

基于低温熔融技术的硅 - 玻璃异质材料键合工艺设计

潘代强¹, 吴正鹏², 张云¹

¹国家智能传感器创新中心(上海芯物科技有限公司), 上海

²格科半导体(上海)有限公司, 上海

收稿日期: 2023年4月23日; 录用日期: 2023年6月8日; 发布日期: 2023年6月15日

摘要

传统硅 - 玻璃为衬底晶圆的异质材料键合有阳极键合工艺, 但是阳极键合需要高碱金属氧化物含量的玻璃晶圆, 且工艺需要施加电场和高温加热, 高温高压会引起较大键合残余应力, 导致器件结构变化或性能衰减, 对半导体器件应用有较大局限性。本文详细设计了一种针对硅 - 玻璃为衬底的异质材料的低温键合工艺, 通过在玻璃衬底沉积氧化膜, 预键合时界面间形成氢键连接, 经过后续退火氢键转化为共价键, 最终成品键合界面均匀、透明, 键合界面空洞缺陷率小于5%, 键合力大于 1.8 J/m^2 , 实现硅 - 玻璃晶圆的永久键合, 大大增加了硅 - 玻璃键合工艺的应用范围。

关键词

硅 - 玻璃衬底, 异质材料键合, 低温键合

Based on Fusion Bonding Technology for the Design of Bonding Process for Silica-Glass Heterogeneous Materials

Daiqiang Pan¹, Zhengpeng Wu², Yun Zhang¹

¹National Intelligent Sensor Innovation Center (SIWAVE Inc.), Shanghai

²D Galaxycore (Shanghai) Limited, Shanghai

Received: Apr. 23rd, 2023; accepted: Jun. 8th, 2023; published: Jun. 15th, 2023

Abstract

The traditional silicon-glass substrate wafer bonding process has anode bonding, but anode bonding

requires glass wafers with high alkali metal oxide content, and the process requires the application of electric field and high temperature heating. High temperature and high pressure will cause large bonding residual stress, resulting in device structure changes or performance attenuation, which has great limitations for semiconductor device applications. In this paper, a low-temperature bonding process for silica-glass heterogeneous materials as substrate was designed in detail. By depositing oxide film on glass substrate, hydrogen bond was formed between the interfaces during pre-bonding, which was converted into covalent bond after subsequent annealing. Finally, the bonding interface of the final product was uniform and transparent, the hole defect rate of the bonding interface was less than 5%, and the bonding force was greater than 1.8 J/m². The realization of permanent bonding of silicon-glass wafer greatly increases the application range of silicon-glass bonding technology.

Keywords

Silica-Glass Substrate, Bonding of Heterogeneous Materials, Fusion Bonding

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

化合物半导体硅、锗、铁电聚合物、玻璃、陶瓷等是半导体器件制作材料中较为普遍的一种，目前芯片材料中最常用的是半导体硅，由于玻璃的绝缘性和力学性能都很好，并且可以与硅片实现键合，因此键合后的器件具有较小的分布电容和热噪声，如 MEMS，光学透镜，传感器制造等。

目前，传统硅 - 玻璃的粘合多以阳极粘合为主，该技术实施过程中需要施加电场和高温加热，高温高压会引起较大键合残余应力，导致器件结构变化或性能衰减，对半导体器件应用有较大局限性。伴随着采用硅 - 玻璃异质材料键合器件需求不断增加，结构设计越来越复杂，采用传统的阳极粘合技术已无法满足当前需求。

晶圆低温键合技术克服了传统阳极键合技术的缺陷，该技术又称为氢氧化物催化键合技术，是一种在室温环境下通过在键合界面形成硅酸盐网状结构进行两体键合的可靠的固体胶合方式。与阳极粘合技术相比，这种方法对界面的要求不高，对晶片及器件损伤小、无中介层污染、无需外部电场辅助，键合力更强，抗温度冲击，而键合界面与传统阳极键合一样均匀、透明，可广泛应用于石英、光学玻璃、光学晶体等异质材料两体键合。

20 世纪 90 年代美国斯坦福大学在美国宇航局的资助下，开展了低温键合技术的研究，主要用于满足其重力探针 B (GP-B) 项目中恶劣的发射和使用条件，研究获得了良好的键合特性[1] [2]。自此以后，低温键合技术得到了国外多家研究机构的高度重视，包括德国肖特公司、英国格拉斯哥大学、美国斯坦福大学、NASA、洛克希德马丁公司等研究机构一直对该技术进行研究，并在多个领域得到应用。

在基础科研领域，在引力波测量领域应用低温键合技术悬挂大质量光学元件是目前的研究重点，Virgo 和 GEO600 通过使用低温键合技术，获得了良好的高强度特性和低额外机械损失[3] [4]；在航空航天领域，James、Webb 空间望远镜(JWST)、激光干涉仪空间天线(LISA)等计划中，其精密光学器件的制造和连接通过利用低温键合技术，键合精确度和抗低温冲击性能得到有效提升[5] [6]；在强激光领域，由于低温键合界面的组成与玻璃本体接近，能够有效降低同光路径上的热聚集，减少光元器件损伤的机率

并能抑制多模效应，广泛用于制造光学腔和输出镜[7]。此外，低温键合技术还在混合波导基底、大型轻质光学元器件、薄型可变形反射镜等领域得到广泛应用[8] [9] [10]。

2. 硅 - 玻璃低温键合原理

硅 - 玻璃低温键合原理如图 1 所示。首先，采用 O_2 等离子体轰击 SiO_2 表面，以此激活介质表面的 Si-O 键，使其具有亲水性。其次，采用去离子水清洗介质表面，处于亚稳态的 Si-O 键很容易与 H_2O 结合形成 OH-悬挂键，以此在介质表面形成一层水分子膜。接着将两枚完成表面激活处理的硅片相互正面对准，并将硅片表面接近到亚毫米级的距离，先后从硅片中心到边缘进行介质表面键合，以此排出空气，获得理想的键合效果。由于 SiO_2 介质表面存在 OH-悬挂键，氢键的范德华力会使两枚硅片的介质表面相互粘合在一起，获得一定强度的临时键合。最后，采用一定退火温度处理两小时，将键合面的 OH-键还原成水分子，形成键合力更强的 Si-O-Si 键合面，并排出水气，实现范德华力到共价键的转化，从而大大增加了硅片间的键合强度。

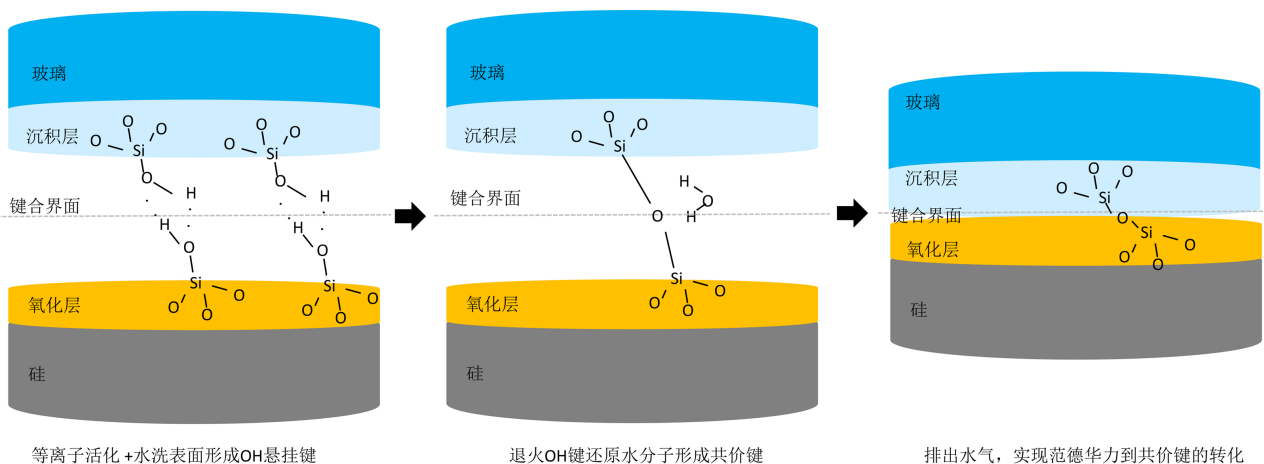


Figure 1. Principle for fusion bonding of silicon-glass

图 1. 硅 - 玻璃低温键合原理

3. 工艺设计与实施细节

本文对硅 - 玻璃低温键合工艺进行设计，并对关键工序的工艺参数进行了分析和试验。

硅 - 玻璃低温键合工艺具体实施步骤如图 2 所示。

3.1. 异质材料来料分析

直接键合要求晶圆表面具有高度的平坦度、平行度和光滑度，同时也必须保证表面干净，没有颗粒、有机物及金属污染，否则将会影响键合界面的结构及电学性能。

因此，玻璃晶圆材料选择可提供各种厚度和光滑度较高的硼硅酸盐玻璃，总厚度偏差小于 1.5 μm ，粗糙度小于 0.5 nm，弯曲度小于 30 μm 。硅晶圆材料选择可提供各种厚度和难以想象的光滑度的硅晶圆，总厚度偏差小于 1.5 μm ，粗糙度小于 0.5 nm。

3.2. 异质材料表面镀膜

键合的原理是键合设备先对晶圆进行等离子体活化，等离子体处理后的晶圆经过去离子水清洗使得活化的 Si-O 键与 H_2O 结合形成 OH-悬挂键[11]。二氧化硅薄膜稳定性好，膜层牢固，可以经过离子水清

洗使得活化的 Si-O 键与 H₂O 结合形成 OH-悬挂键，没有沉积薄膜，无法形成稳定性好，膜层牢固的键合晶圆。

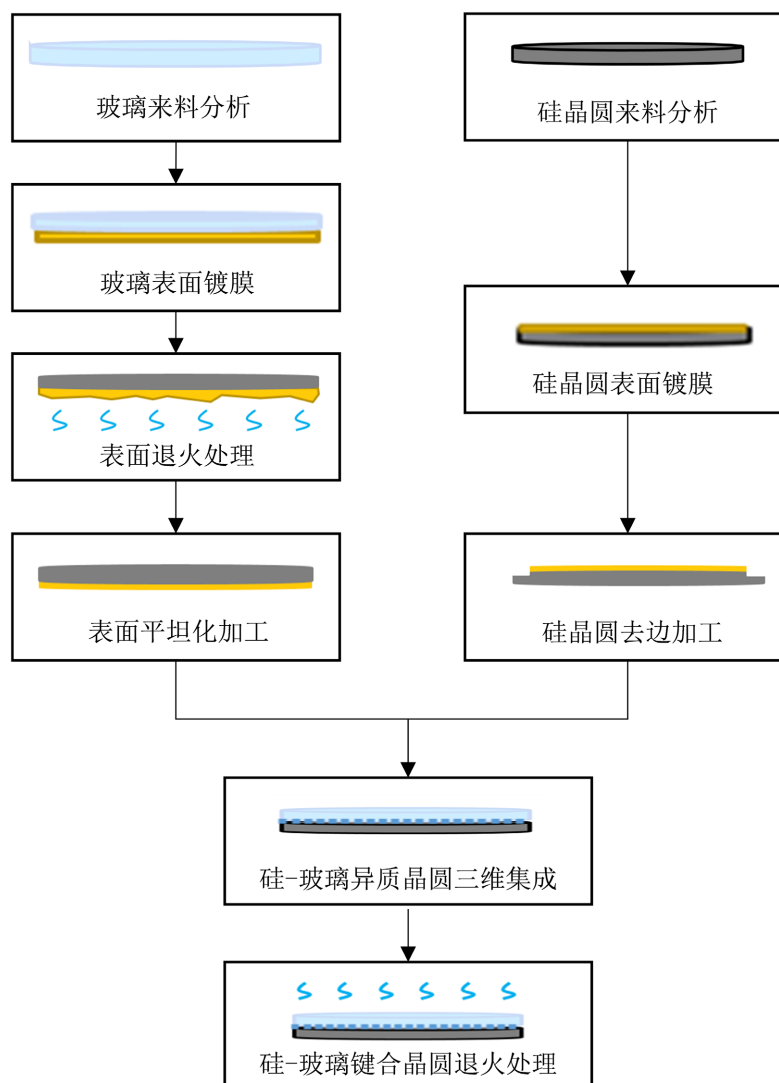


Figure 2. Flow chart of fusion bonding

图 2. 低温键合实施步骤

3.3. 退火处理

PECVD 制备 SiO₂ 膜的反应过程很复杂，是一种无机聚合反应，PECVD 的反应原理是利用气体辉光放电，一般在 200℃~300℃，生长速率快[12]，但是要想得到目标键合力的键合表面，单纯 PECVD 长出来的薄膜还不够致密，相对较疏松，通过退火处理可以获得更加致密的 SiO₂ 膜。

3.4. 化学机械研磨平台化处理

晶圆 SiO₂ 膜沉积后还需要进行晶圆化学机械研磨后续工艺，化学机械研磨工艺中的关键在于对 SiO₂ 均匀度的控制[13]，通过研磨液种类，转速，压力，研磨液流量等工艺优化，研磨到预期 SiO₂ 厚度，均匀度控制在 3% 以下。

3.5. 硅晶圆去边处理

去边工艺的目的是防止硅片减薄时边缘由于减薄力的作用发生崩边和边缘裂片，来降低边缘缺陷，并且有助于键合气泡的排出，去边工艺效果如图 3 所示。可以看出，如果去边不好，在去边处的边界会有不同程度的凹坑出现，如图 3(b)所示，这样会直接导致后续工艺过程中硅片边缘出现键合气泡等缺陷，键合力不够等不良效果。

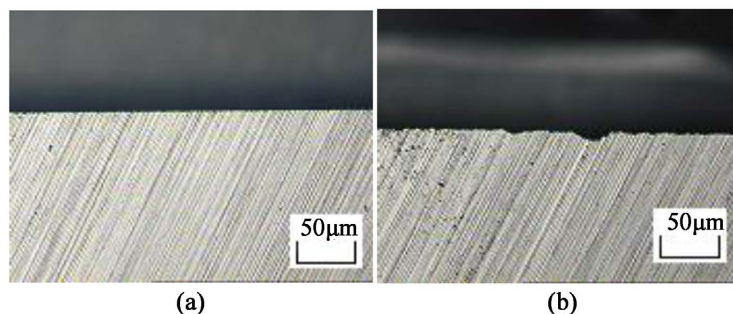


Figure 3. Process effect after trimming
图 3. 去边后工艺效果

3.6. 异质晶圆键合三维集成

由于玻璃的翘曲度高于硅晶圆，要求采用不同位置进行低温形成临时键合，玻璃的膨胀系数也高于 SiO_2 ，要求先在较低温度下完成临时键合，然后在较高温度时通过退火工艺实现玻璃永久键合。

玻璃 - 硅片键合工艺完成后，需要在不破坏硅片的前提下对玻璃 - 硅片的键合界面处进行缺陷检测，利用超声波扫描显微镜可检验界面处是否有气泡、硅片边缘处是否有灰边等。如图 4 所示，如果两片硅片表面没有紧密的结合，在界面处就会有大的气泡出现，如图 4(a)所示，这些气泡会在后续的工艺过程中破裂，从而可能会导致后面的机台受到污染，如此的键合硅片是无法进行后续工艺的。

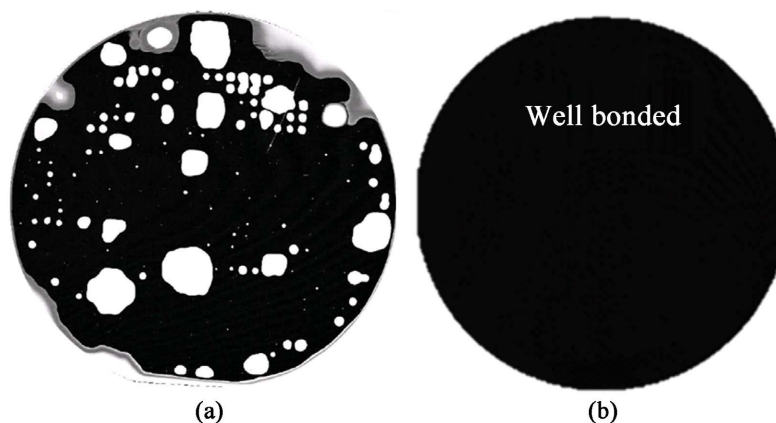


Figure 4. Diagram of surface quality of silicon wafer after bonding
图 4. 硅片键合后硅片表面质量示意图

3.7. 键合晶圆退火处理

键合过程结束后对复合晶圆在 $200^{\circ}\text{C}\sim 400^{\circ}\text{C}$ 进行退火处理，将晶圆间的氢键连接转化为共价键连接，进一步增大键合强度[14]。

对于经过等离子体腔预处理的键合晶圆及未进行等离子体激活的晶圆分别进行退火后的键合力测试,结果表明 400℃加热条件下 3 小时,经过活化处理的晶圆在退火 1 小时后即可表现出大于 2 J/m^2 的键合强度,而未经等离子体处理的晶圆退火 3 小时后键合强度仍小于 1 J/m^2 ,如图 5 所示。这一结果表明键合前的等离子体激活是很有必要且不可缺少的。

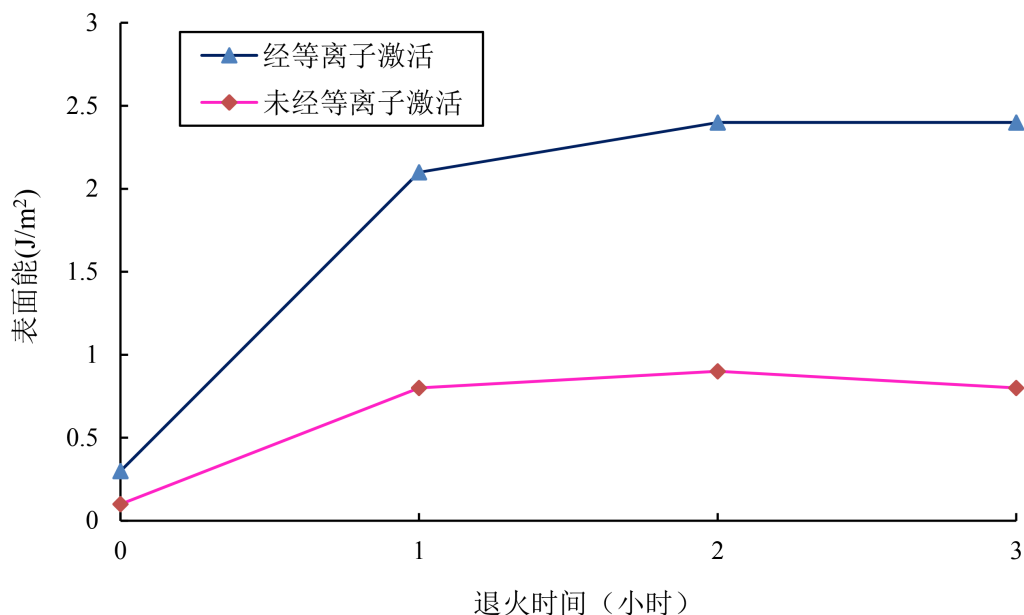


Figure 5. Bond force test curve of 12-inch bonding wafer with (without) plasma treatment

图 5. 有(无)等离子体处理的 12 寸键合晶圆键合力测试曲线

4. 实施效果

表征晶圆键合的主要参数有键合力及键合缺陷比例[15],采用国家智能传感器创新中心的键合力测试推裂仪设备 CT103,通过取晶圆 90 度/180 度/270 度三个位置,分别用刀片插入 5 mm 的深度,通过裂纹法测试键合力公式计算不同位置的键合力,然后取平均值即可得到该片晶圆的键合强度。

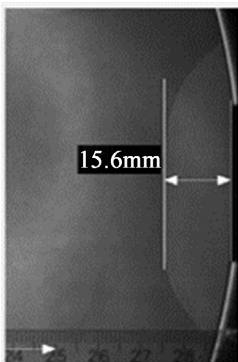
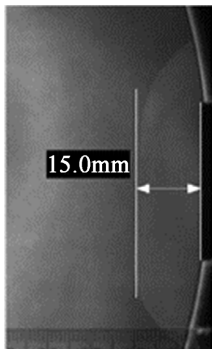
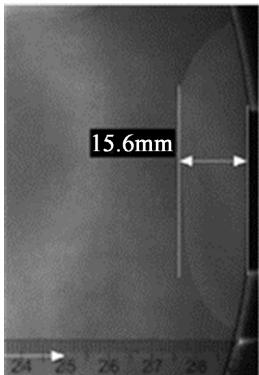
对上述工艺方法加工出的玻璃-硅异质晶圆,实验通过选取 6 对键合材料键合力进行测试,测试结果如表 1 和表 2 所示:

Table 1. Measurement results of wafer bonding force

表 1. 玻璃-硅异质晶圆材料晶圆键合力测量结果

编号	位置 1 (90 度)		位置 2 (180 度)		位置 3 (270 度)		平均值 键合强度
	裂纹长度 (mm)	键合强度	裂纹长度 (mm)	键合强度	裂纹长度 (mm)	键合强度	
1	15.6	1.91	15	2.23	15.6	1.91	2.01
2	22.03	2.03	22.03	2.03	22.03	2.03	2.03
3	20.4	2.75	21.22	2.35	21.22	2.35	2.48
4	22.03	2.03	22.03	2.03	22.03	2.03	2.03
5	21.22	2.35	21.22	2.35	21.22	2.35	2.35
6	21.22	2.35	21.22	2.35	22.03	2.03	2.24

Table 2. Measurement results of wafer bonding force of Pair 1
表 2. Pair 1 玻璃 - 硅异质晶圆材料晶圆键合力测试结果

角度	90 度	180 度	270 度
裂纹图像			

测量结果显示, 采用上述工艺方法后, 所有键合力平均值 2.19 J/m^2 , 大于 1.8 J/m^2 。

采用超声波扫描显微镜, 通过选取 6 对键合材料键合力进行测试, 分别测量每对键合晶圆的缺陷区域、最大缺陷、键合良品率, 对上述工艺方法加工出的玻璃 - 硅异质晶圆材料键合空洞缺陷进行测试, 测试结果如表 3 所示:

Table 3. Measurement results of wafer bonding hole defects
表 3. 玻璃 - 硅异质晶圆材料晶圆键合空洞缺陷测量结果

编号	缺陷区域(μm^2)	最大缺陷(μm^2)	键合良品率
1	$1.64\text{E}+06$	$1.21\text{E}+04$	99.99%
2	$1.43\text{E}+05$	$8.00\text{E}+02$	99.9994
3	0	0	100%
4	$1.97\text{E}+06$	$8.00\text{E}+03$	99.99%
5	$8.51\text{E}+05$	$1.84\text{E}+04$	100.00%
6	$4.32\text{E}+07$	$2.31\text{E}+06$	99.76%

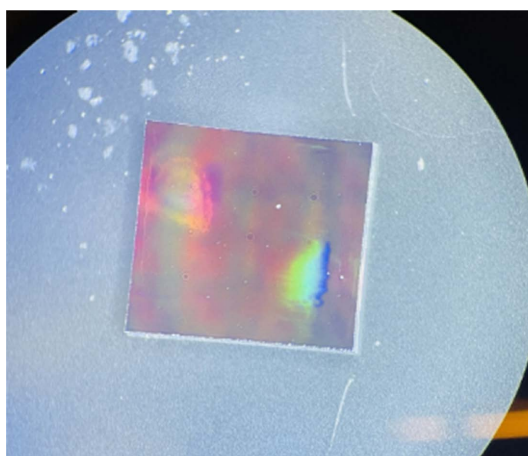


Figure 6. The bond outlived the substrate in the cracking test
图 6. 键合后键合界面状态(良好)

测量结果显示, 键合空洞缺陷 < 5%。

经过切片结果显示, 键合后键合界面状态良好, 如图 6 所示。

5. 结语

本文设计了一种针对硅 - 玻璃为衬底的异质材料的低温键合工艺, 通过在玻璃衬底沉积氧化膜, 预键合时界面间形成氢键连接, 经过后续退火氢键转化为共价键, 实现硅 - 玻璃衬底间的紧密键合, 最终成品键合界面均匀、透明, 键合界面空洞缺陷率小于 5%, 键合力大于 1.8 J/m^2 , 实现硅 - 玻璃晶圆的永久键合, 大大增加了硅 - 玻璃键合工艺的应用范围。

参考文献

- [1] Rowan, S., Twyford, S.M., Hough, J., *et al.* (1998) Mechanical Losses Associated with the Technique of Hydroxide-Catalysis Bonding of Fused Silica. *Physics Letters A*, **246**, 471-478. [https://doi.org/10.1016/S0375-9601\(98\)00533-7](https://doi.org/10.1016/S0375-9601(98)00533-7)
- [2] Gwo, D.H. (1998) Ultra-Precision, Bonding for Cryogenic Quartz Glass Optics. *SPIE Conference on Cryogenic Optical Systems and Instruments*, Vol. 8, 136-142.
- [3] Beveridge, N.L. (2012) Characterization of Silicon-Silicon Hydroxide Catalysis Bonds for Future Gravitational Wave Detectors. University of Glasgow, Glasgow.
- [4] Dari, A., Travasso, F., Vocca, H., *et al.* (2010) Breaking Strength Tests on Silicon and Sapphire Bondings for Gravitational Wave Detectors. *Classical and Quantum Gravity*, **27**, Article ID: 045010. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/27/4/045010>
- [5] Elliffe, E.J., Bogenstahl, J., Deshpande, A., *et al.* (2005) Hydroxide-Catalysis Bonding for Stable Optical Systems for Space. *Classical and Quantum Gravity*, **22**, S257-S267. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/22/10/018>
- [6] Preston, A., Cruz, R., Thorpe, J.I., *et al.* (2006) Dimensional Stability of Hexoloy SA Silicon Carbide and Zerodur Glass Using Hydroxide-Catalysis Bonding for Optical Systems in Space. *SPIE on Optomechanical Technologies for Astronomy*, Vol. 6273, Article ID: 627321. <https://doi.org/10.1117/12.668608>
- [7] Sinha, S., Urbanek, K.E., Krzywicki, A., *et al.* (2007) Investigation of the Suitability of Silicate Bonding for Facet Termination in Active Fiber Devices. *Optics Express*, **15**, 13003-13022. <https://doi.org/10.1364/OE.15.013003>
- [8] Strzelecki, M.T., Magida, M., O'Malley, R., *et al.* (2003) Low Temperature Bonding of Light-Weighted Mirrors. *SPIE on Optical Materials and Structures Technologies*, **5179**, 50-55. <https://doi.org/10.1117/12.506018>
- [9] Veggel, A.A., van den Ende, D., Bogenstahl, J., *et al.* (2008) Hydroxide Catalysis Bonding of Silicon Carbide. *Journal of the European Ceramic Society*, **28**, 303-310. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.06.002>
- [10] Brinkmann, M., Hayden, J.S. and Okano, Y. (2003) Glass Modification Techniques for Photonic Devices. *SPIE on Optical Materials and Structures Technologies*, **5061**, 96-102. <https://doi.org/10.1117/12.517324>
- [11] 章钊. 硅/微晶玻璃阳极键合机理的研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [12] 曾其勇, 郑晓峰. SiO₂ 薄膜制备的现行方法综述[J]. 传感技术学报, 2009, 46(4): 36-40.
- [13] 王同庆, 路新春, 赵德文, 门延武, 何永勇. 300 mm 晶圆化学机械抛光机关键技术研究及实现[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 182-187.
- [14] 戚晓芸. 面向硅基晶片的等离子体活化低温键合及失效机理研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [15] 谷专元, 何春华, 何燕华, 赵前程, 张大成. MEMS 硅玻璃阳极键合工艺评价方法[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(10): 54-56.