

# 微米尺度结构最大抗扭强度的在线测试 和研究\*

阮 勇<sup>1)†</sup> 郇 勇<sup>2)</sup> 张大成<sup>1)</sup> 张泰华<sup>2)</sup> 王阳元<sup>1)</sup>

1) 北京大学微电子学研究院, 北京 100871)

2) 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

(2005 年 7 月 20 日收到, 2005 年 11 月 14 日收到修改稿)

提出了一种新型的测试结构, 对面积为微米量级下键合的最大抗扭强度进行了测试. 实验设计一系列的单晶硅悬臂梁结构测试键合面积在微米量级时的最大剪切力, 键合面为常用的矩形其边长从  $6\mu\text{m}$  到  $120\mu\text{m}$ , 并根据实际移动距离计算得出的最大剪切力, 并实验实际得出最大剪切扭矩和相应的键合面积的曲线, 以及最大扭转剪切破坏应力与悬臂梁加载距离的关系, 并针对  $60\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$  的矩形键合结构进行了加载和位移的重复性实验测量, 两次测量结果符合较好. 微电子机械系统 (microelectromechanical system, MEMS) 器件的设计人员可以根据结论曲线, 针对所需的抗扭强度设计相应的键合面积, 为 MEMS 器件工艺的在线定量测试与设计提供参考.

关键词: 阳极键合, 硅深刻蚀, 键合强度, 最大抗扭强度

PACC: 3520G, 6480G, 8140, 0710C

## 1. 引 言

随着 MEMS 技术的发展, MEMS 器件中微米结构的键合强度成为 MEMS 研究和制造的重要参数, 一些强度检测定义模型和测试结构也相继提出<sup>[1-7]</sup>.

Tong, Gosele 提出使用表面能来评价键合强度如 (1) 式所示<sup>[1]</sup>, 但是因为该强度定义实际针对的是传统整片键合的加工工艺, 并且需要直接测量出测试劈刀插入的破裂尺寸  $L$ , 对于 MEMS 结构所特有的微米级甚至更小的键合尺寸无法直接使用该方法进行工艺监控与评价. (1) 式中  $L$  为破裂尺寸,  $E$  为杨氏模量,  $t_w$  为每个键合片的厚度,  $t_b$  为劈刀的厚度,  $\gamma$  为表面能.

$$L = \sqrt[4]{\frac{3Et_w^3t_b^2}{32\gamma}}. \quad (1)$$

本文设计加工和测试验证了一种新的微米级在线键合最大抗剪强度评价模型<sup>[8]</sup>, 该模型结构的具体实现是使用体硅工艺包括 STS 公司的 ASE (Bosch GmbH 专利) 感应耦合等离子体 (inductively coupled

plasmas, ICP) 硅深刻蚀和硅-玻璃技术阳极键合 (silicon/glass anodic bonding) 技术<sup>[9]</sup>, 对于在线监控 MEMS 体硅工艺中的键合强度的测试结构应具有以下特点<sup>[2]</sup>:

1) 测试结构须根据标准工艺流程制作且具有可在线/在片检测性, 同时不用进行特殊处理.

2) 测试结构只应在片内占很小一部分这样才能保证片上的主要有效单元为实际 MEMS 器件.

3) 测试结构必须是易于检测和验证以使测试结果具有高可信度.

4) 测试结构必须与结构本身的材料无关这样可使用多种材料进行比较.

根据实际微米尺度下键合强度的测试要求, 本文提出了使用悬臂梁结构测试键合最大扭转剪切破坏应力的方法, 并使用探针加载的手段提取了最大剪切扭矩和相应的键合面尺寸关系的曲线, 以及最大扭转剪切破坏应力与悬臂梁加载距离的关系, 并针对  $60\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$  的矩形键合结构进行了加载和位移的重复性实验测量, 两次测量结果符合较好, 该结果具有较高的可信度和实用价值.

\* 国家高技术研究发展计划 (863) 批准号 2004AA404220 资助的课题.

† E-mail: ruanyong@ime.pku.edu.cn

## 2. 模型与实验

针对以上设计在线检测结构的考虑,由于一般 MEMS 器件设计的键合面均为正方形或矩形,本文提出了一种测量键合面抗的最大扭矩的方法.由梁的横向挠度可以求出扭矩,而梁的挠度可以由检测结构上的刻度直接读出.实验中用测试探针推动悬臂梁移动,所加的力是不连续的,因此测出的扭矩只是半定量的,通过对一系列的不同键合面积的测试结构进行实验,可以作出键合面可承受的最大扭矩同键合尺寸的关系曲线,设计者可以根据他们设计的器件对键合面扭矩的需要,直接查该曲线就可以预先设计出键合面尺寸.

### 2.1. 扭矩分析

采用梁理论可推导出扭矩和悬臂梁端部的横向挠度的关系.设施加的剪力为  $Q$ ,力臂为  $l$ ,探针实际测试点距键合面中心长度  $l_1$  (这里  $l_1 \geq l$ ) 处的点的横向挠度为

$$y_1 = \frac{Ql^3}{3EI} + (l_1 - l) \frac{Ql^2}{2EI} \quad (l_1 \geq l), \quad (2)$$

这里  $E$  是体硅的弹性模量,矩形截面的惯性矩为  $I = \frac{hb^3}{12}$ ,式中矩形高为  $h$ ,宽为  $b$ .根据(2)式可以反算出剪力为

$$Q = \frac{6EI}{3l_1l^2 - l^3} y_1 \quad (l_1 \geq l), \quad (3)$$

这里横向挠度  $y_1$  可以直接观测得到.扭矩为

$$M_l = Ql = \frac{6EI}{3l_1l - l^2} y_1. \quad (4)$$

为了确定采用梁理论计算探针所施加剪力的精度,使用算例当  $E = 1.75 \times 10^5 \text{ MPa}$ ,  $b = 30 \mu\text{m}$ ,  $l_1 = l = 290 \mu\text{m}$ ,  $l = hb^3/12$ ,  $h = 76 \mu\text{m}$ ,端部位移  $y = 1 \mu\text{m}$  时,我们分别用以上的梁理论的计算公式和实体单元来模拟阳极键合后的体硅梁和玻璃衬底模型,计算了相应的横向作用力.由(2)式得出的剪力为  $Q = 2454 \mu\text{N}$ ,采用实体单元有限元分析模拟计算出的作用力为  $2339.5 \mu\text{N}$ ,两个结果的相对误差为 4.9%,这样的误差是可以接受的,所以设计检测结构时采用梁理论来计算所施加的横向作用力是可行的.如果进一步考虑得到更加精确的结果,也可以采用有限元方法,直接用实体单元来计算梁端横向位移所对应的横向力.因此可认为,根据梁理论结合实际测试

数据计算所得的实际抗扭强度与相应键合面尺寸的关系曲线是具有较高可信度的设计参考曲线.

#### 2.1.1. 键合面剪切强度测试结构

将悬臂梁结构和测试其偏转量的阶梯状标尺同时加工完成,测试时使用探针台设备,在悬臂梁未固定的具有定位功能的一端使用探针施加载荷,同时通过显微镜或 CCD 连出的监控设备,由阶梯状标尺测出相应的悬臂梁偏转量,直至探针施加载荷将悬臂梁破坏,测试记录此时的悬臂梁偏转量,使用梁理论可计算出该偏转量对应的最大抗扭转强度,该强度又对应一定的键合面积,因此可以得出实际抗扭强度与相应键合面积的关系曲线.

可使用具有测力功能的探针加载,采取实际测试方法,提取加载力和破坏剪力的位移参数曲线关系,这样结果更具有指导作用,可为 MEMS 器件的抗扭转剪切的设计提供设计参数.

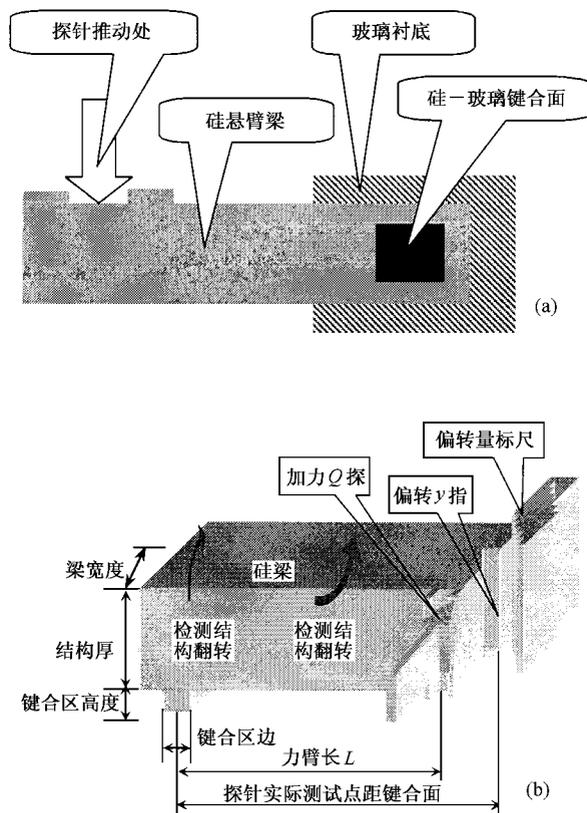


图1 (a)键合剪切强度测试结构版图示意图(俯视图)(b)测试结构加载实验示意图(立体示意图)

#### 2.1.2. 测试结构加工及工艺流程

测试结构在具体加工时,首先采用 ICP (induction coupled plasma)干法刻蚀或 KOH 湿法腐蚀,在单晶硅表面定义出需要硅-玻璃阳极键合的台

阶区域,台阶高度差  $4 \pm 0.5 \mu\text{m}$ ,为了产生良好的欧姆接触,减小接触电阻,在硅表面进行注入,玻璃上光刻后溅射 Ti/Pt/Au 厚度分别为  $400\text{\AA}/300\text{\AA}/900\text{\AA}$ ,剥离形成金属图形,后硅-玻璃阳极键合,键合是在

1200V 电压,一个大气压  $380^\circ\text{C}$  下,用 SUSS SB6 型键合机完成的,硅-玻璃键合后 KOH 减薄,硅结构实际余  $75 \pm 0.5 \mu\text{m}$ ,硅片面溅铝,光刻并腐蚀铝,使用铝做掩膜,硅结构 ICP 刻蚀穿通释放.具体工艺流程见图 2.

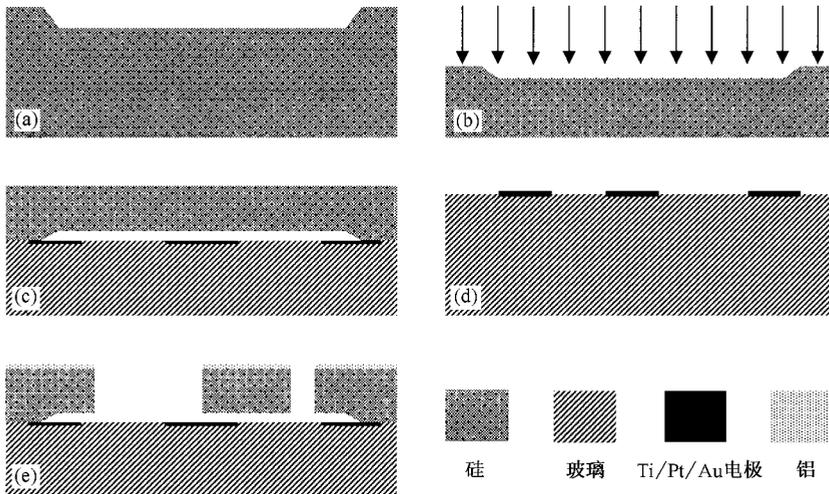


图 2 使用硅玻璃阳极键合与硅深刻蚀技术的测试结构工艺流程 (a)浅台阶刻蚀( $4\mu\text{m}$ )(b)表面注入(c)剥离形成剥离上的金属电极(d)硅-剥离阳极键合,硅片渐薄(e)光刻形成铝图案,CIP 刻蚀穿通,结构释放

本文硅干法刻蚀工艺特别使用了 STS 公司开发的 ICP-ASE 工艺进行(Bosch GmbH 专利),该工艺可以分为两个独立的步骤,第一步是钝化(见(5),(6)(7)式),第二步是刻蚀(见(8)(10)(11)式),在刻蚀机内部会将这两步工艺交替并持续进行,通过  $\text{C}_4\text{F}_8$  电离分裂进行钝化,在刻蚀结构侧壁和表面淀积聚合物层( $\text{C}_x\text{F}_y$ ),在刻蚀步骤, $\text{SF}_6$  中的 F 自由基各项同性刻蚀硅表面.

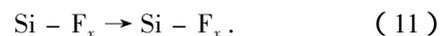


表 1 是使用 STS 公司 ICP 刻蚀设备时的一些基本参数.

表 1 ICP 刻蚀参数表

离子源功率/W	承台功率/W	$\text{SF}_6/\text{sccm}$	$\text{C}_4\text{F}_8/\text{sccm}$	$\text{O}_2/\text{sccm}$
660	13	130	100	19.5

### 3. 实验与测试

测试结构是一系列单晶硅悬臂梁的结构,首先使用了实验室中常用的测试探针平台,在测试单端固支悬臂梁结构的一端,用探针横向加载推力,使用刻度读出悬臂梁的移动距离,从而根据公式得出扭转剪力大小,探针持续加载,直至悬臂梁结构完全断裂,可以测出该键合面积的最大抗扭转剪切的强度.图 3(a)是测试结构的实际加工结果的局部照片,可

以看出悬臂梁测试结构和相应的检测标尺(b)是在通过最大抗扭实验后的断裂破坏结果的 SEM 照片,可看到在玻璃衬底上留下部分硅残余.

图 4(a)(b)(c)(d)是选取的部分典型断裂破坏结果(a)为断裂发生在玻璃面内(b)为玻璃和硅界面均有(c)为玻璃和硅界面中硅界面残余较多(d)为硅悬臂梁在根部断裂,而硅-玻璃界面没有发生断裂.

为了精确得到悬臂梁加载载荷的精确值,在测试实验中使用了中科院力学所非线性实验室(Lab of

Nolinear Mechanics ,LNM )开发的微拉伸仪又名超微力材料试验机( super micro-tester ,SMT ),该设备是由中科院力学所自行研制的进行微尺度材料力学性能测试的仪器.其设计初衷是为了进行微尺度试样的拉伸测试 ,但实际上 SMT 提供了一个微小载荷和位移的测试平台( 图 5( a )). 针对不同试样的测试需要 ,除拉伸测试之外 ,SMT 还可以实现弯曲、剪切等测试方式 .SMT 的最大载荷可以达到 1.5N 左右 ,载荷的最高分辨力约  $7\mu\text{N}$  ,位移量程  $600\mu\text{m}$ . 另外 ,配

合全场光学测量系统见图 5( b ) ,用该仪器进行了微悬臂梁的实时、全场测量的弯曲破坏试验 ,可以实时观察到微悬臂梁在整个加卸载过程中普通纳米压痕仪无法实现的全场的破坏变形情况. 加载探针与实测载荷的关系曲线 ,在每个不同键合面积所对应的最大载荷即为最大扭转弯曲剪切破坏应力 ,见图 6 ,为了验证载荷加载时的精确性和重复性 ,又对键合面积为  $60\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$  矩形结构的进行了重复加载实验 ,两次重复实验结果符合 ,见图 7 .

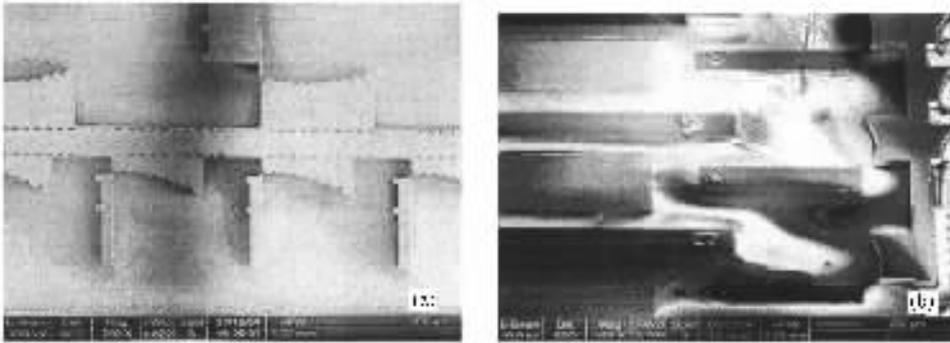


图 3 ( a )部分键合强度测试结构系列加工结果 ( b )部分断裂破坏结果的 SEM 照片

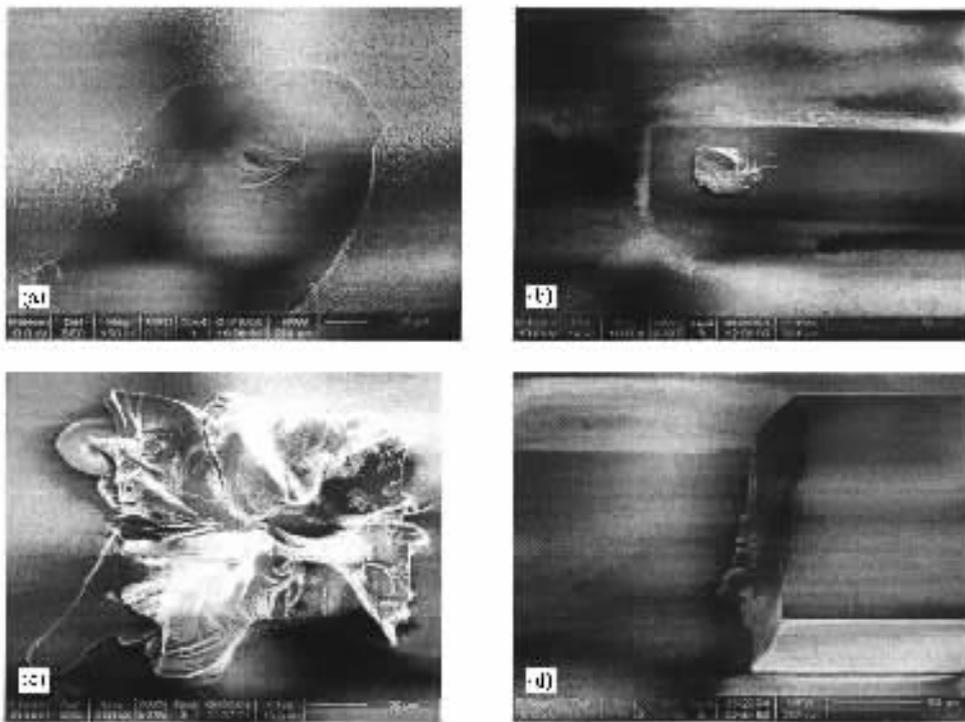


图 4 典型部分正方形键合尺寸断裂结果 FIB 照片( 玻璃表面 ) ( a )键合面积为  $200\mu\text{m}^2$  ( b )键合面积为  $40\mu\text{m}^2$  ; ( c )键合面积为  $100\mu\text{m}^2$  ( d )键合面积为  $110\mu\text{m}^2$

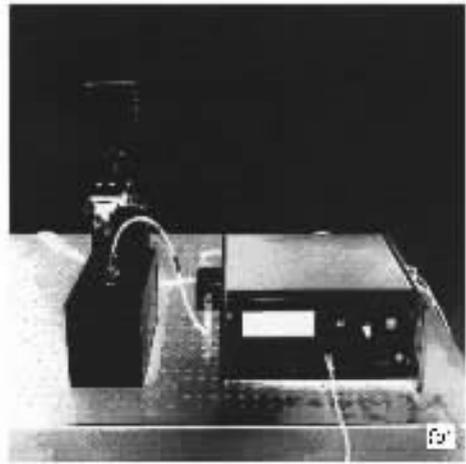
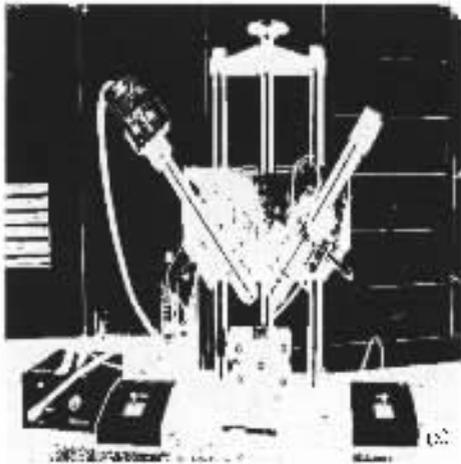


图 5 (a)微拉伸仪 (b)全场光学测量系统(面内和离面位移测量)

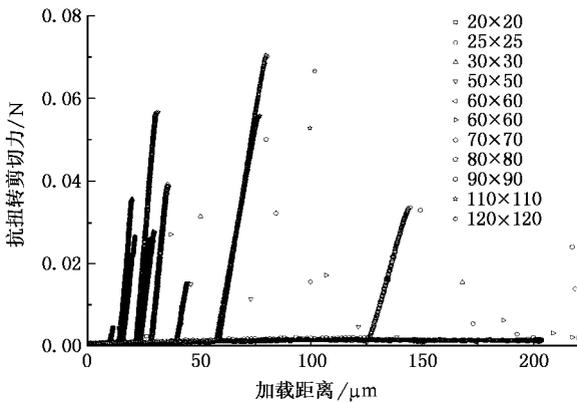


图 6 典型键合面积时探针加载距离与悬臂梁抗扭转剪切力关系曲线

该测试方法提取的键合最大抗扭强度具有高可信度和高实用价值。

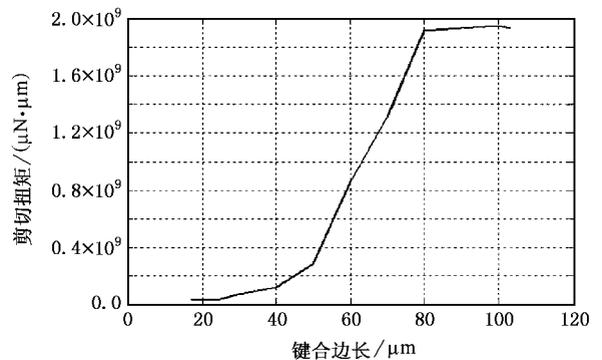


图 8 最大剪切扭矩与对应正方形键合边长的关系曲线

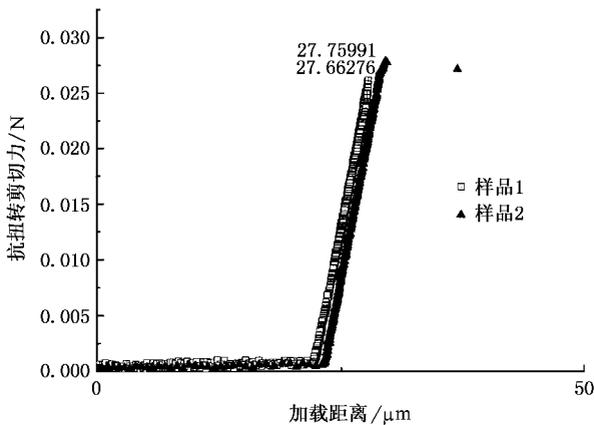


图 7 60μm × 60μm 键合面积探针加载距离抗扭转剪切力重复性曲线

### 4. 结 论

通过北京大学微米/纳米加工国家级重点实验室的标准体硅工艺流程(包括硅-玻璃阳极键合、硅 ICP 深刻蚀)制作出一系列的单晶硅悬臂梁结构,测试探针推动悬臂梁移动的距离实验表明:在正方形键合面积边长小于 15μm 时,工艺流程实验结果很不稳定,证明键合结构不适合设计为边长小于 15μm 的尺寸;在键合结构大于 15μm 时,实验通过探针加力,如果键合面本身没有断裂,而断裂是发生在键合面附近的玻璃或体硅内部,则说明键合面的强度大于相应玻璃或体硅的强度,设计时可直接按照玻璃或体硅的强度来估计键合面弯曲强度,设计测试实验的悬臂梁结构移动距离的实验参数是经过重复性

根据扭转剪切公式(4)和实测结果  $Y_1$ , 可以计算出相应矩形边长下的最大抗扭强度,如图 8 所示,

实验得出的平均结果,具体数据见表 2. 根据表 2 由我们的扭转测试结构得到的键合面极限扭矩与键合面面积的关系曲线见图 8,目前所做的工作主要集

中在硅-玻璃键合后最大抗扭强度的测试方面,为了更加全面的在线反映实际加工后的键合质量,在以后的研究中需要加入抗纯剪切和抗弯的测试和总结.

表 2 单端固支梁纯键合强度部分测试结果

分组和序号	键合面积 (长×宽) $l/\mu\text{m}$	单端固支梁 (长×宽×厚) $l/\mu\text{m}$	单端固支梁 $l_1/\mu\text{m}$	单端固支梁 $l_2/\mu\text{m}$	单端固支梁移动 距离 $\gamma l/\mu\text{m}$	结构破坏讨论	
1	①	6×6,36	300×26×76	227	297	6	键合面无痕迹
	②	8×8,64	300×28×76	226	296	9	键合面无痕迹
	③	9×9,81	300×29×76	226	296	6	键合面无痕迹
	④	13×13,169	300×33×76	224	294	6	键合面无痕迹
	⑤	17×17,289	300×37×76	222	291	15	硅玻璃面(玻璃残余多)
	⑥	20×20,400	300×40×76	220	290	12—15	硅玻璃面(玻璃残余多)
	⑦	25×25,625	300×45×76	217.5	287.5	9—12	硅玻璃面(玻璃残余多)
	⑧	30×30,900	300×50×76	215	285	12	硅玻璃面(玻璃残余多)
2	①	40×40,1600	680×100×76	566	671	15—16.5	临界点
	②	50×50,2500	747×150×76	607	712	12	硅玻璃面(硅残余多)
	③	60×60,3600	761×200×36	596	701	15	硅玻璃面(硅残余多)
	④	70×70,4900	795×250×76	605	710	12	硅玻璃面(硅残余多)
	⑤	80×80,6400	804×250×76	614	719	18	硅玻璃面(硅残余多)
3	①	90×90,8100	1671×300×76	1456	1551	15—18	硅玻璃面(硅残余多)
	②	100×100,10000	1688×400×76	1423	1518	15—21	硅玻璃面(硅残余多)
	③	110×110,12100	1709×400×76	1444	1539	21	单晶硅梁断裂
	④	120×120,14400	1714×400×76	1449	1544	15—18	单晶硅梁断裂

特别感谢黄伟同学的有益讨论和北京大学微电子学系纳米/微米加工国家级重点实验室李婷、王颖等老师对论文

工作的帮助.

- [1] Tong Q Y, Gosele U M 1999 John Wiley & Sons
- [2] De Boer Maarte P, Jensen Brian D, Fernando bitsieDong 1999 SPIE Proceedings Materials and Device Characterization in Micromachining, 3875. 97 – 103
- [3] Weihs T P, Hong S, Bravman J C, Nix W D 1988 *J. Mater. Res.* **3** 931
- [4] Ericson F, Schweitz J A 1990 *J. Appl. Phys.* **68** 5840
- [5] Wilson C J, Ormeggi A, Narbutovskih 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 2386
- [6] Bromley S C, Howell L L, Jensen B D, Howe R T 1998 *Mater. Res. Soc. Proc.* **518** 197
- [7] Wilhelm Seifert and Henrik Albrecht 2003 Proceedings of the SPIE. 5045 183 – 190.
- [8] Ruan Y, Zhang D C, Hao Y L, Luo K, Wang W, Li T, He X F, Hu W, Wang Y Y, P. R. China. Patent application No. 2004100390259.
- [9] Docker P T, Kinnell P, Ward M C L 2003 *J. Micromech. Microeng.* **13** 790

# On line measurement of maximal torsional strength of micro level structure<sup>\*</sup>

Ruan Yong<sup>1)</sup> Huan Yong<sup>2)</sup> Zhang Da-Cheng<sup>1)</sup> Zhang Tai-Hua<sup>2)</sup> Wang Yang-Yuan<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China*

<sup>2)</sup> *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science Beijing 100080, China*

(Received 20 July 2005; revised manuscript received 14 November 2005)

## Abstract

In the design and fabrication of microelectronic system (MEMS) devices, the process based on silicon is a main technology which draws great attention of researchers. Bonding technology including silicon to glass and silicon to silicon is fundamental for bulk silicon MEMS devices. For MEMS devices, the bonding area is from the micrometer to millimeter scale, thus traditional methods to test bonding strength are no longer feasible. Measuring the strength at that scale has become the bottle-neck for MEMS development. We first define a new way, with which a series of single crystal cantilever beam was taken to test the maximal shear stress of bonding strength in the micro area. The experiment gives curves of torsional strength versus the bonding area and torsional strength versus the probe movement distance, the designer can use them to determine the bonding area according to the required torque for their MEMS devices.

**Keywords** : anodic bonding, DRIE, bonding strength, maximal torsional strength

**PACC** : 3520G, 6480G, 8140, 0710C

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2004AA404220).