

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.04.003

MEMS 阳极键合界面层的力学行为研究进展

胡宇群 董明佳

(南京航空航天大学民航学院,南京,210016)

摘要:回顾了微纳机电系统(Micro/Nano electro-mechanical system, MEMS/NEMS)器件工业中所用键合技术的发展和应用,总结了作为其中关键键合技术之一的阳极键合在微纳系统中的重要作用及其主要特点,分析了阳极键合的机理以及所涉及的力学问题,如键合力(静电力、表面力等)作用下的表面粘着;电场作用下接触界面处粒子的扩散、反应;键合界面层中的残余应力等。阳极键合界面层的力学行为及特性直接关系到 MEMS 器件中微机械结构的安全与可靠性。对这些问题的研究,有助于更好地理解阳极键合,为 MEMS/NEMS 器件的设计、制造加工以及实际应用提供许多有益参考。

关键词:微型机电系统;阳极键合;力学行为;键合技术

中图分类号: V556.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2615(2015)04-0474-13

Research Progress on Mechanical Behavior of MEMS Anodic Bonding Interlayer

Hu Yuqun, Dong Mingjia

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The paper gives a review on the development and application of bonding techniques in micro/nano electro-mechanical system(MEMS/NEMS) industry, and summarizes the importance and the main characteristics of anodic bonding as one of vital important bonding techniques. The paper also points out the mechanical problems involved in anodic bonding, such as surface contact adhesion under bonding force (electrostatic force, surface force, etc.), particle diffusion or reaction at contact interface under electrical field, residual stress in the bonding interface, and so on. Mechanical behavior and properties of anodic bonding interface layer are directly related to the safety and reliability of micromechanical structures in MEMS devices. The studies of these problems are helpful to better understand the mechanical behavior of anodic bonding, and also give more informative data for the design, fabrication and practical application of MEMS/NEMS devices.

Key words: micro electro-mechanical system; anodic bonding; mechanical behavior; bonding technology

1959年,美国著名物理学家、诺贝尔奖获得者 Feynman 教授在他的题为“*There's Plenty of Room at the Bottom*”的著名报告^[1]中,提出了微机械技术的设想。在过去的几十年里,以微纳机电

系统(Micro/Nano electro-mechanical system, MEMS/NEMS)技术为代表的微纳系统技术取得了长足的进步,并正朝着量子电子机械系统(Quantum electro-mechanical system, QEMS)的

基金项目:国家自然科学基金(11272144)资助项目;江苏省自然科学基金(BK2011737)资助项目。

收稿日期:2015-07-01;**修订日期:**2015-08-01

作者简介:胡宇群,男,教授,博士生导师,主要研究方向:微系统力学、飞机一体化设计技术、飞机结构设计及微型飞行器。

通信作者:胡宇群,E-mail: hyq@nuaa.edu.cn。

方向发展。MEMS 技术不仅成为了 NEMS 及 QEMS 的技术基础,而且已经成为它们与宏观应用之间连接的关键桥梁。

MEMS/NEMS/QEMS 所展现出的诱人应用前景,正在有力地推动着微纳科学技术的发展。目前,作为微纳技术基础的 MEMS 技术已经在许多领域中有了实际的应用,如航空航天、汽车、信息通讯、生物技术、医疗及分析诊断等领域。涌现了许多基于 MEMS 的各种微器件系统,如压力传感器^[2]、流量传感器^[3]、应变传感器^[4]、惯性运动传感器^[5]、电场磁场传感器^[6-7]、太阳传感器^[8]、微致动器^[9]、RF 开关和生物芯片^[10]等。与此同时,在 MEMS 技术基础上有望研发出各种符合实际应用要求的 Bio-MEMS、NEMS 和 QEMS 器件系统。

虽然以 MEMS 基础的微纳电子机械技术目前已经取得了巨大的进步,但它仍然是一项相对较新的技术,在许多方面尚未成熟^[11],许多 MEMS 器件还远未能实现成功的商用化,而 NEMS 和 QEMS 器件离成功实用阶段更是存在一段较长的距离。微纳器件系统在许多领域的应用受到了很大的限制,尤其是在军事和航空航天等领域,这主要是出于对它们可靠性的考虑。微纳器件要成功商用化的关键在于保证它们在各种载荷环境下的可靠性^[12],尤其是在振动^[13]和冲击载荷^[14]环境下。到目前为止,大多数对 MEMS/NEMS 器件研究的主要力量集中在发展先进制造技术和实现功能特性上,只是到了近几年,实际的应用对这类微纳器件提出了越来越高的要求,器件的可靠性和耐久性问题才开始得到关注^[15]。而微纳器件的可靠性和耐久性与其设计和制造加工密切相关。

MEMS 器件的加工技术是在传统集成电路工艺基础上,融合其他各种微加工技术而发展起来的。传统集成电路主要采用的是基于硅表面的平面工艺,而 MEMS 器件的制造所需要的则是突出深度方向加工能力的三维加工技术。MEMS 中的关键制造技术包括了体硅微加工技术(如湿法和干法刻蚀等)、表面硅微加工技术、键合技术、光刻电铸成型和牺牲层光刻电铸成型^[16]等。这些 MEMS 关键技术涉及到了微电子学、材料学、物理学、力学、化学、生物学及精密机械学等诸多学科领域,提出了许多的科学问题。微纳系统力学便是其中的重要科学问题之一。要成功地实现 MEMS 产业化,需要建立相应的理论基础,解决 MEMS 涉及到的微纳系统力学问题。微纳系统力学是一门涉及微尺度力学、微电子学、物理学、自动控制、精密

机械学及摩擦学等的交叉学科,它的研究和发展将有力地促进 MEMS 技术的进步,亦将极大地推动 NEMS 和 QEMS 技术的发展。

1 晶片键合技术的发展和應用

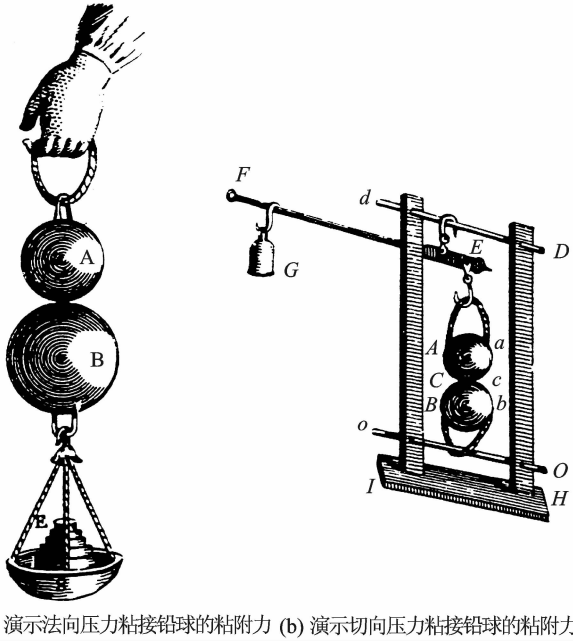
MEMS 中的键合通常是指用于制造 MEMS 器件的材料晶片间的晶片级键合(Wafer-lever bonding,或 Wafer-to-wafer bonding),如硅-硅键合、硅-玻璃键合、金属-玻璃键合等。晶片键合(Wafer bonding)方法最初是为了制造绝缘衬底上的硅(Silicon-on-insulatorsubstrate, SOI)基片而开发的一种加工技术,但是这一技术现在的应用领域已远远超出了原有制造 SOI 基片的局限,目前它已经发展成为一项广泛应用于 MEMS 结构材料间接合的、灵活而成熟的技术^[17],成为了 MEMS 器件加工中的关键技术之一。

晶片键合工艺成为 MEMS 加工中关键工艺的历史并不长,而且最早的键合现象也不是出现在硅和硅之间。在许多世纪以前,人们就已经发现了所谓的键合现象,并且开始对此加以应用^[18]。早在 1230~1240 年间,圣芳济会的修道士 Anglicus(中世纪百科全书编纂者之一),强调了在连接银和金的过程中洁净度的重要性^[18-19]。他指出,在连接金片与银片时,需要避免灰尘、空气和湿气。如果这两种金属片间存在任何的灰尘、空气和湿气,那么它们将不能被连接成为一体。

Galilei^[20]曾借助理想实验讨论了固体平面间的粘着,导出了固体的内聚力。他认为两个绝对平整的平面,例如经过抛光得到的平整光滑的大理石、金属或玻璃平面,如果相互接触,将会发生相互粘着,而在表面粗糙的两平面间则不会发生类似的粘着。伽利略将这种粘着归因于相互接触的光滑平面间存在的真空,并由此得出了有关固体内聚力的结果。

Desaguliers^[18,21-22]在重量各自为 1 磅和 2 磅的两个铅球上分别磨出了直径约为 0.25 英寸的平面,并在这两平面相互贴住后,通过用手拧动铅球,成功地将它们连接在一起。Desaguliers 还证明,要拉开这样粘接的两铅球所需要的应力与拉坏完整铅块相同。图 1 为 Desaguliers 在英国皇家学会演示铅球粘接实验的示意图^[22]。在所有这类实验中,所用的金属需要具有一定的延展性,以便能够产生足够的塑性变形,使两物体在接触界面处形成紧密接触,从而能在两接触面间形成牢固的金属键,实现互相固接的目的。这也是脆性材料无法采用冷焊加工的重要原因。1734 年,Desaguliers 在实验中观察到,两个相

互不断摩擦的表面,当被磨得足够光滑后,亦会发生相互粘连,导致摩擦力急剧增大。而在这种粘连发生之前,它们之间的摩擦力则会随表面粗糙度的降低而减小^[22]。这也意味着如果有更好的抛光技术,脆性材料间也可能进行类似的键合^[18]。



(a) 演示法向压力粘接铅球的粘附力 (b) 演示切向压力粘接铅球的粘附力

图1 Desaguliers 在英国皇家学会演示的铅球粘接实验^[22]

Fig. 1 Desaguliers' demonstration of adhesion of lead in Royal Society^[22]

19世纪,当时新兴的光学工业界都已经知道,将玻璃抛光到光学镜片级品质后,玻璃片之间会因粘着而产生足够大的摩擦力^[23]。同样地,在具有镜片级表面,用于测量长度,被俗称端片的长度规之间亦可以发现类似的粘着现象。这些物体间发生的粘着在当时被认为是一种令人讨厌的现象。由于这类现象在日常工作中愈发频繁的出现,1930年,Obreimoff^[24]参照玻璃间的光胶现象,开始发表他在云母表面能方面的工作。他的研究报告表明,当两片刚分开的云母薄片放在一起时,同样可以观察到类似的粘着接触现象。同时他也在报告中提出了将要解答的问题:分开两片处于光胶的云母薄片所需要的力,是否跟分开新鲜云母片所需要的力相同。为了测量云母的断裂表面能,Obreimoff采用了如图2所示的实验方法。厚度为 h 的玻璃被楔入到厚度为 d 的云母层与母体的键合界面处。他发现,云母的表面能发生戏剧性地减小:在真空中分离的表面能为 $5.0 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$,而在环境大气压中则降至 $0.38 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 。“键合”云母的表面能接近上述在大气中所测得的数值。

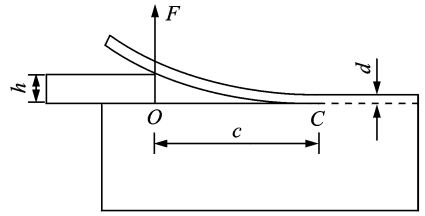


图2 Obreimoff著名的云母片分离实验示意图^[18]

Fig. 2 Obreimoff's famous splitting experiment on mica^[18]

1936年,Rayleigh^[25]对室温环境下载玻片之间的粘着进行了详尽而科学的研究。通过测定室温下键合界面的光反射性质,得出键合玻璃片之间的平均间隙大约为 $10 \sim 30 \text{ \AA}$ 。即使将样品用力压合,这个间隙亦不再减小。他比较了在低于玻璃软化点的温度下退火的样品后,推断出了键合界面处的原子间隙。他认为室温下键合的石英片之间的粘着力,可以通过测量拉伸强度和剥离功(结合能)的方法得到。他的详尽的研究报告可以被认为是关于晶片键合的开创性论文^[18]。这项研究当初并未得到人们的重视,以致连他的传记作者都没有意识到这一工作的意义^[26]。

随后的几十年里,类似的键合方法只是偶尔被当作一种专用的连接技术,在科学文献中被提及。飞利浦研究实验室(Philips Research Laboratories)曾经采用了键合的方法来连接He-Ne气体激光器中的反射镜与石英玻璃管体^[27]。在经受了至少几千个小时的工作使用后,这种室温键合依然能够保证激光器的真空密封程度^[28]。Antypas和Edgecumbe^[29]的工作通常被认为是最早采用晶片级键合方法来转移外延层的研究。为了制造透射光电阴极,他们先在GaAs基底上利用外延生长得到GaAs/AlGaAs双层,然后在高温下将这样的双层与玻璃基底进行键合。这一层AlGaAs可以在GaAs基底的化学法清除工序中,充当腐蚀停止层。外延转移技术目前已经得到普遍应用,例如应用在外延剥离(Epitaxial lift-off, ELO)^[30]中。Antypas和Edgecumbe^[29]的工作,以及在他们之后Liau和Mull^[31]所进行的研究,一般被认为是III-V族化合物半导体晶片键合的开端。

虽然键合现象的发现已有悠长的历史,但是直到20世纪80年代,现代晶片键合技术的发展才由两篇报告^[32-33]中的工作而被触发。图3给出了微机电系统中常用的晶片键合技术分类,它可以分为直接键合和间接键合^[34]。

Shimbo等^[32]最初进行晶片键合研究的目的

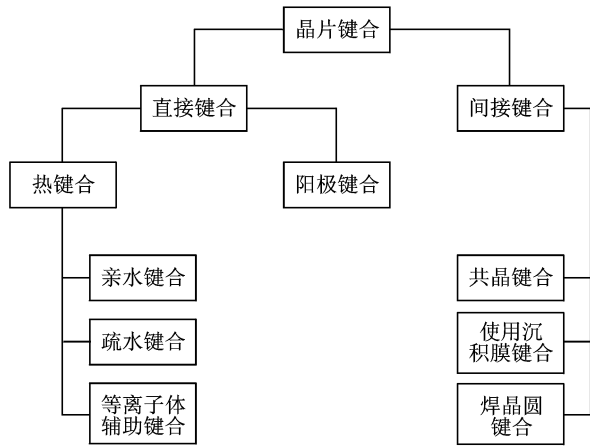


图3 晶片键合技术分类

Fig. 3 Classification of wafer bonding technology

是为了在 SOI 工艺流程中制备与整块晶片相同品质的器件层。集成电路中的多数电子器件只利用了标准晶片上很小的厚度。保持小厚度电子器件与工作晶片之间的绝缘可以带来许多优点。首先是具有较好的耐辐射性,这是由于大大降低了对辐射所产生的电子-空穴对的敏感性。这一点对军事领域的应用尤为重要。同时,工作电压的降低、高低压器件的集成和器件集成度的提高亦有利于器件产品的商业化用途。为了展示 SOI 基片制作的新方法,Lasky^[33]将表面经过热氧化处理的晶片与工作晶片进行键合。键合后的晶片用化学方法减薄,只在氧化层上保留很薄一层单晶。减薄之前,室温键合的晶片需要在 700~1 050 °C 的温度下进行键合强化。

Shimbo 等^[32]试图利用晶片直接键合的方法来替代基底中参杂剂的深扩散以及器件工艺中厚外延层的生长。通常让带有自然氧化层的晶片的待键合表面在室温下发生相互接触,然后将它们放在 1 000~1 100 °C 的温度下进行退火,以形成共价键,融合中间氧化层。

晶片键合被视为可以解决微电子和 MEMS 加工领域中诸多难题的一类有效方法。它的发展为微系统开辟了一个新领域,亦令这项古老的连接技术获得了新生^[18]。

2 晶片键合技术在 MEMS 中的应用

MEMS 中的微机械加工技术大部分是针对硅材料体系,主要是由于 MEMS 系统的发展源于硅集成电路工业。在硅的微机械加工领域,大体可分为体硅工艺和表面工艺,它们都要涉及到对制造材

料进行有目的的增加(如材料生长、淀积或蒸镀等)或减除(如各种刻蚀等),键合技术的引入,则极大地拓展了 MEMS 器件加工制造及设计研发的理念。

MEMS 中晶片键合主要包括热键合和阳极键合^[16]。在 MEMS 制造领域,晶片直接键合最初被用于压力传感器的封装^[35]。它们的键合通常在低于 450 °C 的温度下完成。这些传感器的封装,有些采用电场辅助的阳极键合完成,有些采用金属薄膜(如金等金属)做中间层,并在共晶温度下热键合而成。Motorola 的一款微机械压力传感器曾采用玻璃熔料进行了封装键合^[36]。在传感器工业,封装费用往往占据了整个器件制造成本的很大比例。利用晶片级封装,可以同时实现大量传感器或致动器的封装,避免昂贵的芯片级封装,以利于大幅度削减器件的制造成本。

Petersen 等^[37]报告了晶片键合方法在压力传感器制造中的应用。他们采用在高温下将制备有压敏电阻的薄层硅同基底硅直接键合的方法,加工出了 MEMS 压力微传感器。与 Gragg 等^[36]采用传统体硅工艺的压力传感器相比,Petersen 等的压力传感器因为采用直接键合工艺而带来一些有益之处^[35]。利用直接键合方法也同样可以形成绝对压力传感器的标准空腔,但是这一空腔的深度(1~10 μm)可以远远小于传统体硅工艺器件所需要的深度(约 500 μm)。这样带来的好处便是密封腔的下表面可以起过压止停的作用。一旦遇到过大的压力,敏感膜能够接触到空腔下表面的基底,防止压力传感器的灾难性失效。与此同时,键合可以利用压力传感器的核心单元——敏感膜来达到晶片级的封装。Petersen 等的这种压力传感器有几个值得注意的优点。一方面,由于硅片刻蚀的各向异性导致了压力传感器中所需空腔的倾斜侧壁的形成,因此典型的传统体硅工艺压力传感器其芯片尺寸超过 1 mm。而 Petersen 等的这种器件可以做到较小的芯片尺寸(约 200 μm),并且敏感膜的大小可以通过等离子浅刻蚀实现,较之传统体硅方法能更好地控制敏感膜的尺寸。另一方面,出于强度方面的考虑,敏感膜需要被加工成圆形。这在传统体硅方法加工的器件中无法做到,而 Petersen 等利用键合的工艺却可以实现。虽然采用多晶硅表面工艺也有可能实现类似结构^[38],但是晶片键合工艺方法可以使用单晶硅做敏感薄膜,这样可以更好地控制结构的力学性能,并且可以在单晶硅敏感膜上用扩散法制备出压敏电阻。

采用晶片键合方法加工的 MEMS 微传感器种

种类繁多。微机械加速度传感器便是其中较为重要的一类。在这类传感器中,键合不仅用来固定器件中的机械挠曲变形结构,而且被用来在传感器过载时,实现对质量块的止停等,同时亦能极大地改善器件制造的工艺性和器件的封装性能^[39]。图4所示为Barth等^[39]研究的一种压阻式微机械加速度计结构示意图。

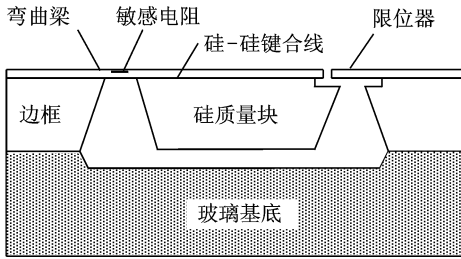


图4 一种微机械加速度计结构剖面示意图
(根据文献^[35, 39]绘制)

Fig. 4 Structure profile of micromechanical accelerometer
(according to Refs. ^[35, 39])

晶片键合同样可以被用来制作射流微器件所需的多层晶片。用晶片键合制造的射流器件中最简单的结构便是微流道。在一侧或双侧基片上刻蚀出若干微小沟槽和通孔,通过晶片键合后即可形成完整的微流道。如图5所示的是利用玻璃与硅键合制作的微流道示意图。诸多的实际应用中大量采用了类似的键合结构,如喷墨打印机的喷头、生物医疗器件和微小生化分析系统等^[40-42]。在很多实际应用中,利用晶片间的键合实现了复杂的微射流器件的加工^[43]。而更复杂的微器件则可以通过多层基片的直接键合加以实现。Huff等^[44]的静电阀门中键合了4层晶片,在Epstein等^[45]的高转速微型发动机中尝试了7层晶片间的键合,而在Lerou等^[46]报告的微机械化学反应器中,键合晶片的层数更是超过了20层。

晶片键合技术通过原子间近距离作用力将异

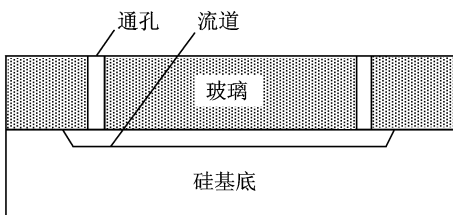


图5 采用晶片键合加工的微流道结构示意图
(根据文献^[35]绘制)

Fig. 5 Structure diagram of flow channels formed by silicon-glass bonding (according to Ref. ^[35])

质半导体材料集成在一起,降低了光电子集成的难度,提高了器件性能。但是随着键合晶片面积的增大,热应力也会随之增强,小面积的键合已经限制了器件的发展,低温晶片键合技术是未来晶片键合技术的重要研究方向。此外,使用晶片实现多层不同性质材料间的连接也是晶片键合技术的发展方向之一。

3 MEMS 中的阳极键合

阳极键合,亦被称为静电键合或场助键合^[47]。它是指在一定温度下,在相互紧密接触的半导体(通常为单晶硅)、金属(或合金)与玻璃(常用如Pyrex7740玻璃)两侧施加一定强度的静电场,以实现两者互相连接的一种MEMS工艺。阳极键合方法自从1969年由Wallis等^[47]提出以来,现已逐渐发展成为一种用于MEMS器件加工的重要技术^[16, 47-49]。目前,在半导体器件工业,尤其是在MEMS/NEMS领域,阳极键合方法被用于在较低工艺温度下,实现半导体(如Si, GaAs等)、金属(或合金)与玻璃(常用的如Pyrex7740玻璃)等材料之间的固接。

作为MEMS键合工艺中的一种核心键合工艺,阳极键合在MEMS器件制造中被广泛用于实现微结构的机械或电气连接、微结构或微器件的封装,而无需使用其他任何粘接剂。它的工艺过程相对简单、成本低,可以在较低的工艺温度下进行^[50](低于玻璃的软化温度、键合材料的熔点或键合材料的共晶温度),有利于尽可能减小过高的工艺温度,对微系统内所集成的微电子器件的不利影响(硅基集成电路工艺的最高温度极限约为450℃)。低温和快速的特点缓解了传统焊接方法的材料热物理性能不匹配问题^[51]。低温键合可与硅半导体器件的常规工艺兼容。阳极键合已成为基于体硅工艺的MEMS器件的标准加工工艺,用于制造诸多种类的MEMS传感器,如微加速度计^[5]和微陀螺仪^[52]等惯性传感器、微机械压力传感器^[2]及微流量计^[3]等。

在MEMS器件中,通常把实现玻璃基底、金属和硅等固定连接的结构统称为锚。锚结构是MEMS器件中的主要结构形式之一。阳极键合是目前MEMS器件中锚结构加工的主要方法。如图6中所示,白色圆圈处便是一种电容式MEMS微加速度计上的典型微尺度锚,它们起到两个重要作用:一个是结构上的固定连接作用,用来将微悬臂梁和质量块系统固连在基底上;另一个是电气连接

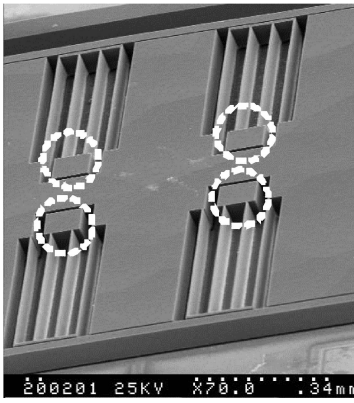


图 6 MEMS 微加速度计中典型的锚结构

Fig. 6 Typical anchor structure in MEMS accelerometer

作用,用于传递质量块上梳齿电容的电信号。一般地,为确保阳极键合锚结构的可靠性,器件设计人员会尽可能增加阳极键合区域的尺寸,如微锚结构等的几何尺寸,以保证微结构所需的力学性能要求。但是,随着对 MEMS 器件日益提高的性能要求,MEMS 器件被要求拥有愈来愈小的结构尺寸,同时具有愈来愈高的性能。类似锚结构这样的阳极键合微结构,其几何尺寸已经成为制约 MEMS 器件尺度进一步减小的瓶颈。

阳极键合是一个复杂的物理、化学过程,涉及电、力、热等的多场耦合作用。在进行阳极键合时,待键合材料上两个满足键合所要求的清洁度、表面粗糙度及平整度的表面,首先需要形成紧密的相互接触。通常将这样紧密接触的键合对放置于一对电极之间。当温度达到阳极键合所需温度后,在此电极上施加一个持续一定时间的适当大小的直流电压。其中玻璃材料一侧必须与直流电源的阴极相连,而金属、合金或半导体材料这一侧则与阳极相接,否则将不能形成键合。如图 7 所示为 Pyrex 7740 玻璃与溅射有铝膜的单晶硅片之间的阳极键合示意图。

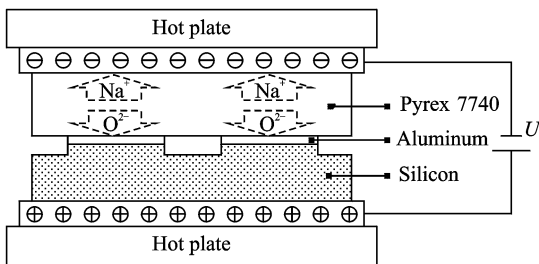


图 7 Pyrex 7740 玻璃与溅射有铝膜的单晶硅之间的阳极键合示意图

Fig. 7 Anodic bonding between Pyrex 7740 glass and monocrystal silicon with sputtering aluminum films

在室温下,阳极键合所用的玻璃几乎不能导电,但是当温度升高到一定程度后(低于玻璃软化温度),却会呈现出类似电介质的性质。玻璃(如 Pyrex 7740 玻璃)中的主要导电离子是阳离子,通常为钠离子(Na^+)。当在键合样品上施加了键合电压之后,钠离子便会在外加电场的作用下,逐渐迁移到跟负电极相接的玻璃表面,而在与正电极相接的玻璃表面留下移动能力较弱的负电荷。随着钠离子向负电极的不断迁移,在键合面附近的玻璃中便会形成一层被称之为耗尽层的集中了大量负电荷的空间电荷区(主要是氧离子 O^{2-}),导致了外加电场的电势降落主要集中在键合界面附近的耗尽层与正电极之间。图 8 所示为阳极键合过程中沿玻璃厚度方向上的电压分布示意图(根据参考文献[47]绘制)。此时,由于键合界面处形成的强大静电力,足以使两个待键合表面发生一定的弹塑性变形,克服键合表面微小的粗糙峰和不平整而产生紧密地相互接触,导致在键合界面处形成化学键,实现材料间的阳极键合连接。阳极键合的实质是玻璃(非金属)与硅(金属)在静电场的作用下界面极化,通过离子迁移、界面元素扩散及发生界面化学反应而形成玻璃(非金属)与硅(金属)的直接结合^[51]。一般地,在阳极键合中,键合界面处阳极材料的氧化反应是产生持久键合的主要原因。在静电场而参与氧化反应的氧离子通常被认为来自于玻璃中的非桥连氧(Non-bridging oxygen, NBO)或玻璃表面吸收的水^[53-56]。键合完成后,耗尽层中残存的负电荷在界面相对侧诱生出镜像正电荷,它们之间存在兆帕量级的静电力,仍能带来可观的键合力。

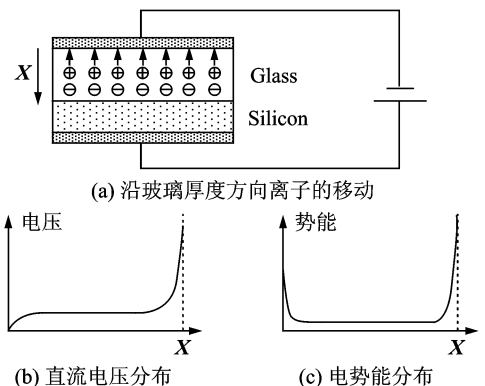


图 8 阳极键合过程中沿玻璃厚度方向离子移动及直流电压和电势能分布示意图

Fig. 8 Schematic of movement of ions, DC voltage distribution and energy of position across Pyrex plate in anodic bonding

近期, Singh 等人使用了一种新设计的键合装置缩短了键合时间^[57]。图 9 给出了该装置的示意图, 将 81 根触针(9×9)以方阵列样式安装在阴极。新的设计装置较标准装置能够阻止晶片在键合过程中的翘曲, 使更多的电流的通过界面。触针减少了接触面积, 增大了界面的电阻, 这能产生更多的热量, 使得更多的离子分离出来, 增加玻璃的导电性。实验表明, 在 400 V 电压下, 硅片的键合时间缩短 30%, 在 800 V 电压下, 二氧化硅的键合时间缩短了将近 52%。

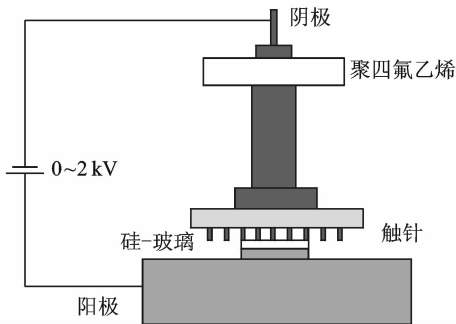
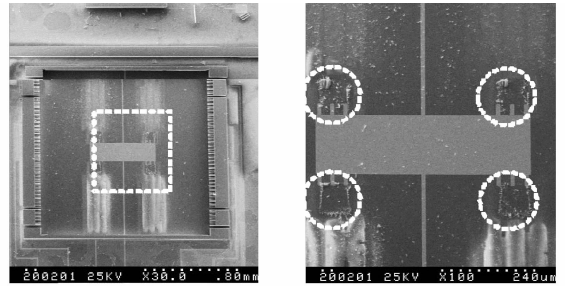


图 9 使用阴极触针的阳极键合法示意图

Fig. 9 Diagram of anodic bonding using cathode pins

阳极键合一旦完成, 在玻璃和金属(或合金、半导体)之间将出现一个经历复杂的扩散和反应过程而形成的特殊中间界面层。这个具有特殊组成结构的键合界面层, 它的力学行为对锚结构的力学性能有着至关重要的影响, 关系到整个 MEMS 器件微结构的可靠性, 这种影响在动态冲击等条件下尤为突出。MEMS 技术有着十分明显的军事应用背景。目前对于要求高精度、全温区、抗冲击等性能的国防和航空航天领域, MEMS 器件的应用受到了很大的限制。由于器件工作环境的严酷(包含振动、冲击、湿度、温度循环、高低温、过载和电磁辐射等, 以及这些因素耦合的环境), 可靠性问题已经成为阻碍 MEMS 电器件在这些领域中广泛应用的首要因素。微结构在动态冲击条件下的安全可靠, 对实际应用于复杂恶劣载荷环境的 MEMS 传感器(如用于空天飞行器、智能武器等的微机械加速度计、微陀螺仪等惯性传感器)而言, 其重要意义更是不言而喻。

对 MEMS 惯性器件的实验研究^[58-59]表明, 锚结构在阳极键合界面层的破坏是导致器件微结构失效的一种重要形式。图 10 显示了 MEMS 微加速度计中的锚结构在冲击载荷下, 键合界面处的剥离破坏(如图中白色圆圈所示, 其中图 10(b)为图



(a) 冲击载荷下锚结构的剥离破坏 (b) 被破坏区域的局部放大
图 10 MEMS 微加速度计上锚结构在键合界面处的剥离
Fig. 10 Peeling of anchor structure in bonding interface layer of MEMS accelerometer

10(a)中白色虚框区域的局部放大)。

在 MEMS 惯性器件的制造过程中, 用于固定连接各层材料之间的锚结构已经越来越多地使用阳极键合加工。然而阳极键合微结构的几何尺寸已经开始制约 MEMS 器件进一步发展。因此研究阳极键合锚结构应力应变分布特点, 降低残余应力和应变, 提高锚结构质量是阳极键合界面层力学行为研究中亟待进一步突破的重点。

4 阳极键合界面层的力学行为

阳极键合涉及到诸多力学问题, 如键合力(静电力、表面力等)作用下的表面接触粘着; 电场作用下接触界面处粒子的扩散受限凝聚(Diffusion-limited aggregation, DLA)与反应; 键合界面层中的残余应力等。阳极键合界面层的力学行为及特性直接关系到 MEMS 器件中微机械结构的安全与可靠性, 同时也将影响到器件的检测信号准确度。例如, 阳极键合界面处的残余应力引起有害的结构变形; 残余应力的释放导致器件检测信号严重漂移, 影响器件的测量精度; 在器件结构封装时, 键合界面层处的缺陷将影响密封性能等。

国外有许多学者在阳极键合的工艺、机理和强度方面做了大量的研究工作。到目前, 这些研究涉及键合初始阶段键合表面起始接触的形成^[60-63], 以及各种玻璃与金属、合金或半导体材料键合时阳离子耗尽层的形成^[48, 54, 64-68]。利用 SEM 和 TEM, Morsy 等^[67]的硼硅玻璃与 Kovar 合金、硅之间的阳极键合, Xing 等^[49]的厚度为 0.5 mm 的 Pyrex 玻璃与 1 mm 厚铝片之间的阳极键合, 以及 van Helvoort 等^[64]的 3 mm 厚 Pyrex 玻璃与 0.5 mm 厚铝片之间的阳极键合实验, 给出了若干有意义的实验结果。包括英国剑桥大学的 Knowles 和 van Helvoort 等在内的一些学者, 对有关阳极键合的

工艺机理等进行了重要的研究综述^[69-71],认为虽然 20 世纪 80、90 年代发展出的阳极键合技术已能满足工业界的生产要求,并且作为技术的使用方,工业界也无需对阳极键合界面层微结构的形成进行更为深入的了解,但是随着 MEMS 器件综合程度的提高以及结构尺度的进一步缩小,要想成功应用这类键合技术,则需要对键合过程有更为深入的研究,需要进一步研究阳极键合界面层微结构形成的机理及其力学特性。

中国国内方面,华中科技大学的研究小组^[72]报道了他们在 MEMS 器件封装中硅/玻璃阳极键合强度拉伸试验以及键合工艺参数控制方面的工作。太原理工大学的研究小组发表了在 Pyrex/Al^[73]、硼硅玻璃/硅^[74]的阳极键合机理、键合拉伸强度方面的工作,以及与中科院力学所及北京航空航天大学的研究小组合作,在多层阳极键合结构^[75]的残余应力与变形方面的研究工作。东南大学研究小组也报道了他们在 Si/Si 直接键合界面热应力模型及模拟^[76]、硅片键合界面^[77]的应力等方面的工作。北京邮电大学的研究小组发表了对晶片键合界面热应力分布的相关工作^[78]。国内还有其他院校、研究所的相关研究小组,对表面接触粘着、表面力作用等问题开展了研究,取得了很好的进展^[79-81]。

影响阳极键合界面层质量的因素有很多,这其中有一些关键的因素,例如,键合材料的热膨胀系数、键合时的温度、电压、晶格参数等,否则键合完成后在冷却过程中会因残余应力较大而破碎。残余应力包括热失配应力(由材料热膨胀系数差异引起)和内应力(与材料晶格失配相关)。选用热物理性能相近的材料能有效减小界面层的残余应力^[82]。研究表明,在相同电压键合时,键合温度升高,能增大离子迁移率和迁移速度,促进界面间的氧化反应,增加键合强度^[51]。但阳极键合温度较高时,键合完成后,在键合界面附近的玻璃内产生了明显的裂纹。在相同温度键合时,增加外加电压,会增大极化作用产生的静电引力,结合率也会增加。Joyce 等人使用一种新的阳极键合技术,发现增大外加电压能缩短键合时间。而且相比二氧化硅晶片和 Pyrex 玻璃,硅片和 Pyrex 玻璃的键合时间更短、电压更低^[34]。通过试验机对连接试样进行静载剪切强度测试发现,适当的增加键合温度和电压也能提高抗剪强度^[83]。阳极键合时所加电压的上限必须保证玻璃不被击穿,下限则是能够引起键合材料在键合界面处的弹塑性变形或粘滞流

动,以利于键合形成。尽管界面层的键合是在瞬间完成的,但键合时间也会影响键合质量,研究发现,时间越长,键合的质量也就越好^[84-85]。又如,键合表面的形貌和粗糙度会影响键合力。键合表面愈平整洁净,键合质量愈高。键合表面起伏愈大,静电力愈小。实验发现,当键合表面不平整超过几微米时,阳极键合就难以实现^[51]。在键合表面相同的起伏幅度下,起伏越圆滑,静电力则越大。

低温阳极键合是阳极键合研究中的一个重要方向。无机非金属材料(玻璃、陶瓷)与金属的热膨胀系数、弹性模量等性能相差较大,两者键合时,结构中的残余应力会影响设备的运作。降低键合温度的一种方法是使用含 Li 玻璃^[86],东京大学等研究人员开发了一种基于固态反应的陶瓷, $\text{Li}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (LMAS),其中的锂辉石($\beta\text{-LiAlSi}_2\text{O}_6$)在键合时可以提供锂离子^[87]。Maj 等通过有限元仿真分析研究了键合过程中生成的残余应力与温度之间的关系^[88]。在较大的试件工作温度范围内($0\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$)模拟了键合界面层的性能,并与零应力界面层相比较。仿真结果显示出零应力温度出现在 $13\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。通过电容和电阻两种方法研究发现最大的应力差达到了 10%。如果阳极键合器件的工作温度范围很大,就需要考虑残余应力的影响。界面层的力学性能随温度而变化,要提供精确的温度补偿以使设备能够可靠地运作。

多层晶片键合技术常用在复杂的 MEMS 系统中。例如,Despont 等在带有极小电子束显微镜中硅/玻璃的阳极键合时,两次改变键合电流,实现了硅/玻璃/硅的 3 层阳极键合^[83, 89]。图 11 为玻璃/铝/玻璃 3 层公共阳极键合法示意图^[73]。通过对多层阳极键合试件的有限元分析发现,3 层阳极键合试件内的残余应力和变形,明显低于非对称结构

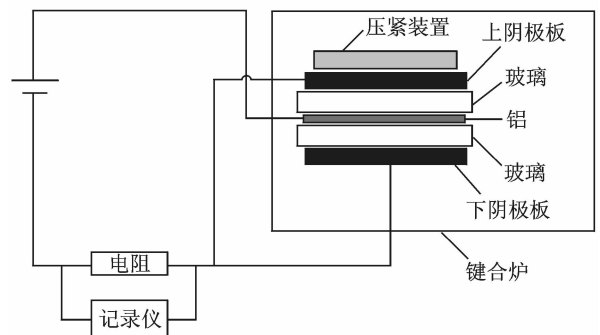


图 11 玻璃/铝/玻璃 3 层公共阳极键合法示意图

Fig. 11 Common anodic bonding of glass/aluminum/glass layers

的二层试件^[82]。对称结构键合界面处的残余应力和应变都呈现对称分布,多层对称结构的键合件在一定程度上能有利地缓解残余应力,减小翘曲变形。这一特性对于研究 MEMS 阳极键合界面层的力学行为提供了有益的参考^[83]。

研究人员常采用解析法和有限元法对阳极键合界面层力学行为与变形进行分析计算。但是到目前为止,针对阳极键合的研究工作还比较零散,缺乏对锚结构中阳极键合界面层的力学特性方面的系统研究,尤其对微小尺度锚结构中阳极键合界面层更是如此。现有的一些与界面层相关的力学分析模型^[90-94]中未能全面地考虑静电力、表面力、残余应力等对键合界面层力学性能的影响,这些都限制了它们在 MEMS 器件设计中的使用。进一步研究阳极键合的机理为低温键合以及分析界面层力学行为提供理论依据,优化界面层相关的力学分析模型更全面地分析各项力学性能,是提高阳极键合性能的研究方向。

5 结束语

近 50 年来,阳极键合作为 MEMS/NEMS 器件制造领域的核心键合技术之一,已经被广泛用于实现微机械结构的机械或电气连接、微结构或微器件的封装。低温键合和多层材料之间的键合是阳极键合的两个重要研究方向。实现低温键合甚至是常温键合,对研究界面层力学特性有很大的意义,并将能很大程度地解决残余应力问题。实现多层材料之间的的键合,能提高复杂的微电子机械系统中微器件的加工工艺。随着科技和工艺的发展,肯定会对阳极键合技术提出更严苛的要求。正确地认识阳极键合机理以及键合界面的力学行为等对于得到可靠的键合质量(如高键合强度、良好的密封性等)具有重要意义^[64]。成功地解决阳极键合中涉及的种种力学问题,能够有助于更好地理解阳极键合行为,为 MEMS 器件在设计 and 应用上提供更大的自由度。另一方面,作为一种 MEMS 结构组装技术,对阳极键合中涉及的力学行为的研究,有助于推动这一技术发展成为 NEMS/QMES 中的微器件组装技术。

参考文献:

- [1] Feynman R P. There's plenty of room at the bottom [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1992, 1(1): 60-66.
- [2] Wise K D. Integrated sensors: Key to future VLSI systems [C]//*Proceedings of IEEE 6th Sensor Symposium*. Japan: [s. n.], 1986: 1-9.
- [3] Petersen K, Brown J, Renken W. High-precision, high-performance mass-flow sensor with integrated laminar flow micro-channels [M]. New York: IEEE Press, 1991: 246.
- [4] Muller R S. Heat and strain-sensitive thin-film transducers [J]. *Sensors and Actuators*, 1983, 4(2): 173-182.
- [5] Yazdi N, Salián A, Najafi K. A high sensitivity capacitive microaccelerometer with a folded-electrode structure [C]//*Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 99)*. Orlando, FL, USA: [s. n.], 1999: 600-605.
- [6] Baltés H P, Popovic R S. Integrated semiconductor magnetic field sensors [M]. New York: IEEE Press, 1991: 389-391.
- [7] Emmerich H, Schofthaler M, Knauss U. A novel micromachined magnetic-field sensor [C]//*Proceedings of the 12nd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 99)*. Orlando, FL, USA: [s. n.], 1999: 94-99.
- [8] Janson S W. Spacecraft as an assembly of ASIMS [R]//*Aerospace Corporation Report Number ATR-95(8168)-2*, 1995: 181-258.
- [9] Mehregany M, Gabriel K J, Trimmer W S N. Integrated fabrication of polysilicon mechanisms [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1988, 35(6): 719-723.
- [10] Fodor S P A, Read J L, Pirrung M C, et al. Light-directed, spatially addressable parallel chemical synthesis [J]. *Science*, 1991, 251(4995): 767-773.
- [11] Li G, Shemansky J R. Drop test and analysis on micro-machined structures [J]. *Sensors and Actuators*, 2000, 85(1/2/3): 280-286.
- [12] Zhao Yapu, Yu Tongxi. Failure modes of MEMS and microscale adhesive contact theory [J]. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2000, 1(S): 361-372.
- [13] Tanner D M, Walraven J A, Helgesen K S, et al. MEMS reliability in a vibration environment [C]//*Proceedings of the IEEE International Reliability Physics Symposium*. San Jose, CA: [s. n.], 2000: 139-145.
- [14] Tanner D M, Walraven J A, Helgesen K, et al. MEMS reliability in shock environments [C]//*Proceedings of the IEEE International Reliability Physics Symposium*. San Jose, CA: [s. n.], 2000: 129-138.

- [15] Man K F. MEMS reliability for space applications by elimination of potential failure modes through testing and analysis [C]// Proceedings of the SPIE Symposium on Micromachining and Microfabrication, Santa Clara, California:[s. n.], 1999: 21-23.
- [16] 黄庆安. 硅微机械加工技术[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
Huang Qingan, Silicon micromachining [M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [17] Gösele U, Alexe M, Kopperschmidt P, et al. Semiconductor wafer bonding-A flexible approach to materials combinations in microelectronics; micromechanics and optoelectronics [C]// 1997 International Semiconductor Conference. Sinaia, Romania: IEEE, 1997: 23-32.
- [18] Plöbl A, Kräuter G. Wafer direct bonding: Tailoring adhesion between brittle materials [J]. Mater Sci Eng R-Rep, 1999, 25(1/2): 1-88.
- [19] Anglicus B, Bartholdus G. De genuinis rerum coelestium, terrestrium et inferarum proprietatibus [M]. Frankfurti: Apud Wolfgangum Richterum, Impensis Nicolai Steinii, Not. & Bibliopol, 1601.
- [20] Galilei G. Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove scienze [M]. Leiden: Elsevier, 1638.
- [21] Desaguliers J T. An experiment to illustrate what has been said in the Philosophical Transactions, No. 386, 387, 388, concerning the figure of the earth [J]. Philosophical Transactions, 1725, 33: 344-345.
- [22] Dowson D. History of tribology [M]. London: Longman, 1979.
- [23] Biermann U K P, Vangorkum A A, Pals J A. Direct Bonding-from an optical-technology to a broad research topic [J]. Philips Journal of Research, 1995, 49(1/2): 1-10.
- [24] Obreimoff J W. The splitting strength of mica [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, 1930, 127(805): 290-297.
- [25] Rayleigh L. A study of glass surfaces in optical contact [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, 1936, 156(888): 326-349.
- [26] Egerton A C. Strutt, Robert John, 4th baron rayleigh [J]. Obituary Notices of Fellows of the Royal Society of London, 1949, 6: 503-538.
- [27] Haisma J. Direct bonding in patent literature [J]. Philips Journal of Research, 1995, 49(1/2): 165-170.
- [28] Van B H G, Haisma J, De lang H. A small and stable continuous gas laser [J]. Physics Letters, 1962, 2(7): 340-341.
- [29] Antypas G A, Edgecumbe J. Glass-sealed GaAs-Al-GaAs transmission photocathode [J]. Applied Physics Letters, 1974, 26(7): 371-372.
- [30] Yablonovitch E, Gmitter T, Harbison J P, et al. Extreme selectivity in the lift-off of epitaxial GaAs films [J]. Applied Physics Letters, 1987, 51(26): 2222-2224.
- [31] Liao Z L, Mull D E. Wafer fusion: A novel technique for optoelectronic device fabrication and monolithic integration [J]. Applied Physics Letters, 1990, 56(8): 737-739.
- [32] Shimbo M, Furukawa K, Fukuda K, et al. Silicon-to-silicon direct bonding method [J]. Journal of Applied Physics, 1986, 60(8): 2987-2989.
- [33] Lasky J B. Wafer bonding for silicon-on-insulator technologies [J]. Applied Physics Letters, 1986, 48(1): 78-80.
- [34] Joyce R, Singh K, Sharma H, et al. Low cost anodic bonding for MEMS packaging applications [J]. Microsyst Technol, 2014, 20(6): 1153-1158.
- [35] Schmidt M A. Wafer-to-wafer bonding for microstructure formation [J]. The Proceedings of the IEEE, 1998, 86(8): 1575-1585.
- [36] Gragg J E, Mcculley W E, Newton W B, et al. Compensation and calibration of a monolithic four terminal silicon pressure transducer [C]// IEEE Solid-State Sensor Conference. Hilton Head Island, SC, USA; IEEE, 1984: 21-27.
- [37] Petersen K, Barth P, Poydock J, et al. Silicon fusion bonding for pressure sensors [C]// Solid State Sensor and Actuator Workshop Technical Digest. S. l.: IEEE, 1988: 144-147.
- [38] Guckel H. Surface micromachined pressure transducers [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1991, A28(2): 133-146.
- [39] Barth P W, Pourahmadi F, Mayer R, et al. A monolithic silicon accelerometer with integral air damping and overrange protection [C]// Solid State Sensor and Actuator Workshop Technical Digest. Hilton Head Island, SC, USA; IEEE, 1988: 35-38.
- [40] Beatty C C. A chronology of thermal ink-jet structures [C]// Technical Digest Solid-State Sensor and Actuator Workshop. Hilton Head Island, SC, USA; Transducer Res Found, Cleveland Heights, OH, USA, 1996: 200-204.
- [41] Sobek D, Senturia S D, Gray M L. Microfabricated fused silica flow chambers for flow cytometry [C]// Technical Digest Solid-State Sensor and Actuator

- Workshop. Hilton Head Island, SC, USA; Transducer Res Found, Cleveland Heights, OH, USA, 1994; 260-263.
- [42] Harrison D J, Fluri K, Chiem N, et al. Micromachining chemical and biochemical analysis and reaction systems on glass substrates [C]// International Solid-State Sensors and Actuators Conference. Stockholm, Sweden; Elsevier, Switzerland, 1996; 105-109.
- [43] Larsen U D, Blankenstein G, Branebjerg J. Microchip Coulter particle counter [C]// Proceedings of International Solid-State Sensors and Actuators Conference. Chicago, IL, USA; IEEE, 1997; 1319-1322.
- [44] Huff M A, Schmidt M A. Fabrication, packaging, and testing of a wafer-bonded microvalve [C]// IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop. Hilton Head Island, SC, USA; IEEE, 1992; 194-197.
- [45] Epstein A H, Senturia S D, Anathasuresh G, et al. Power MEMS and microengines [C]// 1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Chicago, IL, USA; IEEE, 1997; 753-756.
- [46] Lerou J J, Harold M P, Ryley J, et al. Microfabricated minichemical systems; Technical feasibility [C]// Workshop on Microsystem Technology for Chemical and Biological Microreactors. Mainz, Germany; VCH Verlagsgesellschaft, 1996; 51-69.
- [47] Wallis G, Pomerantz I. Field assisted glass-metal sealing [J]. *Journal of Applied Physics*, 1969, 40(10): 3946-3949.
- [48] Schmidt B, Nitzsche P, Grigull S, et al. In situ investigation of ion drift processes in glass during anodic bonding [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1998, 67(1/2/3): 191-198.
- [49] Xing Q, Sasaki G, Fukunaga H. Interfacial microstructure of anodic-bonded Al/glass [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2002, 13(2): 83-88.
- [50] Van H A T J, Knowles K M, Holmestad R, et al. Anodic oxidation during electrostatic bonding [J]. *Philosophical Magazine*, 2004, 84(6): 505-519.
- [51] 刘翠荣. 玻璃(陶瓷)与金属阳极键合界面结构及力学性能[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
Liu Cuirong. Microstructure and mechanical property of the anodic bonding interface between solid electrolyte glass (ceramics) and metals [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.
- [52] Tanner D M, Smith N F, Irwin L W, et al. MEMS reliability: Infrastructure, test structures, experiments and failure modes [R]. USA: Sandia National Laboratory, 2000.
- [53] Veenstra T T, Berenschot J W, Gardeniers J G E, et al. Use of selective anodic bonding to create micropump chambers with virtually no dead volume [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2001, 148(2): 68-72.
- [54] Nitzsche P, Lange K, Schmidt B, et al. Ion drift processes in pyrex-type alkali-borosilicate glass during anodic bonding [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1998, 145(5): 1755-1762.
- [55] Mack S, Baumann H, Gösele U, et al. Analysis of bonding related gas enclosure in micro machined cavities sealed by silicon wafer bonding [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1997, 144(3): 1106-1111.
- [56] Van H A T J, Knowles K M, Fernie J A. Characterization of cation depletion in Pyrex during electrostatic bonding [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2003, 150(10): 624-629.
- [57] Singh K, Joyce R, Varghese S, et al. A new method for fast anodic bonding in microsystem technology [J]. *Microsyst Technol*, 2014, 20(7): 1345-1349.
- [58] 王立森, 胡宇群, 李志宏, 等. 微加速度计在冲击载荷作用下的失效分析[J]. *机械强度*, 2001, 23(4): 516-522.
Wang Lisen, Hu Yuqun, Li Zhihong, et al. Failure analysis of microaccelerometer under impact loading [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2001, 23(4): 516-522.
- [59] Hu Yuqun, Wang Lisen, Zeng Zhaojun, et al. Structural failure analysis and numerical simulation of micro-accelerometers under impulsive loading [J]. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2002, 3(3/4): 311-314.
- [60] Anthony T R. Anodic bonding of imperfect surfaces [J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, 54(5): 2419-2428.
- [61] Albaugh K B, Rasmussen D H. Rate-processes during anodic bonding [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1992, 75(10): 2644-2648.
- [62] Lee T M H, Lee D H Y, Liaw C Y N, et al. Detailed characterization of anodic bonding process between glass and thin-film coated silicon substrates [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, 86(1/2): 103-107.
- [63] Morsy M A, Ikeuchi K, Ushio M, et al. Mechanism of enlargement of intimately contacted area in anodic bonding of Kovar alloy to borosilicate glass [J]. *Materials Transactions JIM*, 1996, 37(9): 1511-1517.
- [64] Van H A T J, Knowles K M, Fernie J A. Nano-

- structures at electrostatic bond interfaces [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2003, 86(10): 1773-1776.
- [65] Borom M P. Electron-microprobe study of field-assisted bonding of glasses to metals [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1973, 56(5): 254-257.
- [66] Carlson D E, Hang K W, STOCKDALE G F. Ion depletion of glass at a blocking anode—1, 2 [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1974, 57(7): 291-300.
- [67] Morsy M A, Ikeuchi K, Takahashi M, et al. Microstructure of glass/metal interface of anodically-bonded joint [C]// *Trends in Welding Research*. Pine Mountain, GA, United States: ASM International, 1998: 251-256.
- [68] Van Helvoort A T J, Knowles K M, Boothroyd C B, et al. Transmission electron microscopy of silicon-Pyrex electrostatic bonds [C]// *Conference of the Electron-Microscopy-and Analysis-Group*. Univ Dundee, Dundee, Scotland: IOP Publishing Ltd, 2001: 341-344.
- [69] Knowles K M, Van H T J. Anodic bonding [J]. *Int Mater Rev*, 2006, 51(5): 273-311.
- [70] Vesborg P C K, Olsen J L, Henriksen T R, et al. Note: Anodic bond of heat-sensitive areas [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(1): 78-91.
- [71] Mrozek P. Anodic bonding of glasses with interlayers for fully transparent device applications [J]. *Sens Actuator A: Phys*, 2009, 151(1): 77-80.
- [72] Chen Mingxiang, Yi Xinjian, Gan Zhiyin, et al. Reliability of anodically bonded silicon-glass packages [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 120(1): 291-295.
- [73] 孟庆森, 马秋平, 刘翠荣. Pyrex/AL 多层静电键合界面力学特征分析 [J]. *功能材料信息*, 2009, 6(1): 16-19.
- Meng Qingsen, Ma Qiuping, Liu Cuirong. Mechanical property analysis of Pyrex/AL multilayer electrostatic bonding interface layer [J]. *Functional Materials Information*, 2009, 6(1): 16-19.
- [74] 秦会峰, 杨立强, 孟庆森. 硼硅玻璃与硅阳极键合机理及其界面微观结构分析 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2009, 32(1): 13-16.
- Qin Hui Feng, Yang Liqiang, Meng Qingsen. Microstructure and mechanisms of the interface between borosilicate glass and silicon by anodic bonding [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2009, 32(1): 13-16.
- [75] Liu Cuirong, Lu Xiaoying, Yang Zhengyu, et al. Residual stress and deformation analysis of anodic bonded multi-layer of glass and aluminum [J]. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2008, 9(4): 347-353.
- [76] 陈新安, 黄庆安. Si/Si 直接键合界面热应力模型及模拟 [J]. *微纳电子技术*, 2006(11): 541-545.
- Chen Xinan, Huang Qingan. Model and simulation of the interfacial stresses of Si/Si direct bonding [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2006(11): 541-545.
- [77] 詹娟, 刘光廷. 硅片键合界面的应力研究 [J]. *传感技术学报*, 1994(3): 26-29.
- Zhan Juan, Liu Guangyan. Research on the stress of silicon bonding interface [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 1994(3): 26-29.
- [78] 周震, 孔熹峻, 黄永清, 等. 晶片键合界面应力分布的理论分析 [J]. *半导体学报*, 2003, 24(11): 1176-1179.
- Zhou Zhen, Kong Xijun, Huang Yongqing, et al. Theoretical analysis of the stress distribution of the wafer bonding interface [J]. *Journal of Semiconductors*, 2003, 24(11): 1176-1179.
- [79] Li Qunyang, Yu Shouwen. A model for computational investigation of elasto-plastic normal and tangential contact considering adhesion effect [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2004, 20(2): 165-171.
- [80] Zhang Lixian, Zhao Yapu. Adhesion of rough surfaces with plastic deformation [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2004, 18(6): 715-729.
- [81] Zhao Yapu, Wang Lisen, Yu Tongxi. Mechanics of adhesion in MEMS—A review [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2003, 17(4): 519-546.
- [82] 李娟. 玻璃/铝多层阳极键合接头残余应力应变数值模拟研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2013.
- Li Juan. Numerical simulation research on the residual stress and strain of glass/al multilayer anodic bonding joint [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2013.
- [83] 鲁晓莹, 刘翠荣, 孟庆森, 等. Pyrex 玻璃/铝多层阳极键合界面结构与力学分析 [J]. *功能材料*, 2008, 39(9): 1466-1469.
- Lu Xiaoying, Liu Cuirong, Meng Qingsen, et al. Structural and mechanical analysis of pyrex glass/al multilayer anodic bonding interface layer [J]. *Functional Materials Information*, 2008, 39(9): 1466-1469.
- [84] Weichel S, Reus R, Ouaidat S. Low-temperature anodic bonding to silicon nitride [J]. *Sensors and Ac-*

- tuators A, 2000, 82(1/2/3): 249-253.
- [85] 鲁晓莹. Pyrex 玻璃与铝阳极键合界面结构及残余应力模拟分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
Lu Xiaoying. Analysis on the interface structure and finite element simulation of the anodic bonding for the pyrex glass to aluminum [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.
- [86] Tanaka S. Wafer-level hermetic MEMS packaging by anodic bonding and its reliability issues [J]. Microelectron Reliab, 2014, 54(5): 875-881.
- [87] Hayashi R, Mohri M, Kidani N, et al. Development of new anodically-bondable material and feed-through substrate with high bending strength and fracture toughness [C]// Proceedings of the IEEE 28th Sensor Symposium, Tokyo, Japan: [s. n.], 2011:85-88.
- [88] Maj C, Zajac P, Szermer M, et al. The influence of residual stress induced by anodic wafer bonding on MEMS membrane properties [C]//2014 Proceedings of the 21st International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES). Lublin: [s. n.], 2014: 93-96.
- [89] Despont M, Gross H, Arrouy F, et al. Fabrication of a silicon-Pyrex-silicon stack by a. c. anodic bonding [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1996, 55(2/3): 219-224.
- [90] Briand D, Weber P, Derooij N F. Bonding properties of metals anodically bonded to glass [J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2004, 114(2/3): 543-549.
- [91] Li Ganyang, Wang Lin. Influence of bonding parameters on electrostatic force in anodic wafer bonding [J]. Thin Solid Films, 2004, 462(63): 334-338.
- [92] Wei J, Nai S M L, Wong C K, et al. Glass-to-glass anodic bonding process and electrostatic force [J]. Thin Solid Films, 2004, 462(63): 487-491.
- [93] Murray C E, Noyan I C. Finite-size effects in thin-film composites [J]. Philos Mag A, Phys Condens Matter Struct Defects Mech Prop, 2002, 82(16): 3087-3117.
- [94] Noyan I C, Murray C E, CheY J S, et al. Finite size effects in stress analysis of interconnect structures [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(5): 724-726.

