

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 19920091152458

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

硅 硅 低 温 键 合 技 术 研 究

Study on Low-temperature Silicon Wafer Bonding

Technology

陶 巍

指导教师姓名: 孙 道 恒 教授

专 业 名 称: 测试计量技术及仪器

论文提交日期: 年 月

论文答辩时间: 年 月

学位授予日期:

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

年 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

低温键合技术与其他键合技术相比，能够避免高温退火对器件造成的缺陷，在制作微机电系统（MEMS）器件、绝缘体上硅器件（SOI）以及压电和声光器件等领域有着广阔的应用前景。针对传统的低温键合技术不适合解决带活动结构晶圆的键合问题，论文提出了湿法活化与等离子体干法活化相结合的低温键合方法，以硅片的低温键合技术为研究对象，从理论研究、工艺研究以及质量评估三方面开展了如下研究：

（1）从化学的角度分析了湿法活化、等离子体干法活化以及湿法活化与等离子体干法活化相结合的具体活化机制，并从表面能入手，对湿法活化与等离子体干法活化相结合的优点进行了分析。紧接着采用赫兹接触理论建立了键合模型，通过对模型的受力分析，讨论了晶圆在相互接触过程中由于弹性变形产生的接触应力以及由于活化流程产生的吸附力对晶圆键合的影响，得出了晶圆之间的吸附力大于接触应力有利于晶圆键合的结论。最后提出晶圆键合效果的检测方法并设计了湿法活化、等离子体干法活化以及湿法活化与等离子体干法活化相结合的对比实验，从实验角度验证了湿法活化与等离子体干法活化相结合的优点。

（2）针对不带绝缘层的材料（硅片与硅片）进行了低温键合工艺研究，从表面能的角度出发考察了等离子体活化时间对晶圆键合率和键合强度的影响规律。接着从接触应力的角度出发考察了键合压力以及键合压力保持时间对晶圆键合率和键合强度的影响规律，最后从外部环境因素的角度出发考察了退火氛围以及退火温度对晶圆键合强度的影响规律。通过实验对比得出了硅片与硅片的低温直接键合的最佳实验参数。

（3）针对带绝缘层的材料（硅片与二氧化硅）开展了低温键合工艺研究，将硅片湿法活化和二氧化硅干法活化、硅片干法活化和二氧化硅湿法活化进行对比实验，得出硅片干法活化和二氧化硅湿法活化更有利于低温键合。同硅片与硅片键合的研究方法类似，同样考察了等离子体活化时间、键合压力大小、键合压力保持时间、退火氛围以及退火温度等相关参数对键合率和键合强度的影响规律。通过实验对比得出了硅片与二氧化硅低温直接键合的最佳实验参数。

（4）运用前面研究出的最佳工艺参数实现了带腔体硅片的键合以及整个晶

圆的键合，为 MEMS 器件以及 SOI 器件的制作提供了实验基础。

关键词：晶圆低温键合；直接键合；键合质量；等离子体活化

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

Comparing with others wafer direct bonding technology, low-temperature bonding technique can avoid the defect caused by high temperature annealing, it is widely used in many production processes of device, such as MEMS (Micro-Electro-Mechanical System), SOI, Piezoelectrics and acoustooptics. Aim at traditional low-temperature bonding technology is not suitable for a mobil wafer, a new low-temperature bonding technology is proposed, which combines wet processes of activation with plasma dry of activation. Based on the low-temperature bonding technology, theory, process researches and quality assessment are presented as follows:

(1) We analyzed each mechanism, including wet process of activation, plasma dry of activation and a combination of the two. Based on the surface energy, introduced emphasize advantages of the method that wet processes of activation combined with plasma dry of activation. Then, a bonding model is build up using Hertz contact theory from physical point of view, according to the force analysis of the model, for elastic deformation can cause the contact stress and adsorbability can emerge in activation process, the influences on wafer direct bonding are discussed based on them, it is helpful to bonding when adsorbability larger than contact stress in wafers. At last, the method for the evaluation of bonding quality is proposed and an experiment which is a comparison of wet activation, plasma activation and the combination of the two is presented aiming for verifying the superiority of the method we proposed.

(2) It studies the low-temperature direct bonding of materials without the oxide layer such as the bonding of silicon and silicon. The influence of plasma activation time on bonding quality is studied from the surface energy perspective. From the view of the contact force, extern applied force and the duration time of extern applied force are also studied. Finally, annealing atmosphere and annealing temperature are studied from the point of external factor. An analysis is provided based on the above study. The best parameters for the low-temperature of silicon and silicon is drew from the comparison of the above study.

(3) It also studies the low-temperature direct bonding of materials with the oxide layer such as the bonding of silicon and oxide silicon. A comparison experiment is presented based on the different activation method of oxide silicon, and we draw a

conclusion that silicon with plasma activation and oxide silicon with wet activation is helpful for the bonding of silicon and oxide silicon. The influence of plasma activation time, extern applied force, the duration time of extern applied force, annealing atmosphere and annealing temperature on bonding area and bonding strength are also studied. An analysis is provided based on the above study. The best parameters for the low-temperature of silicon and oxide silicon is drew from the comparison of the above study.

(4) Based on the above results we have got, it realizes bonding of silicon and silicon with the cavity, and then accomplishes bonding of silicon wafer and silicon wafer, which provide experimental basis for the fabrication of MEMS devices and SOI devices.

Keywords: Low-temperature wafer bonding; Direct bonding; Bonding quality; Plasma activation

目 录

摘 要.....	I
目 录.....	V
第一章 绪 论	1
1.1 晶圆键合技术的应用以及低温键合技术.....	1
1.1.1 硅基 MEMS 加工技术.....	1
1.1.2 低温键合技术.....	2
1.1.3 晶圆低温键合技术的应用.....	3
1.1.4 低温键合技术的研究现状.....	7
1.2 本文的研究目标与主要研究内容.....	8
第二章 低温直接键合技术的理论分析.....	10
2.1 晶圆键合的化学结合机制	10
2.1.1 湿法活化.....	11
2.1.2 等离子体干法活化.....	12
2.1.3 湿法活化与等离子体干法活化相结合.....	14
2.2 晶圆键合的物理结合机制.....	15
2.2.1 赫兹接触理论.....	15
2.2.2 高斯分布模型的建立.....	17
2.2.3 晶圆接触变形过程分析.....	18
2.3 本章小结.....	20
第三章 低温直接键合技术的实验研究.....	21
3.1 低温直接键合工艺流程.....	21
3.2 低温直接键合实验方案设计.....	25
3.3 低温直接键合效果的检测以及表征.....	28
3.3.1 检测晶圆键合可行性的方法.....	28
3.3.2 键合强度的检测.....	29
3.3.3 空洞检测.....	31
3.4 三种活化方法的对比实验.....	32
3.5 本节小结.....	34
第四章 晶圆键合质量评估	36
4.1 硅晶圆与硅晶圆低温键合工艺参数研究.....	36

4.1.1 等离子活化时间长短对键合质量的影响.....	36
4.1.2 键合时施加负载对键合质量的影响.....	43
4.1.3 键合压力保持时间对键合质量的影响.....	48
4.1.4 退火氛围以及退火温度对键合质量的影响.....	53
4.2 硅晶圆与二氧化硅晶圆的低温键合参数研究.....	56
4.2.1 等离子活化时间长短对键合质量的影响.....	56
4.2.2 键合压力对键合质量的影响.....	63
4.2.3 键合压力保持时间对键合质量的影响.....	68
4.2.4 退火氛围以及退火温度对键合质量的影响.....	72
4.3 带腔体硅片的键合以及晶圆的键合.....	75
4.3.1 带腔体硅片的键合.....	76
4.3.2 圆片级晶圆的键合.....	79
4.4 本章小结.....	80
第五章 结论与展望.....	82
5.1 结论.....	82
5.2 工作展望.....	83
参考文献.....	84
致 谢.....	88
攻读硕士学位期间发表的论文.....	89

Abstract.....	I
Contents	V
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Application of Wafer Bonding and Low-temperature Bonding.....	1
1.1.1 Silicon based MEMS Machining Technology	1
1.1.2 Low-temperature Bonding Technology	2
1.1.3 Application of Low-temperature Bonding Technology	3
1.1.4 Current Research of Low-temperature Bonding Technology	7
1.2 Tarks and Works	8
Chapter 2 Theoretical Analysis of Low-temperature Direct	
Bonding	10
2.1 Chemical Principles of Low-temperature Direct Bonding.....	10
2.1.1 Wet activation	11
2.1.2 Plasma activation	12
2.1.3 Combination of Wet activation and Plasma activation	14
2.2 Physical Principles of Low-temperature Direct Bonding.....	15
2.2.1 Herzd Contact Theory	15
2.2.2 Propose of Gaussian Distribution Model.....	17
2.2.3 Analysis of Asperities Contact Deformation.....	18
2.3 Summary	20
Chapter 3 Experiments on Low-temperature Direct Bonding.....	21
3.1 Low-temperature Direct Bonding Process	21
3.2 Experimental design on Low-temperature Direct Bonding	25
3.3 Methods of Evaluating Low-temperature Direct Bonding.....	28
3.2.1 Methods of Evaluating Bonding Viability	28
3.2.1 Evaluation of Bonding Strengh.....	29
3.2.1 Detection of Void	31
3.4 Comparision of Three Different Activation Methods	32
3.5 Summary	34
Chapter 4 Evaluation of The Bonding Quality	36

4.1 Parameters Study of Silicon and Silicon Low-temperature Direct	
Bonding.....	36
4.1.1 The Effect of Plasma Activation Time on Bonding Quality	36
4.1.2 The Effect of Extern Force on Bonding Quality	43
4.1.3 The Effect of Extern Force Time on Bonding Quality.....	48
4.1.4 The Effect of Annealing Atmosphere and Temperature on Bonding Quality.....	53
4.2 Parameters Study of Silicon and Oxide Silicon Low-temperature Direct	
Bonding.....	56
4.2.1 The Effect of Plasma Activation Time on Bonding Quality	56
4.2.2 The Effect of Extern Force on Bonding Quality	63
4.2.3 The Effect of Extern Force Time on Bonding Quality.....	68
4.2.4 The Effect of Annealing Atmosphere and Temperature on Bonding Quality.....	72
4.3 Bonding of Silicon With Cavity and Silicon Wafer	75
4.3.1 Bonding of Silicon and Silicon With Cavity	76
4.3.2 Wafer Scale Bonding	79
4.4 Summary	80
Chapter 5 Conclusions and Future Works	82
5.1 Conclusions	82
5.2 Future Works	83
References	84
Acknowledgement.....	89
Publication.....	89

第一章 绪 论

1.1 晶圆键合技术的应用以及低温键合技术

1.1.1 硅基 MEMS 加工技术

MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems)是指可批量制作的,集微型机构、微型传感器、微型执行器以及信号处理和控制电路、直至接口、通信和电源等于一体的微型器件或系统。MEMS技术的发展开辟了一个全新的技术领域和产业,采用MEMS技术制作的微传感器、微执行器、微型构件、微机械光学器件、真空微电子器件、电力电子器件等在航空、航天、汽车、生物医学、环境监测、军事以及几乎人们所接触到的所有领域中都有着十分广阔的应用前景。MEMS器件和系统具有重量轻、体积小、功耗低、性能优良、可靠性高、功能强大、可批量生产等传统传感器无法比拟的优点。

目前硅基材料的加工仍是MEMS研究中的热点,其微机械加工工艺也多种多样,传统上分为两类,即体硅加工工艺和表面硅加工工艺^[1]。体硅微加工工艺是以衬底单晶硅片作为机械结构,用湿法或干法腐蚀对硅片进行纵向加工的三维加工技术,其工艺成熟,生产成本低,但其难以与集成电路进行集成,微观结构的整体高度受所用硅晶圆的厚度限制,仅适合简单几何形状的加工。表面硅加工工艺是以硅(单晶或多晶)薄膜为机械结构,利用与普通集成电路工艺相似的平面加工技术,其工艺耗时多,成本大,但其不受硅晶片厚度的限制,薄膜材料的选择范围大且适合复杂形状的加工。

随着微机械加工工艺日新月异的发展,新的工艺方法不断出现。晶圆键合技术作为一种新的工艺方法,可以将表面加工和体加工有机地结合在一起,成为MEMS加工工艺的研究热点。晶圆键合是指通过化学和物理作用将硅片与硅片、硅片与玻璃或其他不同材料紧密地结合在一起,生成仅用硅难以制作的新型器件和微型元件,使许多新器件和新应用得以实现。晶圆键合技术始于微电子机械系统(MEMS)制造,这种微系统多用于汽车工业,如:加速度计、微反射镜和陀螺仪等微系统要求密封的微腔室,以便保护苛刻环境对器件的损伤,同时保证了

机械功能的执行；红外探测器或谐振器等其他器件则要求真空封装。随后晶圆键合技术用于微光电子机械系统（MOEMS）制造，MOEMS 是将光学和电子功能组合在一起，应用于听力辅助器和红外焦面阵列等。除 MEMS 和 MOEMS 外，驱动晶圆键合技术发展的另三种技术是晶圆级封装（WLP）、三维芯片堆叠（3-D chip stacking）和绝缘体上硅晶圆（SOI）^[2]尽管硅片键合不是微机械加工的直接手段，却在微机械加工中有着非常重要的地位。其一般通过与其他加工技术相结合，既可以实现对微结构的支撑与保护，又可以实现机械结构之间或机械结构与电路之间的电学连接^[3-4]。

1.1.2 低温键合技术

目前的晶圆键合技术主要分为两大类：高温键合技术以及低温键合技术。高温键合技术需要的预键合温度都较高，如阳极键合^[5]的键合温度高达450℃，硅熔融键合^[6]的温度高达1000℃以上。当将两种不同热膨胀系数的晶圆在高温下键合到一起的时候，在键合过程中和键合结束后自然的会产生热应力和应变，过大的残余热应力可在较小热膨胀系数晶片的键合表面造成裂痕，而过大的残余应变则可能导致膨胀系数较大的晶片（例如玻璃与硅晶片键合中的玻璃晶片）键合表面变形凸起。高温退火还会导致掺杂源扩散，金属引线熔化变形等。虽然阳极键合技术应用于无表面层的微元件键合，可以降低温度效应对微元件的损伤，但是阳极键合所需的更高的电压将产生更强的电场，会严重干扰微元件的电流，尤其是对于大规模集成电路^[7]。另外对于某些含有温度敏感元件的器件而言，高温容易引起器件的失效。而低温键合技术则不会出现这些问题。低温键合技术主要是利用晶圆界面的化学作用力，在室温条件下自发完成键合的。其优点体现在：（1）对于掺杂晶圆的键合避免了高温引起掺杂源的扩散问题，因此可以利用低温键合技术将低掺杂晶圆与高掺杂晶圆进行键合从而取代耗费时间的深度掺杂扩散过程^[8]；（2）对于热膨胀系数不同晶圆的键合避免了高温引起的热应力与应变，因此可以实现不同材料的晶圆的键合，例如通过键合被氧化的晶圆进行绝缘体上硅（SOI）材料的制备^[8]。（3）对于带腔体或者空洞晶圆的键合避免了高温条件下气体的产生^[9]，因此可以通过键合带沟槽或孔洞的表面进行微加工。因此降低退火温度实现晶圆低温键合，并达到需求的键合强度具有十分重要的意

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库