

无压力辅助硅/玻璃激光局部键合*

马子文 汤自荣[†] 廖广兰 史铁林 聂磊

(华中科技大学机械科学与工程学院 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 提出了一种新的无需外压力作用的硅/玻璃激光局部键合方法,通过对晶圆进行表面活化处理,选择合适的激光参数及加工环境,成功地实现了无压力辅助硅/玻璃激光键合.同时研究了该键合工艺参数如激光功率、激光扫描速度、底板材料等的影响.实验表明,激光功率越大,扫描速度越小,键合线的宽度就越大.实验结果显示,该方法能有效减少键合片的残余应力,控制键合线宽,并能得到较好的键合强度.该工艺可为 MEMS 器件的封装与制造提供简洁、快速、键合区可选择新型键合方法.

关键词: MEMS; 激光键合; 表面活化; 键合线宽

EEACC: 2530B

中图分类号: TN305

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)02-0217-05

1 前言

在微系统工艺中,特别是在硅微机械制造中,用得最多的材料组合是硅和玻璃.由于硅具有良好的机械性能,被多种工艺加工成微结构后,它在传感器制造中得到了大量的应用.同时,由于借鉴了硅在 IC 制造中的成熟工艺,使得在具有传感或执行功能的硅基微系统中集成电路成为可能.而玻璃具有电绝缘性,良好的透光性、高机械强度及化学稳定性.因此硅和玻璃在微机电系统(MEMS)的制造中得到大量的运用.而硅和玻璃之间的键合技术是直接决定 MEMS 封装成功的关键,目前硅和玻璃的键合技术主要有直接/共熔键合技术^[1,2]和阳极键合技术^[3,4].

直接/共熔键合技术已运用到多种 MEMS 器件的制造中,如压力传感器、微泵、化学传感器都需要在衬底上键合机械支撑结构.硅的熔融键合大多用在 SOI 技术上,如 Si-SiO₂ 键合和 Si-Si 键合.然而,其键合需要较高的退火温度.阳极键合的温度为 200~400℃,低于直接/共熔键合的温度,然而它需要 1000~2000V 的强电场才能达到高质量的键合,强电场会对微电路产生威胁.并且阳极键合中玻璃的碱离子可能会对器件带来污染,键合对晶圆表面平整度的严格要求也限制了它在 MEMS 封装中的运用.

晶圆的直接/共熔键合和阳极键合在高温和高压的情况下,能得到很高的键合强度.然而,在集成

了金属薄膜的压力、化学和热传感 MEMS 器件中,这些工艺可能不再适用.尽管越来越多的研究者致力于利用晶圆表面活化处理来降低阳极键合和熔融键合的温度,但它们都需要在整个器件或衬底上加热,这会导致器件中不必要的应力和温度分布.在上述提到的键合技术中都不能进行选择性的键合,键合面积和热影响区不能得到控制.因此,为了使压力和温度传感器件的性能免受影响,提出了一种在特定区域施加高温的键合方法^[5].这种方法能保证键合区有高的键合强度的同时,使晶圆整体处于较低的温度.基于这种局部加热的键合方法,研究者提出了多种 MEMS 封装工艺,包括局部共晶键合^[6~8],局部熔融键合^[9]和局部焊接键合^[10].虽然这些局部键合方案是成功的,但这些键合方法的加热源都为电阻加热,在许多情况下,电阻加热并不合适.通过激光的使用,这些缺点都能克服,为此许多研究者进行了激光辅助键合的研究.Wild 等人^[11,12]首先利用激光波长为 1064nm,光斑直径为 300μm 的 Nd:YAG 激光器使硅和玻璃发生键合,且键合强度为 5~10MPa.Mescheder 等人^[13]利用中间层使硅和玻璃发生共晶键合,键合强度大约为 42.6MPa.国内杨道虹等人^[14]运用 Nd:YAG 激光在功率为 300W,激光扫描速度为 0.05m/s,光束直径为 700μm 的条件下得到了平均为 9.3MPa 的硅/玻璃键合.但以上的激光辅助键合都需要施加比较大的外压力,致使晶圆键合后产生较大的残余应力,甚至产生裂纹,从而影响键合片的性能.为此,本文提出了无压力辅助的硅/玻璃激光局部键合,并从晶圆的

* 国家重大基础研究发展规划(批准号:2003CB716207)及国家自然科学基金(批准号:50405033)资助项目

[†] 通信作者. Email: zirong@mail.hust.edu.cn

2006-08-23 收到,2006-09-20 定稿

表面活化处理、激光参数、加工环境三个方面分析这些因素对该键合技术的影响。

2 无压力激光局部键合技术

2.1 键合原理

激光键合的原理是,利用激光与物质相互作用的热效应实现微系统器件的局部加热键合.激光具有优良的传输和聚焦特性,经过聚焦镜后可以将能量集中于一点.因此,激光可以在很短的时间内使被照射区域的温度急剧上升,从而达到选择区域局部键合的目的.激光键合需要光束聚焦在键合片的界面处,这要求参与键合的其中一片键合片能被激光穿透,而另一片键合片则应该对激光有很好的吸收率.典型的激光键合材料是硅和玻璃,单晶硅和 Pyrex 玻璃对激光的透射谱如图 1 所示.当使用波长 1064nm 的 Nd:YAG 激光器时,Pyrex 玻璃可以透过绝大部分的激光,而硅片能够吸收足以发生键合的能量.激光键合的关键是保证热量能在两键合片之间很好地传递,为此必须使键合片能够紧密的接触在一起.使键合片紧密接触的方式有两种:施加外压力和进行表面活化处理.施加外压力会使晶圆键合后产生较大的残余应力,从而影响键合片的性能,而进行表面活化处理能克服这个缺点.对键合片进行表面活化处理将会使其表面能增大,当在室温下将两键合片贴合在一起时,两键合片受界面处的氢键和范德华尔斯力的作用而紧密接触^[15].当键合片表面的粗糙度足够小,表面能足够大时,室温下键合片表面就能发生弹性变形而发生预键合^[16].因此,键合片能在室温下发生预键合是无压力辅助硅/玻璃激光局部键合的关键。

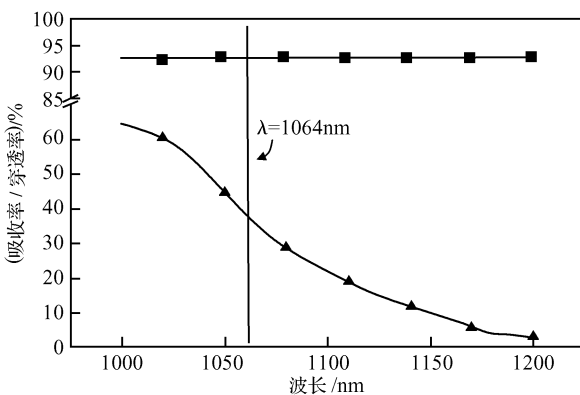


图 1 在近红外区域硅片的吸收谱和 Pyrex 玻璃片的透射谱
Fig.1 Absorption spectrum of silicon (▲) and transmission spectrum of Pyrex glass (■) in the near infrared region

2.2 实验装备及材料

图 2 为无压力辅助硅/玻璃激光键合原理图.与其他激光键合装置^[11~14]不同的是,我们在键合过程中没有施加外压力,键合片上没有放置玻璃压板.室温下预键合的键合片直接放置在铝质底板上.实验选用的是 Nd:YAG 激光器,最大功率为 1000W,光斑直径为 200 μ m,激光波长为 1064nm,其功率密度为高斯分布.实验材料采用单晶硅晶圆,掺杂类型为 p 型,晶向(111),厚 380 μ m,半径 38mm,粗糙度等级为初级;Pyrex 玻璃圆片厚 525 μ m,切割成 20mm \times 20mm 的方片。

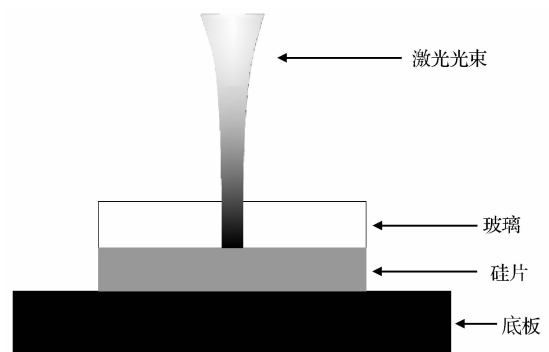


图 2 硅/玻璃激光键合示意图

Fig.2 Schematic drawing of experimental set-up

2.3 实验步骤

为增加键合片的表面能,需要对硅片和玻璃片进行亲水化处理.试验步骤如下:

(1) 清洗:配置 H_2SO_4 和 H_2O_2 清洗液(H_2SO_4 : H_2O_2 = 2:1),将待键合样片浸泡到混合溶液中,控制温度在 120 $^{\circ}C$,清洗时间 20 min 以去除金属颗粒和有机物污染。

(2) 一次活化:配置 RCA1 溶液(NH_4OH : H_2O_2 : H_2O = 1:1:5),样片活化 20min,反应温度 70 $^{\circ}C$ 。

(3) 二次活化:配置 RCA2 溶液(HCl : H_2O_2 : H_2O = 1:1:5),样片活化 20min,反应温度 70 $^{\circ}C$ 。

(4) 预键合:使用高纯氮气将样片吹干.此时将硅片和玻璃片在室温下迅速贴合在一起,硅片和玻璃就会发生自发性键合。

(5) 激光辅助键合:将预键合后的键合片放置在底板上,将激光以一定速度垂直扫描两键合界面,使硅和玻璃发生局部键合。

为了研究激光参数对键合影响,键合所选的激光参数为:激光功率 60~90W,扫描速度 1~10mm/s。

3 结果与讨论

3.1 激光键合线宽与激光参数

在激光键合中,光能量密度是一个重要参数,它能表征光源作用(加工)的能力^[17].光能量密度的定义为:入射到材料单位面积上的光能量.在激光加工中计算能量密度的表达式为:

$$F = \frac{P}{vD} \quad (1)$$

其中 P 为激光功率; D 为表面光斑直径; v 为激光扫描速度.在假定光斑直径为常数的情况下,激光的功率及激光扫描速度将是激光键合中的重要影响因素.图3是该实验样片在20倍电子显微镜下的激光局部键合结果,图中黑色部分为激光键合部分.

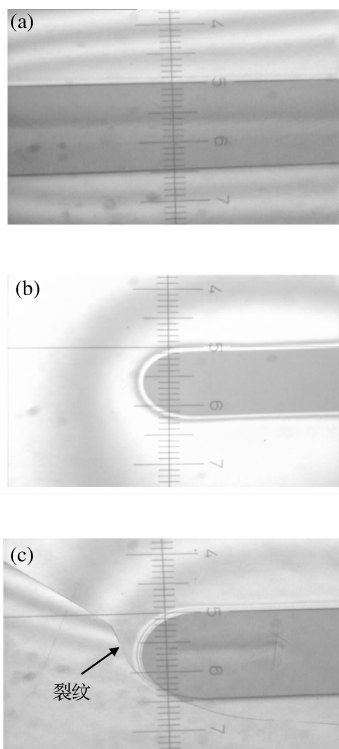


图3 激光局部键合线宽 (a) $P = 70\text{W}$, $v = 1\text{mm/s}$; (b) $P = 60\text{W}$, $v = 1\text{mm/s}$; (c) $P = 70\text{W}$, $v = 1\text{mm/s}$

Fig.3 Laser bondline at glass-silicon interface (a) $P = 70\text{W}$, $v = 1\text{mm/s}$; (b) $P = 60\text{W}$, $v = 1\text{mm/s}$; (c) $P = 70\text{W}$, $v = 1\text{mm/s}$

激光键合线宽与激光参数的关系曲线如图4所示.由图可以看出,在不同激光功率、不同扫描速度下键合线宽也不同.激光功率越大,扫描速度越小,键合线就越宽.这可以用(1)式来解释.这是因为激光功率越大,扫描速度越小,受激光照射的硅表面的

能量密度也就越大,晶圆界面处的高温区也随之扩大.实验还发现,当激光功率小于60W时,键合仍能实现,但在光束经过后只能持续很短的时间,在冷却到室温时,界面键合能不足以阻止热收缩产生的应变,键合的面积又分离.当激光功率大于90W时,沿键合轨迹的边缘会出现大量裂纹,键合失败.这说明温度分布在激光键合中起着决定性的作用,只有合适的温度梯度分布,两晶圆才能键合在一起.

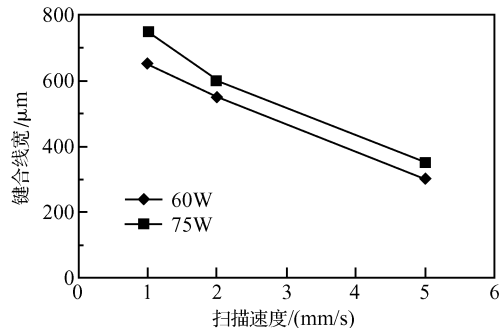


图4 激光功率与扫描速度对键合线宽的影响

Fig.4 Effect of laser power and scanning velocity on bondline width

3.2 晶圆材料与底板的影响

如图3(c)所示,在实验中,还有一个突出的现象,在键合线的开始和结束的位置玻璃很容易出现裂纹.它在界面的键合区和未键合区的分界处产生.裂纹的长度从几个微米到几百个微米不等.裂纹的出现是由于大的温度梯度造成的热应力所导致的.另一个原因是玻璃和硅热传导系数不匹配,这会在键合后产生残余应力.这两种应力与激光键合的温度场分布有很大的关系.在激光键合的开始和结束点附近,吸收的能量较小,但最大温度和中间的扫描路径一样,这样导致高的温度梯度.与激光扫描轨迹的键合区相比,键合区附近有更大的温度梯度,从裂纹的出现可以推断出,快速的冷却和相对高的温度梯度使玻璃产生了热应力.在玻璃的某些区域这些应力会超过玻璃强度从而产生裂纹.实验发现,如果在键合前对晶圆进行预热能有效减少裂纹的产生,这也证实了温度梯度是裂纹产生的主要原因.实验中还发现,键合需要的激光功率与底板有很大关系,如果把铝底板换成塑料底板,键合所需的最小功率就会减少30%.这是由于铝的热传导率远大于塑料的热传导率,照射在键合片上的热量会很快被铝散发出去.

晶圆材料性质对激光键合也有很大影响,单晶硅的吸收率随温度的升高而快速增大,在300℃时的吸收率是室温下的10倍^[18].硅的热传导率与温

度也有很大关系^[19],从室温 27°C 到 1000°C,热传导率减少为原来的 1/5.吸收率的增大导致激光束在硅表面的几个微米层就被完全吸收.传导率的减少阻碍了硅表面所吸收热能的流失,两种影响使激光键合的热影响区很小.

3.3 表面活化处理的影响

图 5 为两组相同规格的键合片.一组键合片采用本文所述的方法进行键合;另一组键合片没有经过表面活化处理,只经过表面清洗以除去表面的小颗粒,然后施加外压进行激光键合.图 5(a)是在施加过大压力下键合片产生大量裂纹的情况,这说明施加外压使键合片产生了较大的预应力.当激光照射产生的热应力与施加外压产生的预应力之和超过了键合片的强度时就会产生裂纹.在实验中我们发现,施加压力进行激光键合时,压力不能过大也不能过小,必须在一定的范围内,而对于不同的键合环境施加压力的范围会随着改变.此外,由于键合片尺寸小,需要高精度地控制系统,保证对键合片表面均匀施压,以避免产生应力集中现象,从而实验中压力的控制变得困难.除了压力不易控制容易出现裂纹外,

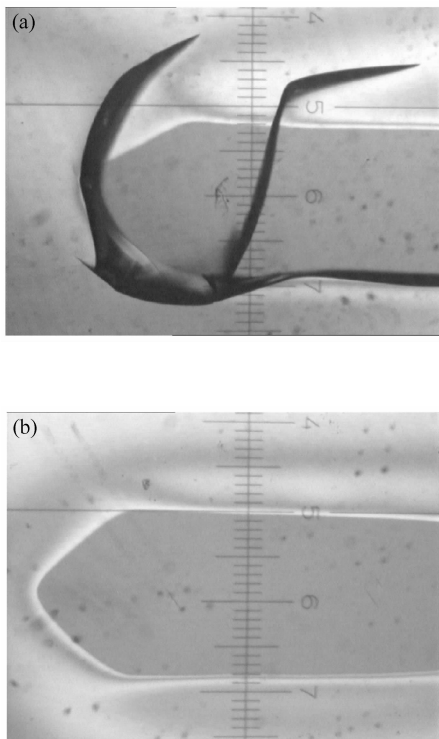


图 5 在施加外压力 (a) 和无外压力 (b) 下进行表面活化处理后激光键合的结果

Fig.5 Results of different laser bonding after surface activation with external pressure (a) and without external pressure (b)

还需要注意的是,在施加压力键合成功的键合片中,压力产生的预应力也不容忽视,它在器件的长期使用中可能会产生可靠性差的问题.而利用表面活化处理的激光键合完全避免了以上缺点,该方法主要是通过增加键合片的表面能来达到紧密结合接触面的目的.对于亲水性表面活化处理来说,其实质是使键合片表面悬挂大量的 OH^- 原子团^[20],从而增加室温下预键合片界面处之间的吸引力,致使键合片表面产生弹性变形,使键合片得到更紧密地接触.

随后键合片根据键合线条划成若干小片,每片上有一根键合线条.对键合片进行拉伸测试,实验显示键合片从玻璃体内断裂,而不是在界面断裂,测试结果表明激光局部键合强度达到了 6.5~6.8MPa.

4 结论

实验表明,经过表面活化处理后,硅/玻璃无需外压力就能成功实现激光局部键合.激光键合区域与表面活化处理、激光参数、键合材料特性和键合环境有关.激光功率越大,扫描速度越小,键合区域就越大.另外拉伸强度实验表明,其键合强度已能满足 MEMS 器件的应用.该键合方法的实质是直接键合与局部焊接键合的结合.在键合过程中既发生了高温退火又发生了一部分材料的熔融.该键合方法设备简单,且在局部温度控制及键合效率方面有明显的优势,可作为 MEMS 封装与制造的新型键合方法.

参考文献

- [1] Lasky J. Wafer bonding for silicon-on-insulator technologies. *Appl Phys Lett*, 1986,48(1):78
- [2] Chung G S, Kawahito S, Ishida M, et al. High-resolution pressure sensors fabricated by silicon wafer direct bonding. *Electron Lett*, 1991,27(12):1098
- [3] Puers B, Peeters E, Van den Bossche A, et al. Capacitive pressure sensor with low impedance output and active suppression of parasitic effects. *Sensors and Actuators A*, 1990,21(1~3):108
- [4] Mastrangelo C H, Muller R S. Vacuum-sealed silicon micromachined incandescent light source. *Technical Digest of International Electron Devices Meeting*, 1989:503
- [5] Lin L. MEMS post-packaging by localized heating and bonding. *IEEE Trans Adv Packag*, 2000,23(4):608
- [6] Ko W H, Suminto J T, Yeh G J. Bonding techniques for micro-sensors. In: *Micromachining and Micropackaging of Transducers*. New York: Elsevier, 1985
- [7] Lin L, Cheng Y T, Najafi K. Formation of silicon-gold eutectic bond using localized heating method. *Jpn J Appl. Phys, Part II*, 1998,37(11B):1412
- [8] Cheng Y T, Hsu W T, Najafi K, et al. Vacuum packaging technology using localized aluminum/silicon-to-glass bonding. *J Microelectromech Syst*, 2002,11(5):556

- [9] Cheng Y T, Lin L, Najafi K. Localized silicon fusion and eutectic bonding for MEMS fabrication and packaging. *IEEE/ASME J Microelectromech Syst*, 2000, 9(1):3
- [10] Wassink R J K. Soldering in electronics. Scotland: Electrochemical Publications, 1984
- [11] Wild M J, Gillner A, Poprawe R. Locally selective bonding of silicon and glass with laser. *Sensors and Actuators A*, 2001, 93(1):63
- [12] Wild M J, Gillner A. Advances in silicon-to-glass bonding with laser. *Proc SPIE*, 2001, 4407:135
- [13] Mescheder U M, Alavi M. Local laser bonding for low temperature budget. *Sensors and Actuators A*, 2002, 97/98:422
- [14] Yang Daohong, Xu Chen, Dong Dianhong, et al. Application of laser fusion bonding of silicon/glass in a novel uncooled infrared detector. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2004, 10(2):236 (in Chinese) [杨道虹, 徐晨, 董典红, 等. 激光熔融键合在新型室温红外探测器的应用. *功能材料与器件学报*, 2004, 10(2):236]
- [15] Tong Q Y, Gösele U. Semiconductor wafer bonding: recent developments. *Materials Chemistry and Physics*, 1994, 37(22):101
- [16] Plohl A, Krauter G. Wafer direct bonding: tailoring adhesion between brittle materials. *Materials Science and Engineering*, 1999, R25:1
- [17] Mescheder U M, Alavi M, Hiltmann K, et al. Local laser bonding for low temperature budget. *Sensors and Actuators A*, 2002, 97/98:422
- [18] Siregar M R T, Von Allmen M, Luthy W. Temperature dependence of optical absorption at $\lambda=1.06\mu\text{m}$ in amorphous and crystalline silicon. *Helv Phys Acta*, 1979, 52:45
- [19] Gan Z, Tan C M. Thermally induced stress in partial SOI structure during high temperature processing. *Microelectronic Engineering*, 2004, 71(2):150
- [20] Huang Qing'an. Micro-mechanical process technology on silicon. Beijing: Science Press, 1996 (in Chinese) [黄庆安. 硅微机械加工技术. 北京: 科学出版社, 1996]

Pressure-Free Localized Laser Bonding for Silicon and Glass*

Ma Ziwen, Tang Zirong[†], Liao Guanglan, Shi Tielin, and Nie Lei

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A novel pressure-free localized laser bonding process for silicon and glass has been developed. This process has been successfully realized by applying surface activation to wafers and selecting suitable laser parameters and bonding conditions. The effects of factors in this bonding method, such as laser power, scanning velocity, and base material, were also studied. The experimental results demonstrate that the bondline becomes wider at higher laser powers and smaller scanning velocities. The experiment also shows that this bond process can efficiently reduce residual stress in bonded pairs and control the bondline width. Tensile experiments indicate that the bond strength is comparable with that obtained by other bonding methods. This process can provide a simple and robust bonding method with rapid processing time and high selectivity of bonding area for the packaging and fabrication of MEMS devices.

Key words: MEMS; laser bonding; surface activation; bondline width

EEACC: 2530B

Article ID: 0253-4177(2007)02-0217-05

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2003CB716207) and the National Natural Science Foundation of China (No. 50405033)

[†] Corresponding author. Email: zirong@mail.hust.edu.cn

Received 23 August 2006, revised manuscript received 20 September 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics