

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2016.12.015

专题:数字诊疗装备研发

## 电容式微机械超声换能器技术概述

何常德<sup>1,2</sup>, 张国军<sup>1,2</sup>, 王红亮<sup>1,2</sup>, 薛晨阳<sup>1,2</sup>, 张文栋<sup>1,2</sup>

1. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051; 2. 中北大学仪器与电子学院, 山西 太原 030051

**【摘要】**电容式微机械超声换能器(CMUT)已成为一种重要的新型换能器,在医学成像领域的应用潜力得到了广泛关注。对CMUT超声换能器技术进行深入研究,对于提高我国超声医疗设备及其关键核心部件的竞争力有着重要意义。首先介绍了CMUT超声换能器制造工艺技术的发展过程和现状,其次总结了其在各种医学应用中的基本情况,包括器件的结构、尺寸和性能,最后分析了目前CMUT换能器技术存在的问题,并指出了CMUT换能器技术的未来发展趋势。

**【关键词】**电容式微机械超声换能器;微电子机械系统;制造;超声成像

**【中图分类号】**TB552

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2016)12-1249-04

### Survey of capacitive micro-machined ultrasonic transducer

HE Changde<sup>1,2</sup>, ZHANG Guojun<sup>1,2</sup>, WANG Hongliang<sup>1,2</sup>, XUE Chenyang<sup>1,2</sup>, ZHANG Wendong<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement (North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051, China; 2. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China

**Abstract:** Capacitive micro-machined ultrasonic transducer (CMUT) is a new type of ultrasonic transducer, attracting more and more attention in medical imaging field. The study of CMUT is of great significance to improve the competitiveness of China's ultrasound medical equipment and the key core components. The fabrication process of CMUT is introduced, and the applications of CMUT are summarized, including the structure, size and performance of CMUT. Finally, the existing problems of CMUT are analyzed, and the development trend of CMUT is put forward.

**Keywords:** capacitive micro-machined ultrasonic transducer; micro-electro-mechanical system; fabrication; ultrasound imaging

### 前言

电容式微机械超声换能器(Capacitive Micro-machined Ultrasonic Transducer, CMUT)是一种静电式换能器,它的膜片依靠静电吸引力推动发声,由微电子机械系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)技术中的微加工工艺制造完成。CMUT换能器产生于20世纪90年代<sup>[1-2]</sup>,正是MEMS技术的快速发展促使其产生和快速发展。与传统压电换能器相比,利用MEMS技术制作的CMUT超声换能器,具有高密度阵元集成制造、硅材料与人体介质阻抗匹

配好、高灵敏度、宽频带和高机电转换效率等优势<sup>[3-4]</sup>。CMUT换能器具有的这些技术优势使其不仅仅成为压电换能器的替代品,而且能够给超声成像技术带来革命性变化。它是一种重要的新型换能器器件,在医学成像上的应用潜力已经得到了广泛重视。

### 1 CMUT换能器的工作原理

CMUT换能器结构是一个平行板电容器,一个典型的CMUT器件结构如图1所示。该结构由上极板、下极板、绝缘层和空腔构成平行板电容器,均由MEMS微加工工艺完成。上极板为可动膜片,主要是在氮化硅( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )或硅(Si)上淀积铝(Al)膜制作而成,下极板通常在高掺杂Si衬底上淀积Al膜制作而成,且两者之间形成欧姆接触,下极板固定不可动。

CMUT换能器可用于发射超声波和接收超声波。无论在发射超声波模式还是接收超声波模式,都施加一个直流(Direct Current, DC)偏置电压。在

**【收稿日期】**2016-12-09

**【基金项目】**国家重点研发计划(2016YFC0101900);国家杰出青年科学基金(61525107)

**【作者简介】**何常德,硕士,讲师,研究方向:微电子机械系统、超声成像系统, E-mail: hechangde@nuc.edu.cn

**【通信作者】**张国军,博士,副教授,研究方向:MEMS矢量水听器、声换能器, E-mail: zhangguojun1977@nuc.edu.cn

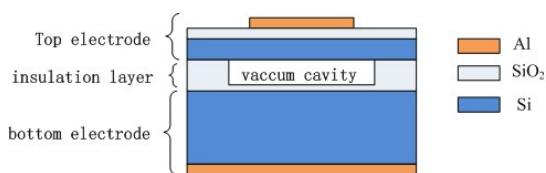


图 1 CMUT 换能器结构图  
Fig.1 Cross section of a capacitive micro-machined ultrasonic transducer

发射超声波模式下,施加交流(Alternating Current, AC)电压叠加到 DC 电压上,且 DC 电压大于 AC 电压。AC 电压使上极板和下极板产生变化的静电吸引力,推动上电极膜片振动而发出声音。在接收超声波模式下,施加了 DC 偏置电压的 CMUT 换能器,上极板膜片向下弯曲并保持静止不动,入射超声波到达上极板膜片,引起膜片振动,空腔间隙放生变化,从而电容发生变化,最终导致电荷的流入与流出,检测电荷的流入和流出情况而达到检测入射超声波的目的。

## 2 制造工艺技术

CMUT 换能器技术随着 MEMS 技术的发展而发展。CMUT 换能器制造工艺技术经历了两个阶段:牺牲层释放结构工艺技术和硅晶圆键合工艺技术。

### 2.1 牺牲层工艺技术

牺牲层工艺是早期 CMUT 换能器制作的工艺技术,这也是当时 CMUT 换能器制造的唯一选择<sup>[5-6]</sup>,典型的牺牲层工艺技术如图 2 所示。首先,高掺杂浓度的硅衬底上淀积一层  $\text{Si}_3\text{N}_4$  作为绝缘层和腐蚀停止层,然后淀积一层非晶硅或多晶硅并图形化,如图 2a 所示,这层非晶硅层或多晶硅层作为牺牲层。接着,淀积第 2 层  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,形成振动薄膜,如图 2b 所示。再一次图形化,在  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜的边缘开出刻蚀空窗口,并用氢氧化钾溶液通过窗口腐蚀非晶硅或多晶硅,达到去除牺牲层和释放薄膜的目的,如图 2c 所示。再一次淀积  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,真空密封刻蚀空窗口,然后形成金属电极,如图 2d 所示。

### 2.2 硅晶圆键合工艺技术

牺牲层工艺技术存在淀积不均匀、腐蚀不均匀、应力大和空腔间隙不均匀等一系列问题。随着 MEMS 技术的发展,开发的硅晶圆键合工艺技术解决了以上问题<sup>[7]</sup>。典型的硅晶圆键合工艺技术如图 3 所示。首先,选用带有氧化层的硅衬底材料,图形化氧化层形成空腔图形,如图 3a 所示)。然后,带图形的氧化片与绝缘衬底上的硅(Silicon-On-Insulator,

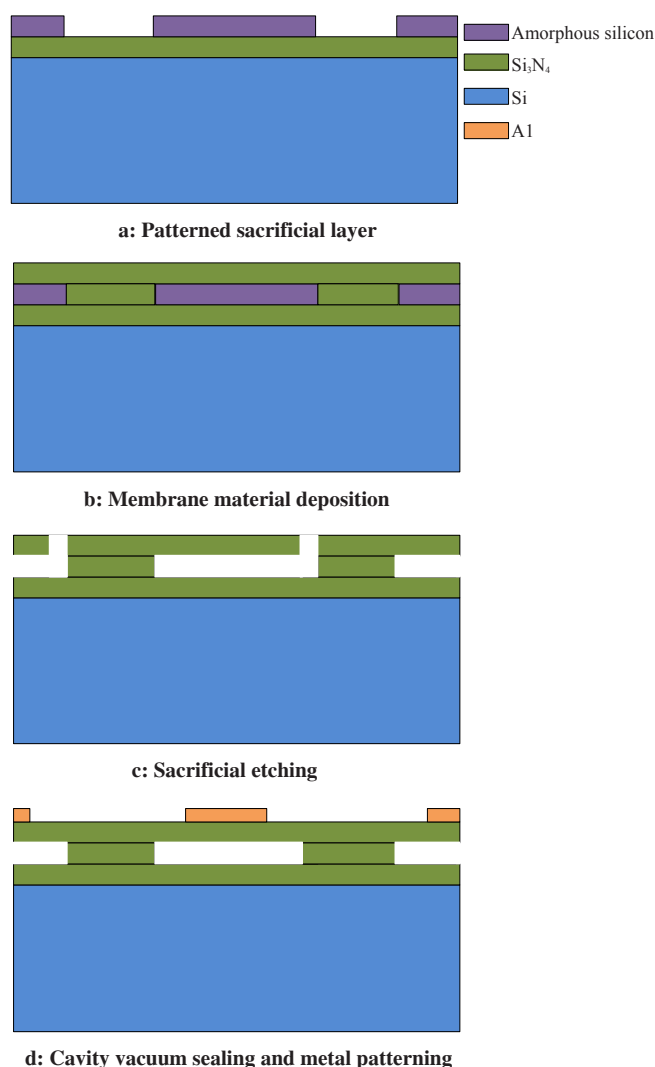


图 2 牺牲层释放结构工艺流程图  
Fig.2 Sacrificial release process

SOI) 硅片键合,如图 3b, SOI 硅片的器件层厚度均匀。接着,去除 SOI 硅片的衬底层和氧化硅绝缘层,如图 3c,均匀的器件层作为 CMUT 换能器的振动薄膜。最后,制作上下电极,如图 3d。硅晶圆键合工艺技术早期是采用上面介绍的直接键合技术,后来为了制作小腔隙器件,发展了硅局部氧化(Local Oxidation of Silicon, LOCOS)硅晶圆键合工艺<sup>[8]</sup>。为了制作 CMUT 二维阵列,解决换能器与专用集成电路互联的问题,开发了硅通孔互联技术<sup>[9-10]</sup>。

## 3 CMUT 换能器的典型应用

CMUT 超声换能器具有高密度阵元集成制造、硅材料与人体介质阻抗匹配好、高灵敏度、宽频带和高机电转换效率等优势,已成为一种重要的新型换能器器件,在医学成像应用上得到广泛视。世界上研究 CMUT 的各个机构都为 CMUT 的发展贡献了力量,在此仅针对一些典型设计和代表性成果进行总

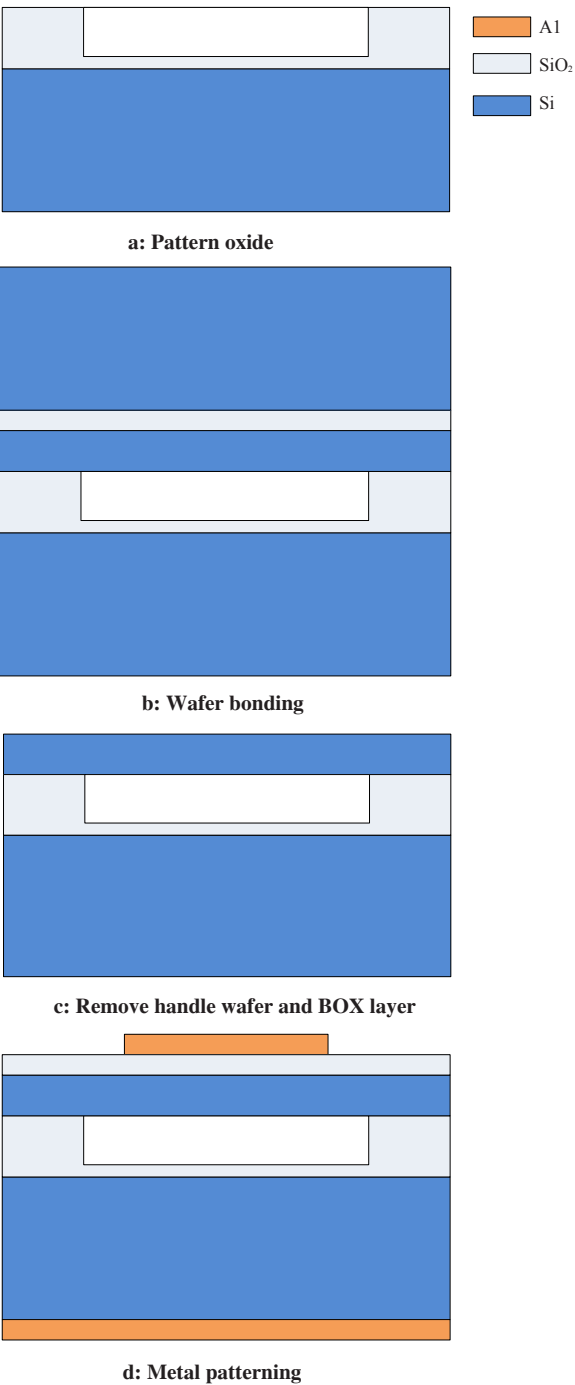


图 3 硅晶圆键合工艺流程图  
Fig.3 Wafer bonded process

结和介绍。以下 3 个例子代表了 CMUT 换能器研究当前的水平：(1)美国斯坦福大学 Khuri-Yakub 研究小组 2013 年制作出一个 5 MHz 的 1 024 个阵元(32×32)的 CMUT 二维阵列,实验室内取得初步的测试结果<sup>[10]</sup>；(2)美国佐治亚理工学院 F. Levent Degertekin 研究小组在 2014 年研制出两个环形阵列结构的微电容超声换能器,外环有 56 阵元用于发射和内环有 48 阵元用于接收,小组在实验室内利用该 CMUT 阵列器件实现对鸡心模型的初步成像<sup>[11]</sup>；(3)日本日立株式会在 2009 年第 82 届日本超声波医学会议上宣布了一

款用于乳腺检测的 CMUT 超声波换能器探头。目前,CMUT 超声换能器的应用研究方向中,一方面向着代替传统压电换能器功能的方向发展；另一方面利用 CMUT 换能器独有的特点,在二维阵列技术和血管内超声等微型器件<sup>[12-13]</sup>的方向发展。

#### 4 总结

目前尽管 CMUT 超声换能器技术在实验室内已经取得了众多研究成果,但其尚未走向商业化道路,还存在一些技术瓶颈需要去克服,其中主要问题有：(1)发射性能与接收性能之间的平衡问题；(2)工作电压问题；(3)非线性问题；(4)批量制造问题。尽管目前 CMUT 换能器的成像结果均还是实验室内的结果,但是随着 CMUT 换能器技术及其电路技术的进一步完善和成熟,基于 CMUT 探头的超声成像设备将很快会步入商用阶段。

本研究受国家重点研发计划“数字诊疗装备研发”重点专项(2016YFC0101900)资助,项目简介如下。  
项目名称：基于 CMUT 环形阵列的乳腺癌诊断超声 CT 系统研究

乳腺是唯一无骨等硬组织遮挡的软组织,可以将超声 CT 成像技术应用于该组织的成像,实现超声所有参数的成像,包括声阻抗、弹性、延时、多普勒等成像。本项目创新性地提出基于 CMUT 环形阵列的超声 CT 成像系统,可以获得微小密度变化带来的延时差别,并融合弹性和 B 型声阻抗成像,形成新的超声成像方法,对乳腺癌的诊断将具有更好的特异性和灵敏度。本项目以 CMUT 环形阵列芯片的微制造工艺和高分辨率多模态成像算法这两项关键技术为突破点,开展 CMUT 换能器环形阵列的设计方法、制备工艺、水中声学封装与成阵技术、成像算法和系统集成等方面的研究,最终研制出系统样机并完成临床前实验研究。

本项目在国内外首次提出将 CMUT 换能器应用于超声 CT 成像系统,与传统的压电换能器相比,CMUT 换能器具有宽频带、高灵敏度和阵列易集成的特性,使其兼具性能与成本优势,是下一代超声换能器技术的发展方向。本课题的研究也将为我国新型医用超声波换能器的发展提供理论基础和关键技术支持,并促进我国医学超声成像设备技的技术革新,促进我国经济的发展。

#### 【参考文献】

[1] HALLER M I, KHURI Y T. A surface micromachined electrostatic

- ultrasonic air transducer[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 1996, 43(1): 1-6.
- [2] SOH H T, LADABAUM I, ATALAR A, et al. Silicon micromachined ultrasonic immersion transducer[J]. Appl Phys Lett, 1997, 69(24): 3674-3676.
- [3] ERGUN A S, YARALIOGLU G G, KHURI Y T. Capacitive micromachined ultrasonic transducers: theory and technology[J]. J Aerosp Eng, 2003, 16(2): 76-84.
- [4] ORALKAN O, ERGUN A, JOHNSON J, et al. Capacitive micromachined ultrasonic transducers: next-generation arrays for acoustic imaging? [J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2002, 49(11): 1596-1610.
- [5] HALLER M I, KHURI-YAKUB B T. A surface micromachined electrostatic ultrasonic air transducer[C]. Ultrasonics Symposium, 1994. Proceedings. 1994.
- [6] LADABAUM I, JIN X, SOH H T, et al. Microfabricated ultrasonic transducers: towards robust models and immersion devices[C]. Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 1996: 335-338.
- [7] HUANG Y, HAEGGSTROM E, BAYRAM B, et al. Collapsed regime operation of capacitive micromachined ultrasonic transducers based on wafer-bonding technique[C]. Ultrasonics, 2003 IEEE Symposium on, 2003: 1161-1164.
- [8] PARK K K, LEE H, KUPNIK M, et al. Fabrication of capacitive micromachined ultrasonic transducers *via* local oxidation and direct wafer bonding[J]. J Microelectromech Syst, 2011, 20(1): 95-103.
- [9] GURUN G, HASLER P, DEGERTEKIN F. Front-end receiver electronics for high-frequency monolithic CMUT-on-CMOS imaging arrays[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2011, 58(8): 1658-1668.
- [10] WYGANT I, ZHUANG X, YEH D, et al. Integration of 2D CMUT arrays with front-end electronics for volumetric ultrasound imaging[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2008, 55(2): 327-342.
- [11] ZAHORIAN J, HOCHMAN M, XU T, et al. Monolithic CMUT-on-CMOS integration for intravascular ultrasound applications[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2011, 58(12): 2659-2667.
- [12] MATRONE G, SAVOIA A, TERENCE M, et al. A volumetric CMUT-based ultrasound imaging system simulator with integrated reception and  $\mu$ -beamforming electronics models[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2014, 61(5): 792-804.
- [13] YEH D, ORALKAN O, WYGANT I, et al. 3-D ultrasound imaging using a forward-looking CMUT ring array for intravascular/intracardiac applications[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2006, 53(6): 1202-1211.

(编辑:黄开颜)



张国军 男,博士,中北大学仪器与电子学院副教授。自2006年硕士毕业以来,一直从事MEMS矢量水听器的研究工作。主持包括国家重点研发计划重点专项、国家自然科学基金青年基金在内的多项国家、省部级课题,同时作为科研骨干参与国防973、国家863、总装型谱、国防科工局基础预研等多项国家级课题。获得国家科学技术发明二等奖1项(排名第6);国家发明专利授权16项(排名第一8项);发表与本课题相关的学术论文50余篇,其中被SCI收录9篇。曾获中北大学先进科技工作者荣誉称号。是《振动与冲击》声学换能器领域的审稿人。