合国家“八五”重点科技项目“新型谐振力敏传感器”,在键合技术这一领域展开。

第一章 综述

§1.1 键合的基本概念和种类

关于键合，到目前为止尚未发现有人下过确切的定义，不过作者认为，所谓键合，就是指通过一定手段将两种相同或不同的材料接合在一起的过程。它可能是一个物理过程，也可能是一个化学过程，后者包括前者。

键合的种类很多，比较常见的有超声键合，激光焊接，胶封，低温玻璃烧结，扩散封接，静电封接以及硅—硅键合封接等工艺。其中，静电封接与硅—硅键合封接又互相包含，因为静电封接不仅包括金属—玻璃、硅膜片—玻璃的封接，还包括硅—玻璃膜—硅的静电封接；而硅—硅键合封接又可分为加电场的和不加电场的硅—硅键合。对于硅—硅键合来说，按照其封接温度的不同又分为高温键合和低温键合，高温和低温之间没有严格的温度界限，一般认为键合温度在 700°C 以上为高温， 500°C 以下为低温，例如前面提到的硅—玻璃膜—硅的静电封接就是一种低温键合。目前研究较多也比较热门的就是硅—硅键合和静电封接，下面我就对它们的发展过程做一个简要回顾。

§1.2 键合工艺的发展概况

静电封接技术是美国人 Pomerantz 于 1968 年偶然发现的。当他把叠合在一起的玻璃片和金属薄膜加热后，在直流电场的作用下，金属膜竟能牢固地粘到玻璃上，其封接温度要比不加电场时低得多。这是一项很有希望的技术，因此他申报了专利。接着他又试图将硅与石英片进行静电封接，在温度高于 300°C 时由于本征激发而使硅的电阻率降到 $0.1\ \Omega\cdot\text{cm}$ ，然而由于石英的热膨胀系数与硅有很大差异，并且在加热的情况下石英不导电，因而他的实验未能成功。曾与他一起工作过的 Wallis 提出用淀积在硅衬底上的 SiO_2 与硅进行静电封接，然而其实验结果也未见发表。几乎是同时，Brooks, Donovan 和 Hardesty 通过在硅片上溅射一层硼硅玻璃后再同另一块硅片进行静电封接，结果实验获得成功。这是因为硼硅玻璃中含有大量的碱金属离子，在加热和电场的作用下可移动，从而使硼硅玻璃导电。在以后的二十多年中，人们对静电封接技术进行了深入的研究，逐渐弄清了它的机理，并将其广泛地应用于各个领域。

静电封接的绝缘材料包括硼硅玻璃、钠钙玻璃、石英、光学纤维及陶瓷等；所封接的金属材料和半导体材料包括铝、钛、锗、可伐合金、铁镍钴合金、砷化镓和硅等。

静电封接的工艺参数要求不太严格，温度、直流电压及时间的变化范围比较宽，因而在我国的发展也比较快。近年来国内的文献上有关它的文章也有不少，有机理方面研究的，也有关于它在某一方面具体应用的。

至于硅—硅键合，它的出现要比静电封接早几十年。当时人们在实验中曾多次发现硅片键合在一起的现象，然而仅把它当成缺点而努力加以克服，更不用说对它进行研究和发展的。直到六十年代初，日本电气公司(NEC)首次利用硅—硅键合技术将分离的晶体管集成块键合在一起，这才引起了人们的注意。到了七十年代，IBM公司的研究人员开始投入了对这一现象的研究工作，并且在1985年的国际电子器件大会(IEDM)上，他们发表了一篇创新的用硅—硅键合技术制造SOI结构的文章。几乎同时，东芝公司的研究人员也透露出他们用硅片直接键合(SDB)技术来制作功率器件的信息。

1985年10月，Nova Sensor成立，其宗旨就是要将硅—硅键合技术作为商业可行的工艺进行发展并将其用于硅的微细加工中去。

1986年，J. B. Lasky首次提出硅—硅键合的机理，在被一些实验证实以后，Lasky机理逐渐为人们所接受，它给人们的研究工作提供了提供了一定的指导作用。

在1988年的《Solid-state Sensors》和《Actuators Workshop》上，Nova Sensor开始发表用硅—硅键合工艺进行研究的工作成果，这些出版物极大地激起了人们用此工艺进行硅微细加工的兴趣。在此领域一些新的工作也已扩展到好几个研究中心，各大学和研究所以也纷纷开展了研究。此后不断有人提出新的键合方法和工艺，除了硅—硅直接键合以外，其他较为常见也较有代表性的还有热生长 SiO_2 层的硅—硅热键合，加电场的 $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}$ 热键合，低温玻璃熔焊等，在下一节中我将对几种主要键合工艺分别进行介绍。

尽管硅—硅键合在国外研究已有一段时间，然而其工艺过程仍然不很成熟。就拿硅—硅直接键合来说，关于它的最佳工艺条件很多研究单位都是众说纷纭，其实验结果也经常互相矛盾。硅—硅键合工艺在国内本来起步就晚，再加上各研究单位之间的技术保密，这就更加阻碍了它的发展，因此硅—硅键合技术在国内仍然是一个空白，这就更需要我们去研究和探索，寻求适合于我们自己的最佳工艺条件，填补这个空白。

§1.3 几种主要键合技术简介

§1.3.1 静电封接技术

1. 硅—玻璃静电封接

静电封接技术一般均采用玻璃和硅膜片进行封接，玻璃通常是 Pyrex #7740 硼硅玻璃，这种玻璃内部含有大量的钠离子。在常温下钠离子并不移动，然而当温度超过 200°C 时，在直流电场的作用下钠离子能向阴极移动，在阴极被还原成金属钠析出，而在阳极则留下一个钠离子的耗尽层，耗尽层中主要是氧离子。若将硅片置于阳极的位置，则在电场力的作用下硅或硅离子会向玻璃耗尽层中扩散，在交接面处和耗尽层内生成 SiO_2 ，从而形成一种紧密封接结构。其原理图如图 1.1 所示：

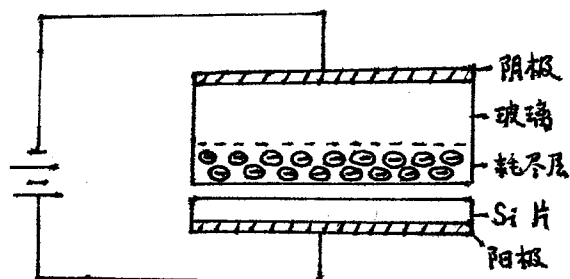


图 1.1

硅—玻璃静电封接的主要工艺过程如下：

- (1) 将硅片的抛光面与玻璃的抛光面清洗干净；
- (2) 将两抛光面互相紧密接触，完成图1.1所示的装接；
- (3) 将温度逐渐升到 $300 \sim 350^{\circ}\text{C}$ ；
- (4) 在阴极和阳极之间加上 800V 的直流高压，时间为10分钟；
- (5) 待温度降至室温后，撤去电场。

这种工艺方法的特点是，它无需玻璃的“熔化”来封接，而只需将 Na^+ 加热到可移动即可，因而其封接温度远低于 Pyrex #7740 的软化点温度 (821°C)，并且气密性好，抗拉强度大，便于工艺重复。然而由于硅片与 Pyrex #7740 在热膨胀系数上的差异 (约为 $1.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)，所以不仅会在封接面上产生应力，影响传感器的长期稳定性，而且还使封接的牢固程度随温度变化而变化。为克服这些缺点，可采用下面所介绍的热膨胀系数等价的静电封接。

<2> 硅—玻璃膜—硅静电封接

这种键合方法的原理与硅—玻璃静电封接完全一致，只是工艺过程有所不同。它不直接采用硼硅玻璃作为基座，而是用溅射的方法在硅片上生长一层几微米的硼硅玻璃膜后再与另一块硅片进行静电封接。其封接示意图所图1.2所示：

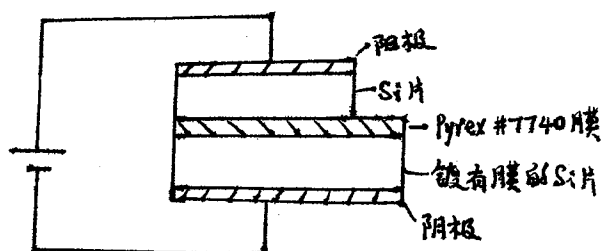


图 1.2

在这种封接方法中，键合温度和时间与前者相同，只是封接电压很低，只需50V即可。另外由于玻璃膜很薄，故封接后产生的应力很小，并且由于膜片和基座为相同的硅材料，热膨胀系数完全一致，封接后的牢固程度不随温度变化而变化，因而传感器可获得良好的线性特性。

然而这种方法也有不足之处，当静电封接的电压升到20V左右时，由于缺陷的存在，玻璃膜往往会击穿。为克服这种不足，封接前必须先将镀有玻璃膜的硅片置于650℃的蒸气中退火一小时，然后再与另一块硅片进行键合。与前者相比，这种方法增加了镀膜和退火两道工序，成本增加，周期变长。

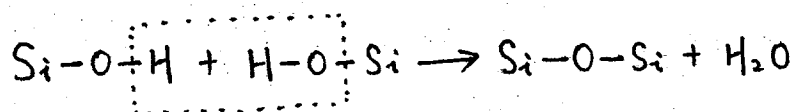
§1.3.2 高温硅—硅键合技术

低温静电封接技术由于是将传感器的芯片与硼硅

玻璃静电封接在一起，整个传感器构成了复合结构，不是硅一体化的，因而在界面热膨胀系数不匹配、温度特性差和工艺复杂等问题，所以目前人们的研究重点都放在了高温硅—硅键合上。

<1> 硅—硅直接键合(SDB)技术

SDB是指不在中间使用任何粘合剂而将两块硅片直接键合在一起。它的基本原理是，衬底硅片在经过常规清洗后，必须再经过亲水处理（例如放在浓 HNO_3 中煮沸），使要键合的硅表面吸附高浓度的 $-\text{OH}$ 基团。在室温下将已吸附 $-\text{OH}$ 基团的两块硅片的表面互相接触，则上下表面上的 $-\text{OH}$ 基团会迅速形成氢键的作用，这种作用使上下两块硅片无需加压就能接合在一起。当温度升高时， $-\text{OH}$ 基团之间发生脱水聚合反应，硅醇键转化为硅氧键，反应式如下：



当温度不断升高时，加热所产生的水蒸汽压力会在片子的一些区域形成未键合区（以下均简称为气孔）。当温度很高时，水汽中的氧转化为 SiO_2 ，氢则通过硅的晶格扩散掉，这就是所谓的Lasky原理。Lasky认为这个临界温度由导致两块硅片紧密键合的“反应密封”过程决定。

作者在实验中观察到这个温度略高于 1000°C ，并且很巧合地发现水汽的分解温度恰好也是这个温度，因此作者认为，对于SDB工艺来说，键合温度必须要高于水汽的分解温度，这样由水汽引起的气孔才会消失，从而完成良好的键合。

SDB的主要工艺过程如下：

- (1) 按照常规清洗要求依次将硅片上的有机物、金属离子及其氧化物和灰尘粒子洗掉；
- (2) 对硅片表面进行亲水处理，然后将其干燥；
- (3) 在室温下将两块硅片对准，然后进行预键合；
- (4) 在高于 1000°C 的氧化炉中退火处理。

下面举一个采用SDB技术制造硅盒结构的例子：

- (1) 在1[#]号硅片上腐蚀出空腔，如图1.3(a)所示；
- (2) 用SDB技术将2[#]号硅片键合在空腔上，如图1.3(b)所示；
- (3) 用可控腐蚀技术去掉2[#]号硅片上的大部分，只留下具有所希望厚度的硅膜，如图1.3(c)所示。

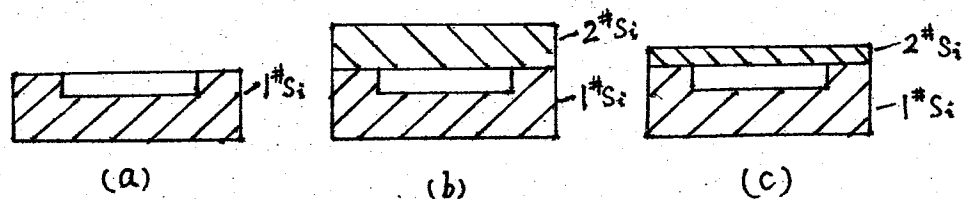


图 1.3

根据上面举的例子，我们可以看出SDB技术具有以下优点：

- (1) 没有不匹配的中间层，故几乎不引入热应力；
- (2) 可用SDB技术将精确加工的空腔进行密封；
- (3) 膜厚可通过腐蚀技术加以精确控制，能由几微米~几百微米范围内任意控制；
- (4) 与其他高温过程（例如标准IC工艺中的氧化、扩散等）完全协调，不需增加复杂装置；
- (5) 由于SDB技术可实现硅的一体化结构，因此它最适合用来制造结构型传感器，这是因为上下两块硅片均可进行双面加工。用SDB技术制造的传感器，在高温和大应力下能保持长期的稳定性，其线性和电压补偿的稳定性都比较好。据国外报道，一个采用SDB技术制作的硅谐振梁压力传感器总误差 $< 0.01\% FS$ 。

<2> 具有氧化层的硅-硅热键合

这种键合方法可用来制作SOI结构，其基本原理及主要工艺过程与SDB大致相同，只是键合前需在两块或其中的一块硅片上热生长一层 SiO_2 ，然后再进行亲水处理。之所以采用热生长 SiO_2 层的方法，是因为与LPCVD等工艺相比，它的表面粗糙度非常小，表面很均匀，平整，有利于键合。键合温度通常是 $1000 \sim 1100^\circ C$ ，时间为1小时。

作者在实验中发现,采用这种方法,当温度太高、时间太长时,在键合界面处会产生不同程度的变形,如图1.4所示:



图1.4 1100°C, 3小时处理后样品的红外照片

作者认为这是由于热膨胀系数的不同, Si 与 SiO_2 的键合界面在高温下所产生的应力所导致。因此,在实验中要选择好恰当的键合温度和键合时间。

<3> 在电场作用下的硅—硅热键合

在前面所提到的两种硅—硅键合方法中,键合前都必须经过亲水处理,而采用这种方法,则无需进行亲水处理,然而却需要在高温下施加一个电场作用,并且要求至少一块硅片的表面具有热生长的 SiO_2 层。其原理图如图1.5所示:

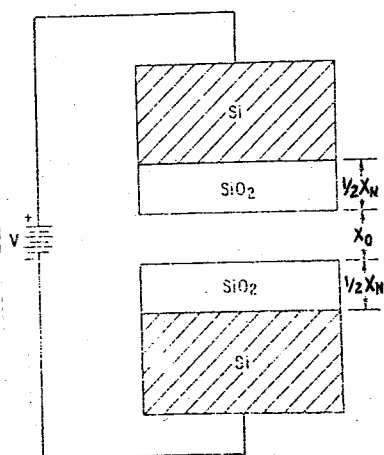


图 1.5

前面已经提到,静电键合通常需要一个可导电的玻璃层,然而实验发现,对于不导电的热生长 SiO_2 层,当其厚度小到一定程度时键合也能完成。其基本推导如下:

先考虑在电场作用下金属与玻璃之间的静电作用,设金属表面的面电荷密度为 σ_s ,金属表面电场强度为 E_s ,则静电作用力 P 为:

$$P_0 = \sigma_s E_s \quad (1-1)$$

其中, 表面电场强度 E_s 是金属内部电场强度与外部电场强度的平均值。

在金属内部, 有 $E_{\text{内}} = 0$;

在金属外部, 有 $E_{\text{外}} = \sigma_s / \epsilon_0$;

其中, ϵ_0 为空气介电常数。

$$\therefore E_s = \frac{1}{2}(E_{\text{内}} + E_{\text{外}}) = \frac{\sigma_s}{2\epsilon_0} \quad (1-2)$$

$$\text{则 } P_0 = \sigma_s E_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_s^2}{\epsilon_0} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (1-3)$$

这里, E 为金属与玻璃之间的电场强度。

再考虑图 1.5 所示的情形, 设两 SiO_2 层之间的空隙距离为 X_0 , 电场强度为 E_0 , SiO_2 层内部的场强为 E_N , 其总厚度为 X_N , 键合电压为 V , 则有:

$$V = E_N X_N + E_0 X_0 \quad (1-4)$$

在 E_N 与 E_0 之间有下面关系成立:

$$E_N = E_0 \epsilon_0 / \epsilon_N \quad (1-5)$$

将式 (1-4)、(1-5) 代入式 (1-3),
则得:

$$P = P_0 \left(\frac{\epsilon_N X_0}{\epsilon_N X_0 + \epsilon_0 X_N} \right)^2 \quad (1-6)$$

$$\text{式中, } P_0 = \epsilon_0 V^2 / 2X_0^2 \quad (1-7)$$

由式(1-6)可以看出, 键合时的静电作用力 P 随着 SiO_2 层厚度 X_N 的增加而迅速衰减。然而如果 SiO_2 层的厚度足够小, 则在 SiO_2 层所能承受而又不被击穿的电压范围内, 可以通过增加电压来克服由于 SiO_2 层的存在所导致的静电作用力的降低, 从而完成良好的键合。

实验发现, 当键合力 P 满足 $P > 0.2 P_0$ 时, 键合即能成功, 此时 SiO_2 层的总厚度不超过 $10 \mu\text{m}$ 。计算时取 $X_0 = 1 \mu\text{m}$ 。

在这种工艺方法中, 键合前通常是将两块硅片表面都生长一层 $1/2 X_N$ 厚度的 SiO_2 层, 而不是只在一块硅片上生长一层 X_N 厚度的氧化层, 后者由于氧化层中缺陷的存在, 在加电场时很可能会将 SiO_2 层击穿, 如图 1.6 (a) 所示; 而采用前者, 则会使被击穿的几率大大降低, 如图 1.6 (b) 所示:

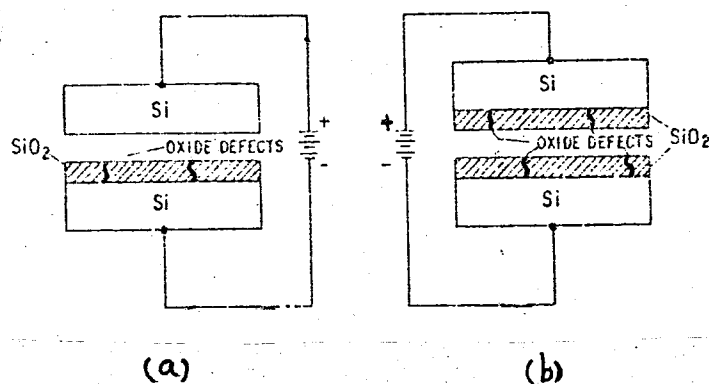


图 1.6

至于键合温度的选择,要综合考虑两个因素。首先,当温度升高时, SiO_2 层的变形增加,有利于大面积键合,并且键合时间会缩短。其次,温度升高会导致 SiO_2 层的击穿电压急剧降低,因而可施加的最大键合电压随之降低,这样就会导致键合时静电作用力的减小。另外,温度太高还会引起硅与电极之间的反应。实验证明,当温度取 $850 \sim 950^\circ\text{C}$ 时, SiO_2 层变形的增加克服了由于静电作用力降低对键合造成的不利影响,从而完成良好的键合。在高温过程中所施加的电压为 $30 \sim 50 \text{ V}$,时间为1小时。

这种键合工艺是制备SOI结构的一种较为理想的途径,它键合力强,键合面积较大,产生的应力较小,并且不需经过亲水处理。但是,这种键合方法需要在高温过程中一直施加一个电场,因而它的工艺装置比较复杂。

§1.3.3 低温玻璃熔焊技术

熔焊技术与前两类键合技术在机理上完全不同,它只是一个纯粹的物理过程。常用焊料有金、铝、锡以及各种玻璃等。考虑到用金属作为焊料来对硅片之间进行键合会对器件的电学特性造成很大影响,因而这里采用一种硼玻璃作为焊料。

采用这种键合技术,首先需要在一块硅片上热生长一层 $1\mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 层,然后再热淀积 $0.1\mu\text{m}$ 厚的硼玻

璃，在 450°C 时，它即能强有力地键合在另一块清洁的硅片或具有热生长 SiO_2 层的硅片上，键合时间只需30分钟。

热淀积 $0.1\mu\text{m}$ 厚的硼玻璃可在扩散炉中进行。将硅片与硼源之间的距离调整到适当位置，在高于 1000°C 的温度下淀积1小时左右，同时通入 N_2 、 O_2 和 H_2 等气体。淀积过程结束后，应当马上将其与另一块硅片在支架上装好，然后迅速放进氧化炉中进行键合。如果不想马上键合，则应当将镀有硼玻璃层的硅片保存在高温中。其原因，是镀有硼玻璃的硅片在空气中时间一长，其表面就会生成一种晶状物质——硼酸，它的存在会阻碍键合。另外需要注意的是，键合前两块硅片表面必须不含磷，含有磷的硅片在低温下键合不会发生。这是因为，对于 $\text{B}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 体系，在温度高于 450°C 时将存在一个液相；而对于 $\text{B}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5$ 体系，哪怕体系中有一点 P_2O_5 ，就会形成一个高熔点的 BPO_4 相，其共熔点在 900°C 左右。这个事实也为硼玻璃的“熔化”机制提供了一个证据。

这种键合工艺的特点是，键合时间短，键合力强，密封性好。它既不需高温，也不需加电场，然而它的工艺过程比较复杂，环境条件要求较高。

对于以上所介绍的几种键合工艺，读者在具体选用时要根据自己的实验条件来做决定。

§1.4 本论文选题背景及主要工作

作者所在的课题组自1990年3月起,承担了国家“八五”重点科技项目“传感器技术研究”的“新型谐振力敏传感器”专题,并已完总方案设。新型谐振力敏传感器的基本原理是,采用“E”形硅圆膜片作为一次敏感元件,将外力或压力转换成膜的应变,然后应变又传递到固定在膜片上的谐振硅梁上,使其谐振频率发生变化,由此可以测出外力或压力的大小。其结构示意图如图1.7所示:

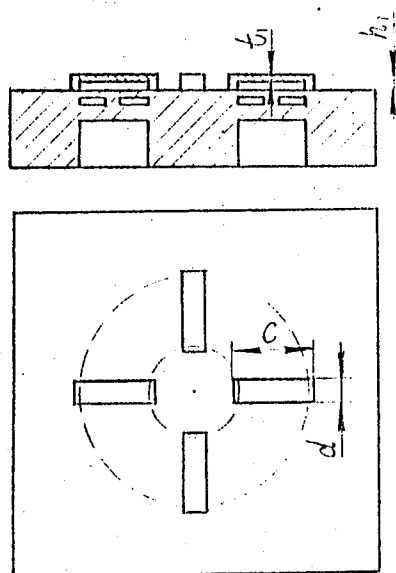


图 1.7

采用这一结构具有以下优点:

- (1) 振梁不直接受外力或压力作用,因此可以被密封在真

空腔体内,与外部介质隔离,不会受到水蒸汽、灰尘和腐蚀性气体的影响,从而振梁的稳定性和可靠性可以得到很大改善;同时由于不存在空气阻尼,振梁的品质因素也会大大提高。

(2) “E”形膜片具有应力集中的特点,灵敏度较高,对于量程为 0.1 N 的微力传感器尤其适合。

(3) “E”形膜片上存在正、负应变区域,因此可以在相应位置制作分别受正、负应变的一对振梁,构成差动输出以减小温漂。

(4) 可以对称地在“E”形膜片上制作四对振梁,这样只要其中有一对(甚至一个)振梁完好,整个传感器就能正常工作,成品率大大提高。

为制作出如图1.7所示的微机械结构,我们将采用以下工艺过程:

(1) 在(100)双面抛光N型硅片(1[#]硅片)上刻蚀出四对深度为 $5\mu\text{m}$ 的凹坑。

(2) 将(100)双面抛光N型硅片(2[#]硅片)与1[#]硅片通过高温硅—硅键合工艺焊接成一体,如图1.8(a)所示。

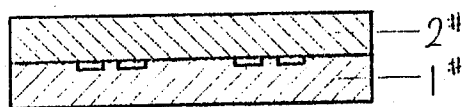


图 1.8 (a)

- (3) 采用腐蚀工艺将1[#]硅片减薄到预定厚度并抛光。
- (4) 将(100)双面抛光N型硅片(3[#]硅片)通过高温硅—硅键合工艺与1[#]硅片焊接在一起。
- (5) 将2[#]硅片腐蚀减薄至5 μm (梁厚),并抛光,如图1.8(b)所示。

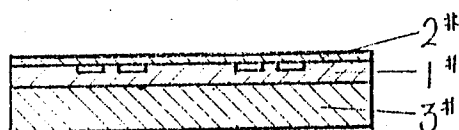


图 1.8 (b)

- (6) 在2[#]硅片上制作集成化激振、拾振和测温元件,并刻蚀出振梁。
- (7) 在(100)双面抛光N型硅片(4[#]硅片)上刻蚀出四个深度为10 μm 的回坑。
- (8) 在4[#]硅片上溅射一层2 μm 厚的低温 β 7570玻璃。
- (9) 采用低温静电封接技术在真空中将2[#]硅片与4[#]硅片键合在一起,如图1.8(c)所示。

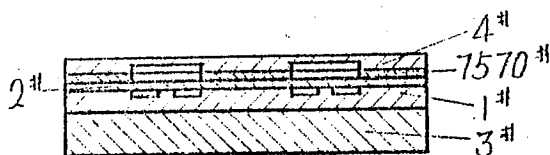


图 1.8 (c)

- (10) 采用各向异性腐蚀工艺腐蚀3[#]和4[#]硅片,至整个结构成形,如图1.8(d)所示。

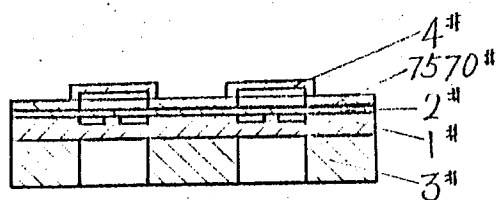


图 1.8 (d)

在微机械结构的制作过程中,步骤(2)、(4)、(8)、(9)都是关键工艺,因为它们将直接关系到传感器的研制能否顺利实现。为了证明步骤(2)、(4)在技术上的可行性,作者将高温硅—硅键合中的SDB技术作为研究对象之一,这不仅是由于SDB技术工艺灵活,发展前途大,能实现总体方案所要求的硅一体化结构,而且还考虑到SDB技术目前仍然是一个较新的领域,在工艺上还不很成熟,因此对它进行研究具有重要的意义。

为实现步骤(8)、(9)中的低温键合部分,作者将把常温下的静电封接技术作为另一个研究目标。这主要是由于常温下的硅—玻璃膜—硅静电封接技术在封接后没有任何应力,尤其适用于在热膨胀系数不同的材料之间进行封接,并且这项技术国内尚未有人报道。

为了在常温下完成静电封接,需要使用一种特殊的玻璃。对于这种玻璃,不仅要求它的软化点温度低,同时也要求它具有满足静电封接所需要的电学特性。有关它的情况将在第三章中详细介绍。

第二章 SDB 技术的研究与实验

§2.1 键合质量的检测手段

在对 SDB 技术进行研究以前,有必要先介绍一下检测键合质量的方法,因为只有掌握了这些检测方法,才能对实验中出现的各种现象进行比较、分析和总结,有利于得到最佳工艺条件,从而改善键合效果。

目前国内外比较常用的检测方法,基本上可以分为两类,即直接检测和间接检测。直接检测可以对键合质量一目了然,而且不破坏样品,它主要包括红外法、超声法以及X-射线检测等方法。其中,红外法是最快而又最经济的方法,其基本原理是:光波的近红外部分($\lambda \approx 1.1 \mu\text{m}$)可以透过硅片,如果在两块硅片的键合界面处存在未键合区,就会使光出现两次反射而形成相干光,经红外摄像机处理后,在监视器上将会出现干涉条纹。其原理图如图2.1所示:

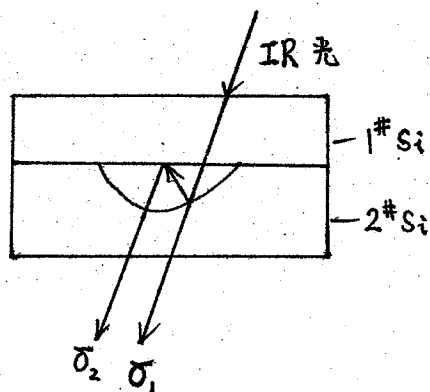


图2.1

当键合界面处空隙较大时,红外光则无法透过,这时在监视器上的对应位置将出现黑色图案;若未键合区面积较大且间隙高度又不大,则监视器上会出现很多较大的干涉条纹;若未键合区很小,则监视上将出现较小的牛顿环。由于干涉条纹的最小线宽为 $\lambda/4$ (约 275 nm),因此当气孔的尺寸低于 275 nm 时,用红外法则很难分辨出来,这是它的不足之处。

超声法是利用超声探伤的原理,当超声波遇到不连续的界面时将被反射,从而在超声图像的对应位置上出现一个黑斑。超声波法的分辨率比红外法要高。

X-射线由于其波长短,因而分辨率也比红外光要高。一些用红外法发现不了的气孔,用X-射线法却可以看得一清二楚,甚至能精确地定出气孔的位置和形状,如图2.2所示:

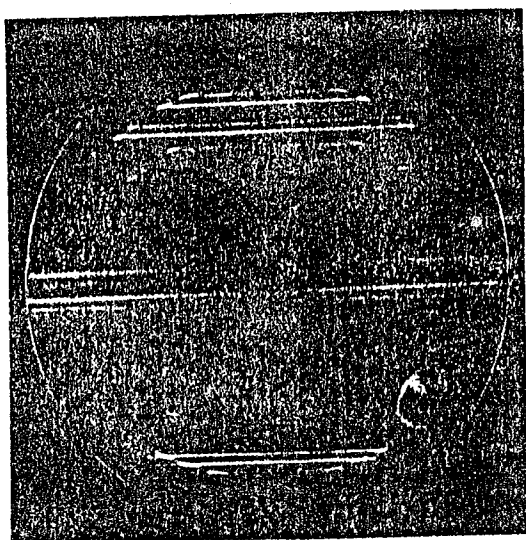


图 2.2

在图2.2中, 右下角是用镊子夹硅片时产生的变形所导致, 中间的许多横线由一些人为因素所造成, 而在硅片的上端, 则清晰可见一个红外无法发现的小气孔。

鉴于实验条件的限制, 作者在整个SDB的实验过程中均采用红外法作为主要检测手段。虽然它的分辨率不及超声法和X-射线法, 但它基本上已经能够反映出硅片的整体键合水平, 并且它还具有速度快、操作简单等优点, 在比较键合质量的好坏方面已能足以说明问题。在红外检测方法中, 作者使用的是国产TC-2B型近红外摄像机, 放大倍数为28倍。

间接检测法是对键合样品进行的一种破坏性检查, 主要有测量键合界面的表面能、测量键合力、对键合样品进行划片和腐蚀、对键合界面进行透射电镜(TEM)观察等方法。

对键合界面的表面能的测量主要是依据弹性力学的原理。将厚度为2 μ m的刀片插入两硅片之间, 则会引起硅片的弯曲变形, 如图2.3所示:

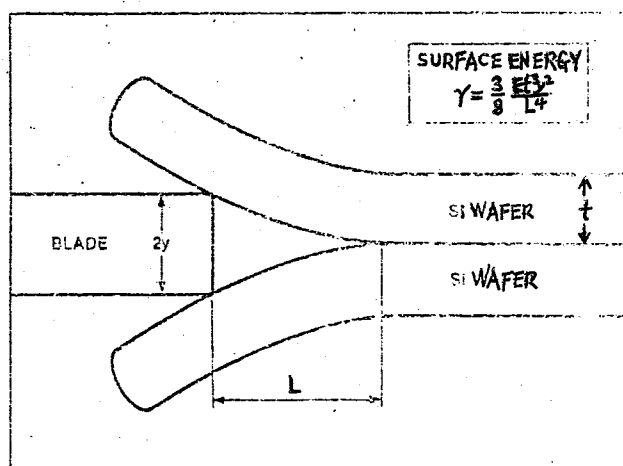


图 2.3

将硅片的变形近似作为悬臂梁弯曲来进行处理,在忽略了剪切效应以及悬臂梁末端的转动以后,表面能 γ 可以表述为:

$$\gamma = 3Et^3y^2/(8L^4) \quad (2-1)$$

式中: E 为硅片的弹性模量;

t 为硅片的厚度;

$2y$ 为刀刃的厚度;

L 为裂缝的长度。

由于硅片表面氧化层的厚度同体硅相比可以忽略不计,因此 E 通常取体硅的弹性模量,例如对于硅(100)来说, $E = 1.66 \times 10^{12} \text{ dyn/cm}^2$ 。因此在方程(2-1)中,除 L 外其余均为已知量。对 L 的测量要用到前面提及的红外

法,只要读出在 L 区域内的干涉条纹数,即可换算成 L 的长度,代入式(2-1)中就能算出 γ 。表面能越大,说明键合力越强,键合效果越好。

对键合力的测另相对来说比较容易,只要用拉力机将键合好的两块硅片沿其表面的法线方向强行拉开,即可估测出键合力的大小。若在拉开前用红外法测出键合的面积,就可以算出键合强度。

作者在实验中将采用划片、腐蚀及对键合强度的测另等方法来作为红外检测的辅助手段。

§2.2 键合前硅片的挑选与清洗

§2.2.1 硅片的挑选

用于键合的硅片对其表面的要求都非常严格。根据经验,成功地键合须满足下述条件:

$$(h/f^2) < \sqrt{(\gamma/E d^3)} \quad (2-2)$$

其中, h 为由硅片表面粗糙所引起的硅片之间间隙高度;

f 为硅片的平整度;

γ 为单位键合面积上的表面能；

E 为杨氏弹性模量；

d 为硅片的厚度。

由不等式(2-2)可以看出，硅片表面的平整度越大，粗糙度越小，就越容易满足条件。挑选硅片的步骤如下：

(1) 用倾斜光照射，看硅片表面是否有散射光，若有，则说明表面粗糙（注意区别灰尘粒子）；若没有散射光，则说明抛光面较好。

(2) 用垂直光照射，看硅片表面的光线是否直，若直，则说明表面平整；若弯曲，则说明硅片表面不平。

只要按照上面所说的挑选步骤去做，再加上细心，就不难挑选到理想的硅片。

§2.2.2 硅片的化学清洗

1) 硅片表面沾污的杂质类型和来源

我们知道，硅片切割机经常涂有各种油脂如防锈油、润滑油等油类物质；切割或抛光硅片时为了固定硅片需用粘合剂如松香、蜡等；切割硅片时常用金刚砂磨料如 SiC 等；抛光用的磨料有 MgO 、 Al_2O_3 、 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 等，硅片表面受空气和潮湿作用所产生的氧化物如 SiO_2 等；另外空气中的灰尘及其他杂质均可能吸附在硅片的表面。概括

起来,硅片表面可能沾污的杂质大致可归纳为三类:

- (1) 油脂、松香、蜡等有机物质;
- (2) 金属、金属离子、氧化物以及其他无机化合物;
- (3) 灰尘以及其他可溶性物质。

在了解了硅片表面可能沾污的杂质种类后,我们就可以进一步确定片子表面的清洗方法。

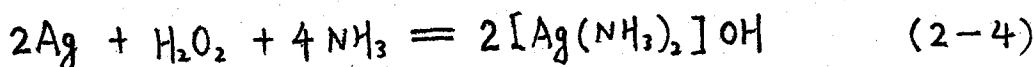
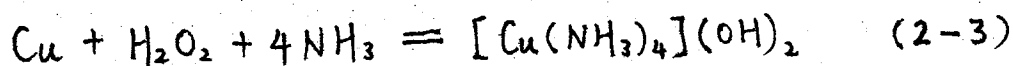
<2> 硅片清洗的一般步骤

清洗硅片时,首先应除去覆盖在表面上的一层疏水性的有机物残渣,因为它们对于清除后两类杂质具有阻碍作用。根据“结构相似的物质互溶”原理,去除有机物杂质应选用有机溶剂。

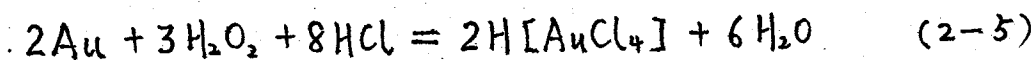
使用有机溶剂清洗时,须按照一定的顺序进行才能收到良好的效果,通常采用甲苯→丙酮→乙醇的顺序进行。这是因为甲苯的去油能力最强,所以先用甲苯清洗。由于甲苯易溶于丙酮,丙酮又易溶于乙醇,所以这样的清洗次序,不仅可把有机杂质完全除去,而且也能依次把留在片子上的甲苯、丙酮洗净。由于乙醇能与水以任何比例相溶,所以片子最后可以用去离子水冲洗。

去除后两类杂质,目前普遍采用的方法是,交替使用I号液和II号液。I号液由去离子水、过氧化氢和浓氨水按一定体积比配制而成,它利用氨水的碱性,除去

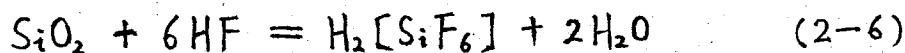
油脂等有机物；利用过氧化氢的氧化性，将重金属原子氧化成离子，再与氨（络合剂）结合成能溶于水的络合物，例如除去铜、银等重金属杂质：



Ⅱ号液由去离子水、过氧化氢和浓盐酸按一定体积比配制而成，它利用盐酸的强酸性，将金属氧化物、氢氧化物、碳酸盐等变为能溶于水的金属氯化物。另外，在酸性洗液中，过氧化氢具有更强的氧化性，它能将金、铂等重金属杂质氧化为金属离子，再和盐酸（络合剂）形成能溶于水的络合物，例如：



硅片在经过Ⅰ号液和Ⅱ号液的清洗后，表面还有一层很薄的自然氧化层，用2%的稀氢氟酸漂洗即可除去：



经过挑选以及化学清洗后的硅片应保存在高纯去

离子水中，以备键合之用。

§2.3 SDB的实验与理论分析

§2.3.1 SDB工艺过程及其影响因素

J. B. Lasky 认为，硅片在经过清洗和亲水处理后，其表面吸附了大量的一OH基团，当两块硅片在室温下一接触，它们各自携带的一OH基团之间会迅速产生氢键作用，这种很强的作用力能将两块硅片之间的大部分空气排掉，从而在界面处形成一“负压区”。在氢键力和外界大气压力的作用下，两块硅片能迅速进行紧密接合而不分开。为了完成硅醇键向硅氧键的转化以提高键合力，还必须对两块硅片进行高温退火处理。由此可见，按照被普遍接受的Lasky原理，整个SDB工艺过程基本上可以分为两大部分，即室温下的预键合以及高温下的退火处理。作者将分别对它们的工艺条件加以研究和讨论。

1> 预键合及其影响因素

预键合的基本过程是，硅片在经过化学清洗、亲水处理和干燥后，将它们的抛光面互相对准并使之接触，键合就

从某个最先接触点开始迅速向其四周传播，键合面积不断扩大。在红外监视系统中所看到的预键合过程，就好象是波的传播一样，如图2.4所示：

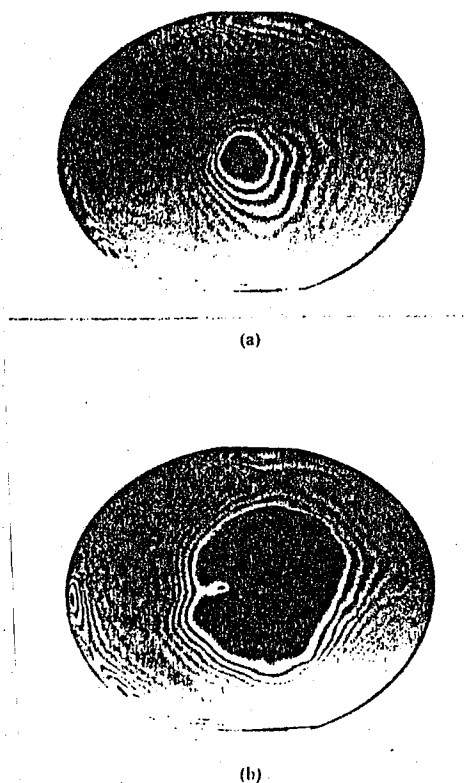


图2.4

作者暂且称之为“键合波”。图2.4中的“键合波”从(a)到(b)一共经历了10秒的时间。一旦“键合波”完全停止下来，则说明预键合过程结束。

实验证明，预键合的好坏对整个键合过程的成败起着决定性的作用，如果预键合不好，那么随后的高温退火过程对键合效果通常不会有什么明显改善；如果预键

合好的话,就会使高温处理过程变成一道简单的工序。因此,寻求较好的预键合所满足的工艺条件就显得十分重要。在进行了一系列的实验后,作者发现下列因素对预键合的好坏有着较大影响:

(1) 亲水处理液

使用亲水处理液的目的是为了硅片表面吸附大量的 $-OH$ 基团。目前比较常用的处理液有 HNO_3 、 H_2SO_4 、 $NH_3 \cdot H_2O$ 以及直接使用I号液和II号液。国内外不少人都说它们的亲水能力差不多,然而作者在实验中发现,用 HNO_3 处理后的样品其“键合波”的速度相当快,每秒钟可达几个厘米;而仅用I号液和II号液清洗后直接键合的样品,其“键合波”的速度要慢得多。导致“键合波”速度快慢的主要原因就是硅片表面所吸附的 $-OH$ 基团密度的不同, $-OH$ 基团密度越大,“键合波”速度越快; $-OH$ 基团密度越小,则“键合波”的速度就越慢。为了对各种处理液的亲水能力有一个半定量的认识,作者还进行了预键合后的拉力实验。这是因为,如果处理液的亲水能力越强,那么硅片表面所吸附的 $-OH$ 基团就越多,产生的氢键力就越大,两块硅片接触得就比较紧密,这样它排出的空气也就较多,形成的“负压”就越大,从而构成了一个良性循环。因此,通过估测预键合后的键合力大小就可以知道各种处理液亲水能力的强弱。拉力实验的原理图如图2.5所示:

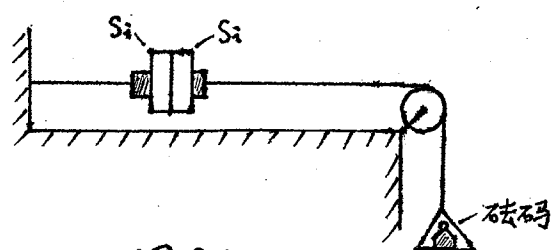


图 2.5

在此拉力实验中所采用的均为 $\phi 40$ 单面抛光N型硅片,厚度为 $400\mu\text{m}$,硅片自重为1克左右。拉力测试的结果如下:

亲水处理液	预键合力
HNO_3	5Kg
$\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	4Kg
H_2SO_4	3Kg
I号液+II号液	小于1Kg

据国外资料报道,^[1]其预键合后的键合力为 $2 \sim 5 \text{ Kg/cm}^2$,这更加证实了除大气压力外还有一个很强的氢键作用。

通过拉力实验以及对“键合波”的观察,作者认为,采用 HNO_3 或 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 作为亲水处理液效果最好。

(2) 烘干

硅片在经过亲水处理后,为了防止灰尘粒子对硅片表面的粘污,很多人都在去离子水中进行预键合。这样做所导致的后果是,在高温退火过程中两块硅片常常会分开,严重的则会由于受力不均而沿硅的解理面炸成碎片。为了研究“炸片”的原因,作者在各种温度下对预键合后的样品进行了退火处理,处理后的样品经红外摄像机观察后发现,由水汽引起的气孔在温度略高于 800°C 时其气孔尺寸达到最大,如图2.6(a)、(b)所示:

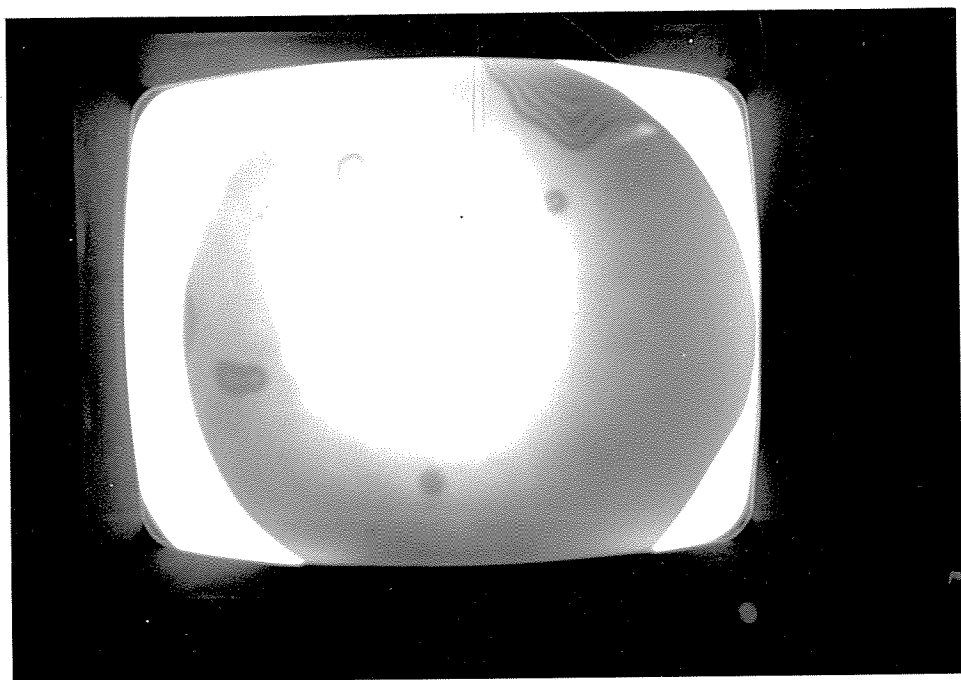


图 2.6 (a) 预键合后

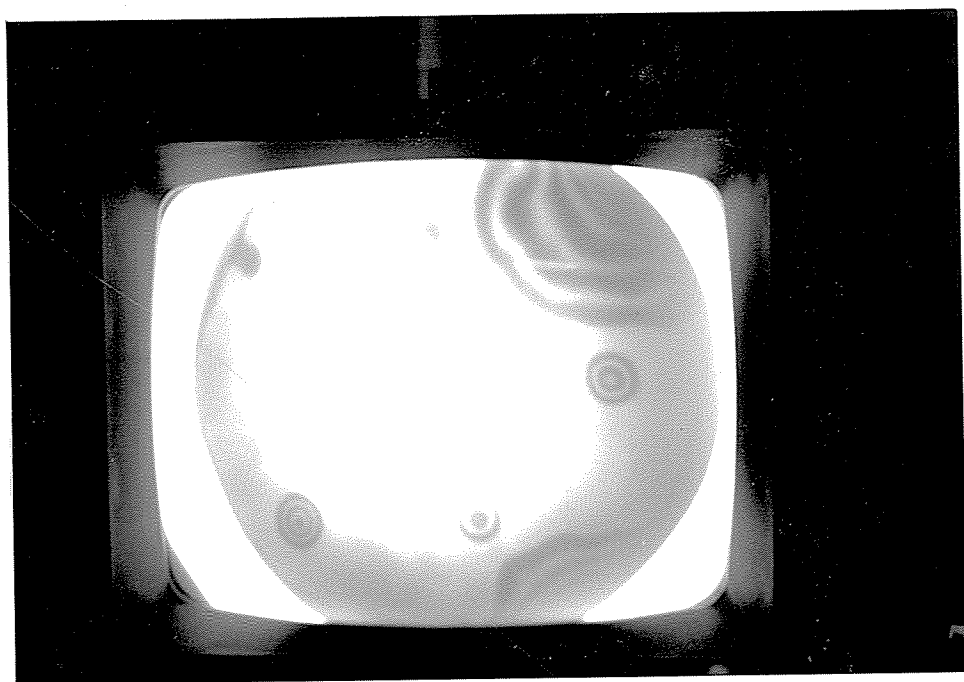


图 2.6 (b) 815°C 退火处理后

由此作者认为, 800°C 是最有可能“炸片”的温度, 其原因
是尚未被分解的水汽在此温度下膨胀到最大值。而水汽
的来源有两个, 即物理吸附水和化学吸附水。化学吸附水
来自于硅片表面所吸附的 $-OH$ 基团, 它对于预键合以及高温
退火过程都十分有利, 应该予以保留, 而物理吸附水则必
须尽可能多地去掉。因此, 预键合前硅片的干燥就显得十
分重要。清洗后的硅片最好在红外灯下烘干, 因为它不仅
烘干速度快, 而且同气体吹干相比, 烘干还可以减少由于
空气扰动而对硅片表面产生的不良影响。同时, 硅片烘
干后其表面吸附的 $-OH$ 基团依然存在, 对预键合没有

任何影响。因此,采用烘干技术可以完全避免由于“炸片”所导致的成品率下降。

在烘片时采取适当保护措施,同样可以避免灰尘粒子对硅片的粘污,图2.7即为烘干后进行键合的样品的红外照片,中间绝大部分未见有灰尘粒子引起的未键合区:

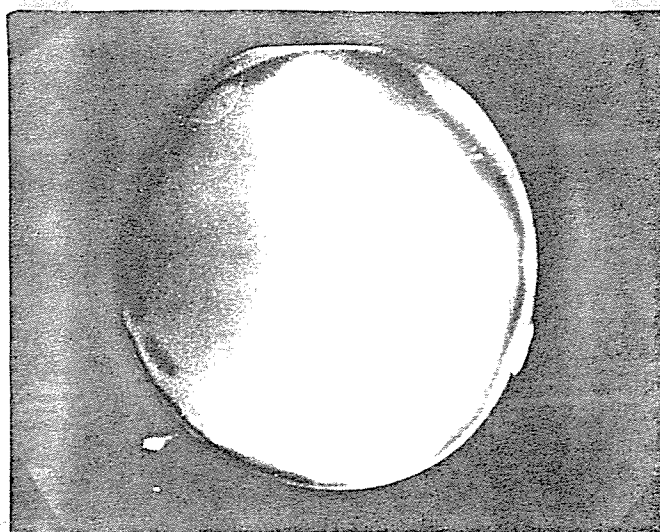


图 2.7

(3) 硅片表面的粗糙度和洁净度

实验发现,硅片表面的粗糙程度对预键合起着决定性的影响,粗糙而不平的表面即使经过最好的亲水处理,预键合也不会成功,如图2.8所示:

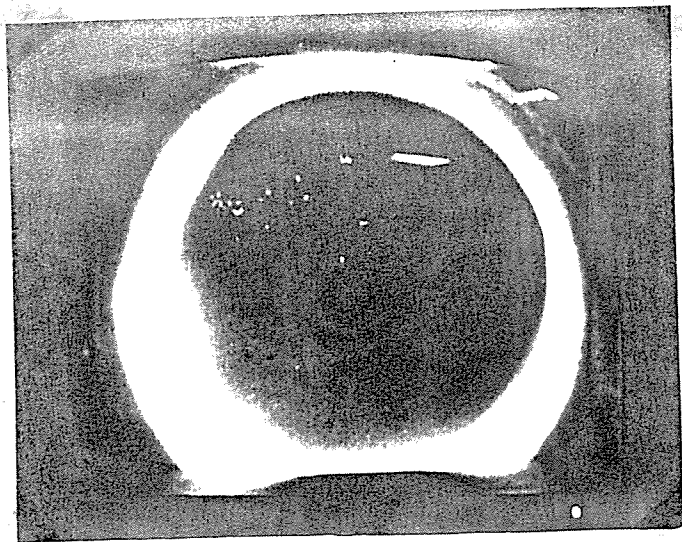


图 2.8

整个键合界面几乎都是未键合区，高温退火过程对键合效果也没有明显改善。由此可见，预键合前硅片的挑选工作显得十分重要。

洁净度对预键合也有很大影响，有时未清洗干净的表面往往让人很难发现有粘污的地方，尤其是粘污的某些有机物，它们在高温过程中会分解而形成气孔，从而对键合不利。

(4) 净化度

SDB 的工艺过程需要在一个超净的环境中进行才能取得良好的效果。这是因为在普通环境下，空气中的灰尘粒子落到硅片表面后会在键合过程中形成气孔，从而引起

键合质量的下降。据分析,一个直径为 $1\mu\text{m}$ 的灰尘粒子能导致一个直径达 1mm 的气孔,由此可见灰尘粒子的危害。为了减轻或消除这种危害,国外的键合工艺通常在10级以上的超净环境中进行,而国内最好的净化间也只有100级,因此,完全避免灰尘粒子对键合质量的影响几乎是不可能的。所以,键合工艺目前也只能适用于小到中等规模的集成电路、功率器件以及传感器的制作等,尚不能用来制作超大规模集成电路。

由上述分析我们不难看出良好的预键合所应该满足的工艺条件。为了提高键合力,完成真正的硅一体化结构,还必须对预键合后的样品进行高温退火处理。

<2> 高温处理过程及其影响因素

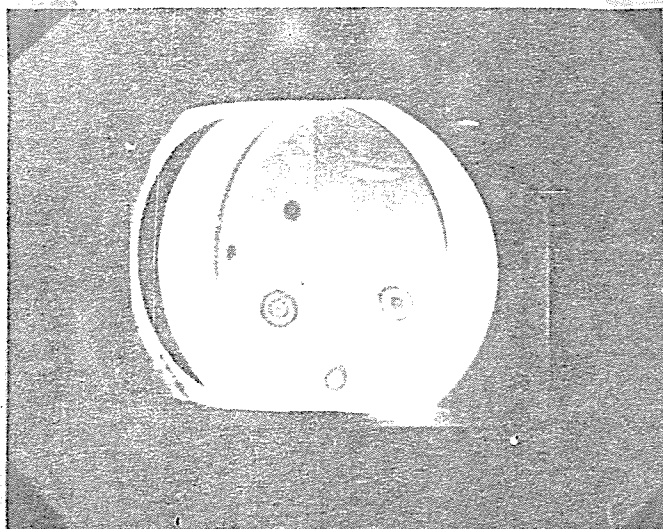
硅片在经过预键合后,通常都放在氧化炉中进行退火处理,可随炉升温,也可以直接推入已升到预定温度的氧化炉中,同时通入一定流量的气体如 O_2 , N_2 等,经过一定时间后取出样品,整个SDB过程结束。

在高温处理过程中,对键合质量影响最大的因素就是键合温度,其次是键合气氛和键合时间。

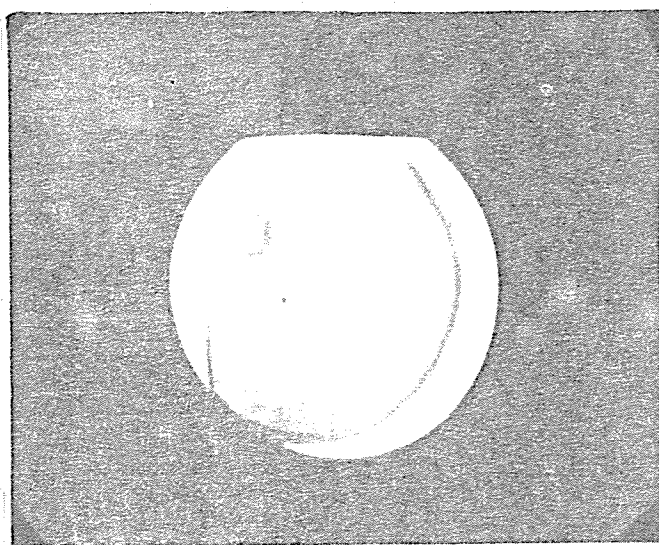
(1) 键合温度

作者在各种温度下进行了退火处理,发现在 800°C 以

下, 随着温度的升高, 原先的气孔尺寸会增加, 并且出现了一些额外的气孔; 退火温度在 $800 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 之间时, 气孔尺寸有减小趋势; 当温度大于 1000°C 时, 气孔尺寸迅速降到最小甚至消失, 如图 2.9 所示:



(a) 预键合后出现气孔



(b) 1050°C 热处理后气孔消失

图 2.9

作者还对一些分别在 450°C , 600°C , 800°C , 1000°C 和 1100°C 下退火的样品进行了拉力测试, 测得键合力与温度的关系如图 2.10 所示:

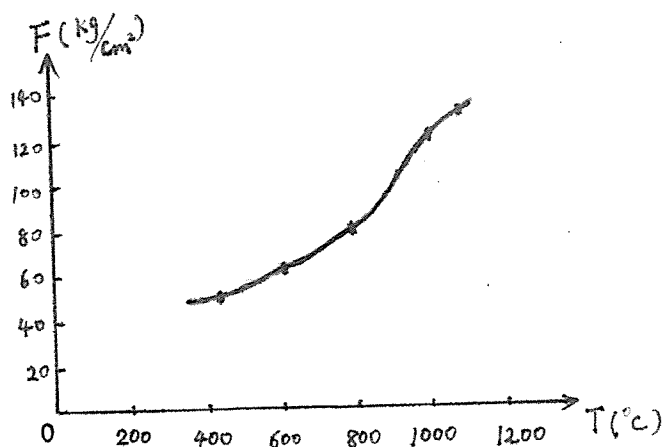


图 2.10

在实验所取的温度范围内, 键合力随温度增加而单调增加。

图 2.11^[1] 和图 2.12^[2] 分别是国外一些研究人员所得出的键合力—温度以及键合界面的表面能—温度关系曲线:

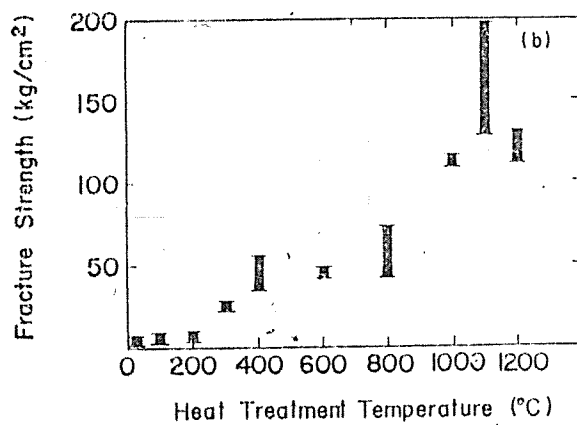


图 2.11