DOI: 10.3901/JME.2020.13.067

基于共晶键合技术的 CMUTs 结构与试验测试*

李支康^{1,2,3,4} 赵立波^{1,2,3,4} 赵一鹤^{1,2,3,4} 李杰^{1,2,3,4} 郭帅帅^{1,2,3,4}
罗国希^{1,2,3,4} 徐廷中^{1,2,3,4} 刘子晨^{1,2,3,4} 李雪娇^{1,2,3,4} 蒋庄德^{1,2,3,4}

- (1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049;
2. 西安交通大学微纳制造与测试技术国际合作联合实验室 西安 710049;
3. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049;
4. 西安交通大学苏州研究院 苏州 215123)

摘要: 电容式微加工超声换能器(Capacitive micromachined ultrasonic transducers, CMUTs)在超声成像与治疗、3D 超声姿态识别等领域具有广泛应用需求。将 CMUTs 与 ICs 进行集成是减小寄生电容、提高信噪比的重要途径,然而目前基于熔融键合的 CMUTs 制备技术需要高温条件(>1 000 °C),无法实现与 ICs 的集成制备。开发基于共晶键合的 CMUTs 制备工艺是解决上述问题的有效途径。针对该低温工艺,设计了圆形和正六边形空腔 CMUTs 单元及相应的阵列结构,利用有限元仿真和理论公式分析了 CMUTs 结构的塌陷电压、谐振频率以及其薄膜在热应力、大气压力条件下的变形。分析结果表明 CMUTs 塌陷电压及谐振频率在预期范围内,其薄膜在热应力、大气压力作用下不会发生塌陷。对所制备的 CMUTs 芯片的形貌、结构尺寸、电容以及阻抗频率特性开展试验研究。结果表明芯片形貌、结构参数、电容以及阻抗频率特性与设计预期一致,芯片能正常工作;测试结果验证了 CMUTs 结构与制备工艺的可行性。这些研究对进一步实现 CMUTs 与 ICs 的集成设计与制备提供了基础。

关键词: CMUTs; 有限元仿真; 结构设计; 共晶键合; 试验测试; 阻抗频率特性

中图分类号: TB552

Design and Experimental Characterization of CMUTs Based on Eutectic Bonding Technology

LI Zhikang^{1,2,3,4} ZHAO Libo^{1,2,3,4} ZHAO Yihe^{1,2,3,4} LI Jie^{1,2,3,4} GUO Shuaishuai^{1,2,3,4}
LUO Guoxi^{1,2,3,4} XU Tingzhong^{1,2,3,4} LIU Zicheng^{1,2,3,4} LI Xuejiao^{1,2,3,4}
JIANG Zhuangde^{1,2,3,4}

- (1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;
2. International Joint Laboratory for Micro/Nano Manufacturing and Measurement Technologies, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;
3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;
4. Xi'an Jiaotong University Suzhou Academy, Suzhou 215123)

Abstract: Capacitive micromachined ultrasonic transducers (CMUTs) have widespread application in fields of ultrasonic imaging, ultrasonic therapy and 3D ultrasonic gesture recognition. Integration of CMUTs with integrated circuits (ICs) is a key approach to reduce its parasitic capacitance and improve the signal to noise ratio. However, current fusion bonding-based fabrication technologies need high temperature (>1 000 °C), which impedes the integration of CMUTs with ICs. Developing eutectic bonding-based

* 国家重点研发计划(2016YFB1200100)、国家自然科学基金(51805423、51875449、51890884、51421004、91748207)、陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目(2018JQ5067)、苏州市重点产业技术创新->前瞻性应用研究(SYG201721)、机械系统与振动国家重点实验室课题(MSV201809)和中国博士后科学基金(2017M623160)资助项目。20190706 收到初稿,202003011 收到修改稿

fabrication technology is an effective approach to solve this problem. Based on this low-temperature fabrication process, this paper designs CMUTs with circular and hexagonal cavities and their corresponding array structures. Finite element method (FEM) and theoretical formulas are used for the analyses of their collapse voltages, resonant frequencies and deflection of the membrane under thermal stress and atmospheric pressure. The analytical results indicate that the collapse voltages and resonant frequency of CMUTs are within the expected range, and the membranes will not collapse under the co-action of thermal stress and atmospheric pressure. Experimental testing on morphology, structure parameters, capacitances and impedance-frequency characteristics of the fabricated CMUTs chips are carried out. The results indicate that the chip morphology, structure parameters, capacitance and impedance-frequency characteristics are consistent with those expected, and the CMUTs chips can work normally. These results demonstrate the feasibility of the structure design and fabrication process of the CMUTs. These researches provide a foundation for further integrated design and fabrication of CMUTs with ICs.

Key words: CMUTs; FEM simulation; structure design; eutectic bonding; experimental testing; impedance-frequency characteristics

0 前言

电容式微加工超声换能器(Capacitive micromachined ultrasonic transducers, CMUTs)是得益于MEMS技术而发展起来的微型超声换能器。它克服了传统压电超声换能器存在的与流体阻抗匹配特性差、带宽窄以及二维换能器阵列制备难度大、成本高等难题,具有尺寸小、机电耦合系数高、带宽宽、批量化制备及易于与ICs集成等优点,因而成为超声换能器的重要发展方向^[1]。CMUTs可广泛应用于医学超声成像与治疗、水下超声成像、超声指纹识别、超声姿态识别以及生化物质检测等领域^[2-5],具有重要研究价值。

CMUTs的性能不仅决定于其自身结构设计,而且决定于其制备技术。目前,CMUTs的制备工艺主要有两大类:基于牺牲层技术和基于熔融键合技术的制备工艺。基于牺牲层技术的制备工艺主要采用先在基底上依次沉积牺牲层和薄膜层,再在薄膜层开孔将牺牲层腐蚀掉以形成空腔的方法实现CMUTs加工^[6-7]。这种工艺方法因空腔和薄膜设计具有相互依赖性,降低了结构设计的灵活性,且薄膜厚度均匀性及其制备的重复性差^[8]。基于熔融键合技术的制备工艺可实现薄膜和空腔分离设计,且常采用片顶层硅(Silicon-on-insulator, SOI)作为薄膜,因此,可有效提高结构设计的灵活性、薄膜厚度的均匀性、CMUTs阵列中单元结构的一致性,进而可有效提高CMUTs整体性能^[9]。虽然基于熔融键合的制备技术可有效提高CMUTs性能,但键合所需要的高温条件($>1\ 000^{\circ}\text{C}$)限制了其与ICs的集成^[10-11]。CMUTs与ICs的集成制备可有效降低寄生电容、提高信噪比,进而提高器件性能。因此,综合考虑性能及制备技术,应开展基于低温晶圆键合技术的CMUTs设计、制备以及性能试验研究,以满足超声成像与治疗、超声姿态识别等领域对高性

能微型超声换能器的迫切需求。

共晶键合技术通过在两晶圆表面上溅射过渡金属层来实现键合,其工艺温度低于 350°C ^[12-13]。采用基于共晶键合技术的制备工艺可实现CMUTs与ICs的集成制备。综合考虑器件性能及共晶键合技术的工艺特点,设计了CMUTs结构,并采用有限元仿真和理论等方法对其性能参数及设计可行性进行分析,最后对制备的CMUTs芯片结构及性能进行试验测试,验证设计的可行性。

1 基于共晶键合技术的CMUTs结构设计

1.1 单元结构设计

基于共晶键合技术的CMUTs单元结构如图1所示。为说明其结构特征,图1中给出两个CMUTs单元。该结构主要由上、下两部分组成。下半部分为CMUTs基底,由单晶硅和覆盖在其整个表面的金属层构成。上半部分为空腔、支柱、振动薄膜、绝缘块以及上电极焊盘。其中绝缘块位于振动薄膜的下表面中心,只覆盖振动薄膜的中心区域,其形状和空腔形状相同;支柱由二氧化硅层和位于其下表面的金属层构成。上、下两部分结构通过金属层进行键合,密封空腔,形成CMUTs。该结构中薄膜为低阻硅,同时用作振动薄膜和上电极;用作基底的单晶硅也为低阻硅,与覆盖其上表面的金属层共同用作下电极。绝缘块用作上下电极之间的电

图1 基于共晶键合技术的CMUTs单元剖面结构示意图

绝缘,防止上下电极接触时发生短路。在上述设计基础上,共设计了两种空腔形状的 CMUTs 结构,即圆形和正六边形空腔,其三维结构示意图分别如图 2a 和 2b 所示。

图 2 基于共晶键合技术的 CMUTs 单元三维结构示意图

综合考虑工艺和材料性能,确定图 1 所示 CMUTs 各部分的材料。其中基底硅片采用 n 型 <111>晶向低阻硅,电阻率小于 $0.04 \Omega \cdot \text{cm}$,厚度为 $380 \mu\text{m}$ 。支柱和绝缘块采用二氧化硅材料,一方面二氧化硅可以直接在硅材料表面通过氧化工艺生长,具有很好的表面平整性,有利于键合;另一方面二氧化硅材料的绝缘性好,可以用于上下电极间的绝缘;此外,二氧化硅和硅之间具有很好的刻蚀选择性,刻蚀二氧化硅绝缘块时,可以实现刻蚀自停止。CMUTs 薄膜由 SOI 片顶层硅制备而成,其中 SOI 的顶层硅为<100>晶向、电阻率小于 $0.01 \Omega \cdot \text{cm}$;埋层二氧化硅厚度为 $3 \mu\text{m}$;衬底硅为<100>晶向,厚度为 $300 \mu\text{m}$ 。SOI 衬底硅和基底硅晶向的选择,可有效减小湿法腐蚀 SOI 衬底硅时溶液对基底硅的刻蚀。图 1 所示 CMUTs 结构,具有以下优点。

(1) 薄膜由 SOI 片顶层硅制备而成,薄膜厚度均匀性好,各单元间结构和性能一致性好,且 SOI 顶层硅为低阻,薄膜可直接用作上电极,不需要额外的金属层作为电极,有效减少了工艺步骤和薄膜质量,薄膜质量越小,用于生化检测时的灵敏度越高^[5]。

(2) 空腔、支柱以及绝缘层等结构均设置在上半部分(或 SOI 顶层硅上),而基底上未设置任何结构图形,整个基底为平面。因此,上下两部分结构键合时对设备的对准精度要求低,有效减小了对准难度。

(3) 由于薄膜在电压作用下发生塌陷时,薄膜中心区域和下电极接触,因此,绝缘块只覆盖薄膜中心区域。相对于绝缘层覆盖整个基底表面的情况,该设计可有效减少绝缘层充电现象对器件性能稳定性的影响。

依据现有工艺水平以及试验条件(可加载最大直流电压小于 220 V ,也即所设计的 CMUTs 塌陷电压应小于 220 V),针对每种空腔形状 CMUTs 结

构,设计了两组参数。CMUTs 具体结构尺寸如表 1 所示。

表 1 圆形和正六边形空腔 CMUTs 单元结构尺寸

参数名称	圆形空腔		正六边形空腔	
	第一组	第二组	第一组	第二组
空腔半径或边长/ μm	40	50	50	60
空腔高度/ μm	0.8	0.8	0.8	0.8
支柱最小宽度/ μm	6	6	6	6
绝缘块厚度/ μm	0.1	0.1	0.1	0.1
绝缘块半径或边长/ μm	8	10	10	12

1.2 阵列结构设计

以增大有效电容、减小寄生电容及频率噪声为主要依据,设计 CMUTs 阵列结构如图 3 所示。设计单阵元芯片(图 3a)和四阵元芯片(图 3b)两种芯片类型,每种芯片的外形尺寸相同,以满足等距离划片的工艺要求。划片道宽度设计值为 $380 \mu\text{m}$,阵列区最外侧与划片道之间的区域,即边缘键合区(以下简称“边缘区”)的设计值为 $240 \mu\text{m}$ 左右。边缘区上设置电极焊盘和二氧化硅层;其中金属焊盘尺寸为 $100 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$;二氧化硅层由 SOI 片的埋层二氧化硅刻蚀而成,用以减小划片时冲洗液、机械力等对内部单元结构的破坏。同时,划片道上单晶硅膜被刻蚀掉,以进一步减小划片时对内部 CMUTs 单元的损害。图 3b 所示 CMUTs 阵列结构的四个阵元之间的单晶硅薄膜被完全刻蚀掉,以实现阵元之间的电隔离。

(a) 单阵元CMUTs阵列结构

(b) 四阵元CMUTs阵列结构

图 3 CMUTs 阵列三维结构设计示意图

表 2 圆形和正六边形空腔 CMUTs 阵列结构尺寸

参数名称	空腔半径/边长/ μm	阵元单元数	单芯片所含阵元数
圆形	40	37×37	1
		16×16	4
	50	30×30	1
		13×13	4
正六边形	50	30×30	1
		13×13	4
	60	25×25	1
		10×10	4

针对 CMUTs 的每一组单元结构尺寸, 分别设计两种阵列结构, 也即单阵元和四阵元 CMUTs 芯片。每种芯片的外形尺寸形同, 均为 $3\ 660\ \mu\text{m} \times 3\ 660\ \mu\text{m}$ 。CMUTs 阵列的具体设计参数如表 2 所示。

2 性能及设计可行性分析

依据 CMUTs 单元结构参数, 利用理论计算和有限元模拟的方法, 分析圆形和正六边形空腔 CMUTs 单元结构在真空环境中的塌陷电压、谐振频率以及热应力、大气压对 CMUTs 薄膜变形的影响, 以验证结构设计的可行性(即验证 CMUTs 薄膜在热应力及大气压力作用下是否会发生塌陷), 并预测 CMUTs 主要性能。用于 CMUTs 主要性能分析的材料参数如表 3 所示^[14-15]。

表 3 材料性能参数(μMKSV)

参数名称	Si	SiO ₂	Al	Au
弹性模量/ $10^3\ \text{MPa}$	169	73.1	67.6	80.6
泊松比	0.29	0.17	0.35	0.42
密度/ $(10^{-15}\ \text{kg} \cdot \mu\text{m}^{-3})$	2.332	2.27	2.7	19.7
热膨胀系数/ $10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$	2.33	0.55	25	14.2
击穿电场强度/ $(\text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	3	5-10	—	—
相对介电常数	11.8	3.8	—	—

2.1 塌陷电压及谐振频率分析

利用有限元模型及前期研究所提出的理论公式对 CMUTs 单元的塌陷电压及固有谐振频率进行分析^[17-18]。建立矩形薄膜 CMUTs 的三维有限元模型, 如图 4 所示。用三维实体单元 SOLID185 模拟 CMUTs 薄膜, 用 TRANS126 单元模拟 CMUTs 上下电极之间的机电耦合场。用 EMTGEN 宏命令建立 TRANS126 单元, TRANS126 单元的上节点与薄膜下表面节点相连, 上节点所在平面代表上电极; 其下节点 Z 方向上的位移固定, 表示 CMUTs 下电极。薄膜周边固支, 下电极电势设置为零, 在上电极上施加偏置电压, 利用多物理场求解器进行静力及模态分析, 求解塌陷电压及谐振频率。

(a) 圆形空腔

(b) 正六边形空腔

图 4 圆形和正六边形空腔 CMUTs 机电耦合有限元模型

塌陷电压和谐振频率的理论分析和仿真结果如表 4 所示。

表 4 主要性能及薄膜变形分析结果

空腔形状	半径/边长/ μm	V_{pt}/V		f_0/MHz	变量量/ μm		
		模拟值	分析值		W_{p}	W_{t}	W_{pt}
圆形	40	275	283	5 125 064	0.034	0.017	0.051
	50	177	181	3 301 345	0.081	0.023	0.104
正六边形	50	196	—	4 111 853	0.052	0.020	0.073
	60	117	—	2 859 995	0.108	0.025	0.133

由表 4 可知: ① 塌陷电压的理论分析值与仿真结果很好吻合, 其相对误差小于 2.9%; ② 塌陷电压和谐振频率均随着薄膜边长(或半径)尺寸的增大而减小; ③ 除空腔半径为 $40\ \mu\text{m}$ 的 CMUTs 外, 其它尺寸 CMUTs 的塌陷电压均小于 $220\ \text{V}$, 满足试验条件对加载电压的限制($<220\ \text{V}$)。虽然空腔半径为 $40\ \mu\text{m}$ 的 CMUTs 的塌陷电压高达 $275\ \text{V}$, 但也可以在塌陷电压的 80% 以下($<220\ \text{V}$)的较大电压范围内工作。此处需要说明的是, 塌陷电压是 CMUTs 工作时可加载的最大直流偏置电压, 超过该电压值则薄膜发生塌陷, 与基底接触, 无法在传统工作模式下工作^[16]。由于 CMUTs 工作时还需要同时加载一定幅值的交流电压, 所以一般所加载直流偏置电压低于塌陷电压, 以保证直流和交流电压共同加载时薄膜不发生塌陷。

2.2 大气压力和热应力对薄膜变形的影响

CMUTs 芯片加工过程中的热应力和环境中的大气压力是引起薄膜变形的两个主要因素。通过分析热应力和大气压力引起的薄膜变形情况, 以判定 CMUTs 薄膜是否发生塌陷而无法工作。

对于模拟大气压强作用下的薄膜变形, 利用如图 4 所示有限元模型进行分析, 加载条件为大气压, 其值约 $0.1\ \text{MPa}$ 。具体结果如表 4 所示, 其中 W_{p} 表示大气压力作用下的薄膜变形。由表 4 可知, 在环境压力作用下不同形状和尺寸的 CMUTs 薄膜的变形均远小于空腔高度。因此, 所设计 CMUTs 不会在环境压力作用下发生塌陷。

对于热应力引起的薄膜变形分析, 主要关注温

度变化后达到稳态情况下的薄膜变形。因此,假设:CMUTs 结构各组成部分温度一致、均匀,不考虑温度变化中的瞬态效应;薄膜的变形主要由冷却过程中 CMUTs 各结构部分热膨胀系数不一致而产生的热应力所引起;忽略温度变化引起的材料性能参数变化;忽略图 2 所示不同空腔形状 CMUTs 结构支柱处的宽度差异,空腔周围的支柱宽度统一取值 $6\text{ }\mu\text{m}$ 。基于上述假设建立的用于模拟热应力对薄膜变形影响的有限元仿真模型如图 5 所示。由于 CMUTs 结构和所受作用力的对称性,用 PLANE183 单元建立轴对称模型来模拟圆形空腔 CMUTs 结构,用 SOLID185 单元建立 1/4 模型来模拟正六边形空腔 CMUTs 结构。由于 CMUTs 基底厚度远大于支柱和薄膜厚度,薄膜、支柱等关键区域网格划分密于基底区域,以获得较好的模拟结果。圆形空腔 CMUTs 的约束条件施加于模型对称中心处,即 CMUTs 单元中心轴线上施加对称约束条件,中心底部节点各方向位移均被完全限制。正六边形空腔 CMUTs 的对称约束条件分别施加于 X 和 Y 方向的两个对称面上,对称中心底部节点 X 、 Y 和 Z 方向上的位移被限制。由于在共晶键合工艺中,芯片要经历从 350°C 的退火温度到常温 20°C 的降温过程,因此,模拟中主要分析该段温度变化引起的薄膜变形。

图 5 圆形和正六边形空腔 CMUTs 热应力分析有限元模型

图 6a 和 6b 分别为圆形空腔和正六边形空腔 CMUTs 在降温过程中薄膜发生的下凹变形,具体结果如表 4 所示。表 4 中 W_T 表示热应力引起的变形,可以看出所设计的 CMUTs 结构在降温过程中发生的薄膜变形小于空腔高度的 3.1%,因此,降温过程不会导致薄膜塌陷。

上述研究分别从大气压力和热应力两个方面分析 CMUTs 薄膜变形,而实际情况中,这两种作用力是同时存在的。因此,本文进一步对热应力和大气压力共同作用下薄膜变形进行分析。利用图 4 所示有限元模型,设置电压值为零,将薄膜在热应力作用下的薄膜变形和大气压力作为加载条件,进行静力分析。模拟结果如表 4 所示,表中 W_{PT} 表示在

(a) 圆形空腔

(b) 正六边形空腔

图 6 热应力引起的 CMUTs 薄膜变形仿真结果

热应力和压力共同作用下的薄膜变形。由表可知,所设计 CMUTs 薄膜在热应力和大气压力共同作用下的变形小于空腔高度的 16.7%,薄膜不会发生塌陷,设计可行。

3 CMUTs 结构及性能试验测试

采用文献[12]所提出的基于共晶键合技术的制备方法,完成芯片制备。划片前整个圆片和划片后芯片的照片分别如图 7a 和 7b 所示,划片后单个芯片尺寸约为 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 。采用激光共聚焦显微镜 (LEXT OLS4000) 以及场发射扫描电镜 (SU-8010) 对芯片微观结构形貌、尺寸以及薄膜变形等进行试验测试。

(a) 划片前整个晶圆

(b) 划片后 CMUTs 芯片

图 7 划片前晶圆和划片后 CMUTs 芯片照片

图8所示为4阵元CMUTs芯片的共聚焦显微照片,其中图8a为整个芯片照片,图8b为单个CMUTs单元照片。图8b中亮色区域为悬空薄膜,暗色区域为薄膜与支柱结构的结合区域。从图8中可以看出CMUTs芯片结构完整,键合后CMUTs薄膜未发生大量破裂现象,在环境压力及热应力作用下薄膜未发生塌陷。

图8 CMUTs芯片阵列及单元激光共聚焦照片

图9所示为CMUTs芯片的SEM照片,其中图9a为边缘键合区域照片,图9b为单元中心区域剖面结构照片。从图9a可清晰看出CMUTs芯片的基底、共晶键合层、硅薄膜等各结构部分。从图9b中可以看出位于CMUTs薄膜下表面的二氧化硅绝缘块及空腔。从CMUTs芯片的剖面结构图中可以看出硅薄膜与基底之间键合效果较好,硅薄膜与基底之间未出现脱落情况。

3.1 结构尺寸及薄膜变形测试

表5为CMUTs芯片主要结构参数以及薄膜变形的测试结果。其中CMUTs单元的边长或半径以及薄膜变形参数是通过激光共聚焦显微镜在50倍镜下激光扫描获得的。图10a和10b分别为利用激

光共聚焦显微镜测试薄膜边长尺寸以及薄膜变形的照片,从图10b中可以看出,薄膜发生了向上凸起的变形。测量时在芯片阵列区靠近两端以及中心处选择3个局部区域,在每个局部区域测量4个CMUTs单元。对每个单元的边长或半径尺寸进行5次测试,将5次测试的平均值作为该单元实测值;对于薄膜变形测量,从每个单元的三个不同方向进行薄膜变形测试,将3次变形的平均值作为该单元的实测变形值。最后,用三个区域12个CMUTs单

(a) CMUTs单元靠近支柱区域

(b) CMUTs单元中心区域

图9 基于共晶键合技术的CMUTs芯片SEM照片

表5 CMUTs芯片结构尺寸及薄膜变形测试结果

参数名称	设计值	测量单元数或次数												均值
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
圆形空腔半径/ μm	40	39.6	40.0	39.3	39.1	39.1	39.0	39.2	38.9	38.9	39.0	40.0	39.4	39.3
	50	49.6	49.7	50.0	50.0	49.2	49.3	49.7	49.9	49.2	49.7	49.5	49.6	49.6
正六边形空腔边长/ μm	50	49.4	49.3	49.2	49.3	49.4	49.7	49.2	49.3	49.3	49.6	49.3	49.4	49.4
	60	59.2	59.3	59.7	59.8	59.5	59.6	59.7	59.5	59.8	59.4	59.3	59.1	59.5
空腔高度/ μm	0.80	1.20	1.12	1.16	1.26	1.12	—	—	—	—	—	—	—	1.17
薄膜厚度/ μm	2	1.58	1.66	1.65	1.64	1.67	—	—	—	—	—	—	—	1.64
支柱 SiO_2 厚度/ μm	0.60	0.58	0.59	0.60	0.57	0.59	—	—	—	—	—	—	—	0.59
辅助金属层厚度/ μm	0.50	0.47	0.52	0.63	0.58	0.47	—	—	—	—	—	—	—	0.53
圆形薄膜变形/ μm	40	0.15	0.14	0.18	0.21	0.18	0.22	0.21	0.12	0.21	0.16	0.18	0.28	0.19
	50	0.24	0.22	0.20	0.20	0.24	0.24	0.17	0.15	0.38	0.30	0.33	0.51	0.26
正六边薄膜变形/ μm	50	0.33	0.34	0.36	—	0.25	0.26	0.20	0.24	0.23	0.24	0.23	0.22	0.26
	60	0.30	0.31	0.29	0.32	0.29	0.32	0.27	0.24	0.30	0.29	0.30	0.29	0.29

图 10 CMUTs 空腔半径及薄膜变形测试照片

元的测试数据的平均值来衡量整个阵列中 CMUTs 单元的半径或边长尺寸及薄膜变形。此外，通过 SEM 剖面图来测量 CMUTs 芯片的薄膜厚度及空腔高度等参数，由于设计时不同薄膜形状 CMUTs 的薄膜厚度、空腔高度、绝缘块厚度等尺寸相同，因此，取 5 个不同位置对这些参数分别测量，将 5 个不同位置测量结果的平均值作为 CMUTs 芯片薄膜厚度、空腔高度等参数的实际尺寸。

从表 5 中的测试数据可以看出，CMUTs 薄膜的半径(边长)、SiO₂ 支柱厚度以及基底硅上过渡金属层厚度的实测值与设计值基本一致，与设计值最大误差为 1.8%。CMUTs 薄膜厚度尺寸与设计值之间的误差为 18%。这主要是由于硅片厚度误差及在去除 SOI 片的埋层二氧化硅时的工艺所致。此外，芯片的空腔高度测试值为 1.17 μm ，大于设计值，与设计值的相对误差达 39.6%。这可能是温度变化过程中所产生的热应力导致薄膜发生凸起变形，引起上下电极间距离增大。

3.2 电性能测试

CMUTs 芯片电性能测试主要包括静态电容测试和阻抗频率特性测试，以从电学角度评价器件性能。

3.2.1 静态电容

静态电容测试主要是测量 CMUTs 芯片的器件电容。采用阻抗分析仪(安捷伦科技有限公司，E4990A，美国)对芯片电容进行测试，测试装置如 11 所示。

测试时，首先进行阻抗分析仪校准，而后直接将芯片的上下电极与阻抗分析仪测试端口相连，取 3 个相同的阵列芯片进行测试，每个阵列芯片进行 3 次电容测试，将其平均值作为该阵列芯片的电容量；用三个芯片电容的平均值衡量同一类型阵列芯片的静态电容。测试结果如表 6 所示，表中所给单个芯片的电容值为 3 次测试的平均值。由表 6 可知，芯片电容的实际测量值小于理论设计值，这是由于所制备芯片薄膜发生凸起变形、空腔高度变大所致。

图 11 CMUTs 芯片静态电容测试装置

表 6 CMUTs 芯片电容测试结果

空腔形状	半径/边长/ μm	阵列单元数/ 个	电容设计值/ pF	电容测试值/ pF
圆形	40	16×16	112.8	108.8
	50	13×13	115.5	101.0
正六边形	50	13×13	125.9	118.8
	60	10×10	109.9	106.6

3.2.2 阻抗频率特性

阻抗频率特性测试可以用来衡量 CMUTs 芯片综合性能的好坏，包括 CMUTs 芯片内单元一致性、串联和并联谐振频率等主要性能参数。阻抗频率特性系统如图 12 所示，CMUTs 芯片封装在 PCB 板上，其交流激励引线固定在阻抗分析仪的 16047E 测试夹具上。测试时，阻抗分析仪为被测芯片提供交流激励信号，最大幅值为 1 V；数字源表(吉时利仪器公司，2612A，美国)用来提供直流偏置电压，通过 Bias-T 电路加载在 CMUTs 芯片上。

图 12 CMUTs 阻抗频率特性测试装置

图 13 和图 14 所示为边长 60 μm ，单元数 10×10 的正六边形薄膜 CMUTs 阵列芯片的阻抗频率特性测试结果。

图13 CMUTs 阻抗幅值/相位频率特性

图14 CMUTs 阻抗实部/虚部频率特性

从图13中可以看出,在1.6 MHz至2.6 MHz频率范围内,阻抗幅值整体上随着频率的增大而减小。相位-频率曲线在2.17 MHz附近出现极值,表示CMUTs芯片在该谐振频率附近出现谐振现象,该谐振频率与CMUTs芯片的固有谐振频率接近,阻抗相位变化随着偏置电压的增大而增大,而谐振频率随着偏置电压的增大而减小;阻抗幅值-频率曲线在2.17 MHz附近出现串联和并联谐振现象,如图中放大区域所示。串联和并联谐振频率对应于阻抗幅值的极小值和极大值点,偏置电压越大,串联和并联谐振现象越趋向于明显。图14中的实部-频率曲线的变化特征与相位-频率曲线的变化特征相似,而虚部-频率曲线的变化特征类似于阻抗幅值-频率曲线;即偏置电压增大,谐振频率减小,阻抗实部增大,虚部极值点趋于明显。测试结果表明,阻抗频率特性的变化趋势以及谐振频率随偏置电压的变化特征符合CMUTs的理论变化规律。阻抗频率特性测试结果表明CMUTs芯片在直流偏置和交流电压共同作用下可以正常工作,其电学特征基本达到设计预期。

4 结论

为开发可与IC集成的CMUTs制备工艺,面向共晶键合技术设计了圆形及正六边形空腔CMUTs单元结构以及相应的阵列芯片结构。通过有限元仿真和理论分析预测CMUTs结构在大气压力、热应力作用下的薄膜变形情况以及塌陷电压、谐振频率等主要性能参数。分析结果表明所设计的CMUTs结构在热应力、大气压力共同作用下的最大薄膜变形小于空腔高度的16.7%,塌陷电压以及谐振频率参数满足设计要求。对采用共晶键合技术制备的CMUTs芯片形貌、基本结构参数、电容及阻抗频率特性进行测试,测试结果表明CMUTs芯片结构参数、电容以及阻抗频率特性与设计预期一致,芯片能正常工作,验证了CMUTs结构设计与工艺的可行性。后续工作还需进一步对其振动特性、超声发射与接收性能进行定量表征,以进一步优化其制备工艺流程及结构设计。

参考文献

- [1] SALIM M S, MALEK M F, HENG B W, et al. Capacitive micromachined ultrasonic transducers: Technology and application [J]. Journal of Medical Ultrasound, 2012, 20: 8-31.

- [2] PUN S H, YU Y Y, ZHANG J, et al. Monolithic multiband CMUTs for photoacoustic computed tomography with in vivo biological tissue imaging[C]// IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2018, 65(3): 465-475.
- [3] 张慧, 何常德, 苗静, 等. 一种基于 MATLAB 的 CMUT 阵列设计与成像仿真方法[J]. 传感技术学报, 2014(4): 490-494.
- ZHANG Hui, HE Changde, MIAO Jing, et al. A MATLAB-based CMUT array design and imaging simulation method [J]. Journal of Sensor Technology, 2014 (4): 490-494.
- [4] LAMBERTI N, CALIANO G, IULA A, et al. A high frequency cMUT probe for ultrasound imaging of fingerprints[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2011, 172(2): 561-569.
- [5] ZHAO Y H, LU D J, ZHAO L B, et al. Capacitive micromachined ultrasonic transducers for biochemical detection with flexible high sensitivity[C]// IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2018, 924-927.
- [6] 张慧, 赵晓楠, 张雯, 等. 空气耦合式电容微超声换能器的设计与分析[J]. 仪器仪表学报, 2016(10): 2218-2225.
- ZHANG Hui, ZHAO Xiaonan, ZHANG Wen, et al. Design and analysis of air-coupled capacitive micro-ultrasonic transducer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016 (10): 2218-2225.
- [7] 卢兴强. 基于标准 CMOS 工艺的电容式微加工超声波传感器的设计、加工和测试[D]. 北京: 中国科学院大学, 2010.
- LU Xingqiang. Design, processing and testing of capacitive micromachined ultrasonic sensors based on standard CMOS process[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [8] PARK K K, LEE H J, KUPNIK M, et al. Fabrication of capacitive micromachined ultrasonic transducers via local oxidation and direct wafer bonding[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2011, 20(1): 95-103.
- [9] 苗静. 基于硅晶圆键合的 MEMS 电容超声传感器研究 [D]. 太原: 中北大学, 2013.
- MIAO Jing. Research on MEMS capacitive ultrasonic sensor based on silicon wafer bonding [D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
- [10] WANG X Q, YU Y D, NING J. Fabrication and characterization of capacitive micromachined ultrasonic transducers with low-temperature wafer direct bonding[J]. Micromachines, 2016, 7(12): 226.
- [11] BAHETTE E, MICHAUD J F, CERTON D, et al. Progresses in cMUT device fabrication using low temperature processes [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2014, 24(4): 045020.
- [12] HU Y J, ZHAO Y L. Fabrication of CMUTs with a low temperature wafer bonding technology[J]. IEEE Sensors, 2015: 1126-1129.
- [13] TSUJI Y, KUPNIK M, KHURI-YAKUB B T. Low temperature process for CMUT fabrication with wafer bonding technique[C]// IEEE International Ultrasonics Symposium, 2010: 551-554.
- [14] 张慧, 宋光德, 靳世久, 等. 电容式微超声传感器的电极参数优化设计[J]. 传感技术学报, 2010, 23(7): 935-938.
- ZHANG Hui, SONG Guangde, JIN Shijiu, et al. Optimization design of electrode parameters for capacitive micro-ultrasonic sensors[J]. Journal of Sensor Technology, 2010, 23(7): 935-938.
- [15] BAYRAM B, YARALIOGLU G G, ERGUN A S, et al. Influence of the electrode size and location on the performance of a CMUT[C]// IEEE International Ultrasonics Symposium, 2001, 2: 949-952.
- [16] YU Y, PAN H S, MARK P U, et al. Design of a collapse-mode CMUT with an embossed membrane for improving output pressure[C]// IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63(6): 854-863.
- [17] LI Z K, ZHAO L B, YE Z Y, et al. Resonant frequency analysis on an electrostatically actuated microplate under uniform hydrostatic pressure [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(19): 195108.
- [18] LI Z K, ZHAO L B, JIANG Z D, et al. Mechanical behavior analysis on electrostatically actuated rectangular microplates [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2015, 25(3): 035007.

作者简介: 李支康, 男, 1987 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为微加工超声换能器(CMUTs, PMUTs)及其在生物检测领域的应用、电子皮肤以及可穿戴式生物传感技术。

E-mail: zhikangli@xjtu.edu.cn

赵立波(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为微纳制造及 MEMS 传感器技术。

E-mail: libozhao@xjtu.edu.cn

赵一鹤, 男, 1993 年出生, 博士研究生。主要研究方向为 CMUT 生化和谐振电路

E-mail: johnzhaoyihe@stu.xjtu.edu.cn

李杰, 男, 1988 年出生, 博士研究生。主要研究方向为基于电容式微机

械超声传感器(CMUTs)的流体黏密度检测技术研究。

E-mail: xjlijie@stu.xjtu.edu.cn

郭帅帅,男,1994年生,硕士研究生,主要研究方向为压电超声换能器。

E-mail: gsscth@xjtu.stu.edu.cn

罗国希,男,1987年出生,博士,副教授,硕士研究生导师。主要研究方向为微纳制造。

E-mail: luoguoxi@mail.xjtu.edu.cn

徐廷中,男,1990年出生,博士研究生。主要研究方向为 MEMS 微压测量传感器、微加工超声传感器(PMUTs)。

E-mail: tingzhongxu@163.com

刘子晨,男,1996年3月出生,硕士研究生。主要研究方向为电容式微加工超声换能器(CMUT)及其在超声治疗领域的应用。

E-mail: mhlzc1996@stu.xjtu.edu.cn

李雪娇,女,1994年出生,硕士研究生。主要研究方向为微纳制造。

E-mail: lixj94@stu.xjtu.edu.cn

蒋庄德,男,1955年出生,博士,教授,博士研究生导师,中国工程院院士。主要研究方向为微型机械电子系统(MEMS)与微纳米技术。

E-mail: zdjiang@xjtu.edu.cn