



# 用于水下金属探测成像的压电式微机械超声波换能器

杨晋玲

(中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:** 为满足目前对水下金属、蛙人等检测的应用需要, 设计一种用于水下金属探测成像的压电式微机械超声换能器。在该结构中, 在顶部电极和下电极之间插入 AlN 层, 用于发射和接收超声。当测试距离达到 10 m 以上就可以满足实际应用需求, 而该换能器经过实验得出最远的测试距离为 12.8 m, 且在 12.8 m 处测试值与理论值误差仅为 0.67 cm, 完全可以达到实际检测需要。在一个标准大气压下, 利用微系统激光分析仪 MSA400 对该传感器进行膜位移测量, 其测量值为 0.28  $\mu\text{m}$ , 与理论结果误差为 1%。并且详细介绍该传感器的工艺实现过程。利用该传感器实现二维水下超声成像, 证明水下存在金属矩形物体。该实验有利于水下超声成像系统的建立。

**关键词:** PMUT; C-V 测试; 超声成像; 远距离

中图分类号: O426.9

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2019)09-0084-05

## A piezoelectric micromechanical ultrasonic transducer for underwater metal detection imaging

YANG Jinling

(Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory,  
North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to meet the current application needs of underwater metal and frogman detection. A piezoelectric micromachined ultrasonic transducer(PMUT) for underwater imaging is designed. In the structure, Insert AlN layer between top electrode and lower stage. The transducer is mainly used in a long distance test of underwater environment, the farthest distance is 12.8 m, and the error between the test value and the theoretical value at 12.8 m is only 0.67 cm. The micro system laser analyzer MSA400 has measured the displacement of the sensor at a standard atmospheric pressure of 0.28  $\mu\text{m}$ , and the theoretical error is 1%. The manufacturing operation of the sensor is introduced in detail. Two-dimensional underwater ultrasonic imaging is realized using the sensor, which proved the existence of rectangular objects under water. The experimental results showed that our work can facilitate the establishment of underwater ultrasonic imaging system.

**Keywords:** PMUT; C-V test; ultrasonic imaging; remote

收稿日期: 2018-12-26; 收到修改稿日期: 2019-01-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61525108)

作者简介: 杨晋玲 (1992-), 女, 山西太原市人, 硕士研究生, 专业方向为电子测量技术。

## 0 引言

微机电系统 (micro electro mechanical system, MEMS) 的概念始于 20 世纪 80 年代, 其具有微型化、智能化、多功能、高集成度和适于大批量生产的特点<sup>[1-2]</sup>。1962 年, 最早的 MEMS 传感器-硅微压力传感器问世, 随后 MEMS 传感器得到了快速发展。虽然当时压电式传感器的概念也被提出, 但是受到半导体工艺水平的限制, 一直没有得到实际的应用。得益于微加工技术的不断进步, 1999 年, 成功研制出了动态范围超过 100 dB 且可进行空气耦合无损检测的超声传感器<sup>[3-8]</sup>。2016 年, 随着封装技术的发展, 压电式微机械超声波传感器在医学和水中得到了应用<sup>[9-13]</sup>。压电式微机械超声波传感器采用微加工工艺, 其传感器的一致性高, 更容易与水环境实现声阻抗匹配, 容易制成阵列而实现二维和三维成像。另外, 其加工工艺与集成电路的加工工艺具有兼容性, 可以实现传感器与电路的集成封装。因此, 世界科技强国对电容式微机械超声波换能器进行了大量研究。但是现在各国对压电式微机械超声波换能器都集中在中高频、短距离方面的应用, 在远距离成像领域的应用少见报道。近些年来, 世界各个国家都加大了对海洋的开发与利用, 如水下避障, 沉物的搜索与打捞, 水下测距等。因此, 超声成像在远距离水下应用方面有迫切需求和广泛应用前景。

目前在金属探测成像使用的超声换能器中, 压电式超声换能器以其较好的性能、成熟稳定的制作工艺和较低的成本, 处于绝对主导地位。但是随着超声换能器应用领域的扩大, 传统压电式超声换能器的不足之处也逐渐暴露。其中最主要的问题是压电材料与工作介质如水之间的声阻抗失配, 这不仅会降低界面处的声波透射系数, 还会严重影响发射及接收灵敏度、轴向分辨率和信息的丰富程度, 降低系统的带宽和能量耦合效率。而解决阻抗失配的方法, 一般是在压电晶片和工作介质层之间加一个匹配层。但是这种方法又会带来带宽损失、增加系统复杂度和增加制作成本等问题。

因此, 针对以上问题, 进行了水下远距离成像设计, 并实现了应用压电式微机械超声波换能器 (PUMT) 进行远距离水下成像, 目前并未见到相关的报道。本文设计的 PMUT 工艺简单, 可以量产,

其结构新颖, 空腔设计合理, 可以满足远距离水下金属检测与成像的需求。

## 1 原理

### 1.1 结构设计

超声波在介质中传播时能量会产生损耗, 损耗的大小与介质的种类、温度、传播距离和超声波的频率有关。为了实现超声波在水下远距离探测的应用, 本文设计了一种工作频率为 400 kHz 的超声换能器 PMUT。PMUT 主要由振动薄膜、衬底、上下电极、支撑、AlN 和空腔组成, 每个传感器由若干个敏感单元组成, 其结构如图 1 所示。PMUT 工作在发射模式时, 根据 AlN 的特性, 对 AlN 施加交流激励电压 (VAC) 使 AlN 振动, 引起介质的振动从而产生超声波。PMUT 工作在接收模式时, 超声波使振动薄膜产生受迫振动, 引起 AlN 电压的变化从而产生电信号, 对电信号进行检测。

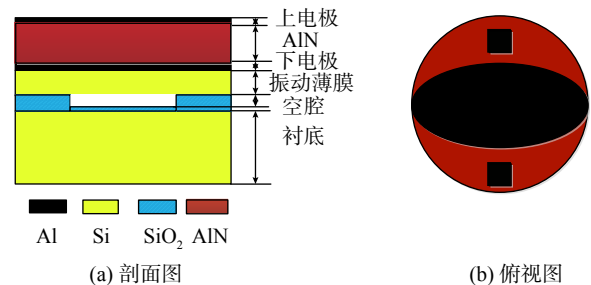


图 1 PMUT 结构

工作频率是 PMUT 的重要性能参数之一。PMUT 振动频率与 AlN 的厚度和半径有关。所以对于同一个频率可以由不同的 AlN 厚度和半径组合来实现。因此, 在设计 AlN 薄膜的结构尺寸时要权衡考虑。通过 Ansys 力电耦合仿真, 本文所设计的压电式微机械超声波传感器的结构参数如表 1 所示, 满足远距离水下金属检测的要求。

表 1 器件主要参数

结构参数	参数值
上电极厚度/ $\mu\text{m}$	0.2
AlN 厚度/ $\mu\text{m}$	3
AlN 半径/ $\mu\text{m}$	90
腔高 (含绝缘层)/ $\mu\text{m}$	0.8
空气中频率/MHz	1.52
静态电容值/pF	910

## 1.2 工艺

本文设计的传感器用的是6寸(1寸=3.33cm)的氧化片与SOI片进行键合,SOI片与氧化片晶向均为 $\langle 100 \rangle$ ,主要工艺流程如图2所示。

1)在氧化硅的正面做图形,刻蚀 $0.65\ \mu\text{m}$ 的 $\text{SiO}_2$ ,见图2(a)。

2)SOI片和氧化片键合。SOI片器件层与图形化的氧化片硅-硅键合,见图2(b)。

3)去掉SOI片衬底层与背面氧化层,见图2(c)。

4)在正面沉积Al,作为下电极,见图2(d)。

5)在正面沉积AlN,见图2(e)。

6)在正面沉积Al,作为上电极,见图2(f)。

在以上工艺过程中,低温晶片键合技术是至关重要的。因为低温加工能有效避免热应力、污染等问题的引入,从而提高键合的强度。且能保证PMUT在水中工作时传感器腔的密封性,在高电场下防止水的水解,减少能量损失,而有效得避免传感器膜的击穿。

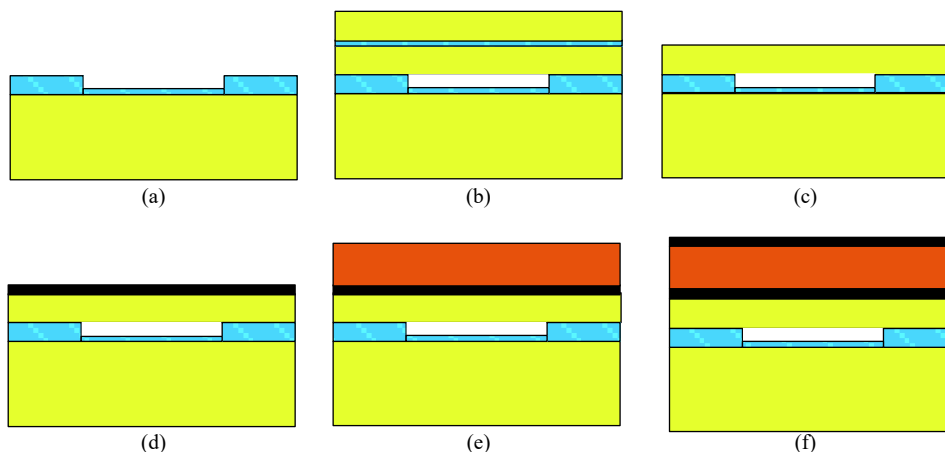


图2 工艺流程图

## 2 实验验证

### 2.1 C-V 特性曲线测试

对PMUT进行C-V曲线测试(E4990A阻抗分析仪),施加从 $-80\ \text{V}$ 到 $80\ \text{V}$ 的直流偏置电压,频率为 $1.52\ \text{MHz}$ ,测量结果如图3中的黑色曲线。红色曲线是通过Ansys仿真得到的理论C-V曲线,从图中可以看出,PMUT的理论C-V特性与测量结果基本相同。测量时电压超过 $75\ \text{V}$ 后,随着电压的增加,电容的增加变慢,说明此时振动薄膜已塌陷,

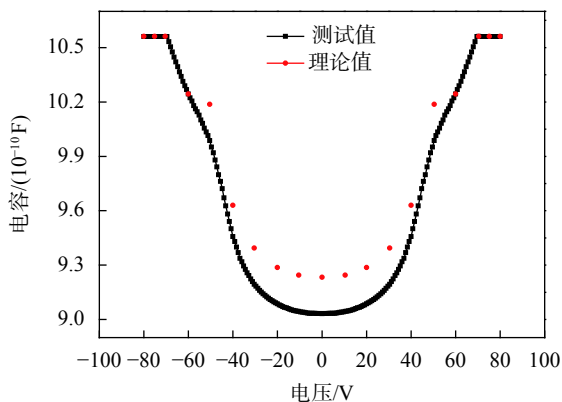


图3 C-V 测试

PMUT的塌陷电压为 $75\ \text{V}$ ,与仿真 $70\ \text{V}$ 的误差为 $7\%$ ,这可能是由于加工过程中腔高、绝缘层的厚度误差等原因造成的。当直流偏置电压为 $0\ \text{V}$ 时,PMUT静态电容值为 $900\ \text{pF}$ ,与设计值 $910\ \text{pF}$ ,误差为 $1\%$ 。

### 2.2 振动测试

为了验证本文所设计微电容式超声波换能器的性能,用微系统激光分析仪MSA400对换能器进行了测试。测试时微压电超声波换能器的交流激励电压为 $20\ \text{V}$ 时,测得换能器的谐振频率为 $1.60\ \text{MHz}$ ,如图4所示。与仿真固有频率 $1.5\ \text{MHz}$ 的误差为 $6.7\%$ 。产生的误差主要是由于加工过程中的结构参数误差引起的。AlN薄膜振动到最低位置和最高位置时如图5所示,从图中可以看出薄膜的最大位移为 $280\ \text{pm}$ ,PMUT具有发射超声波的能力。

### 2.3 水下远距离测试实验

PMUT进行水下测距的实验方案如图6所示。首先,利用信号发生器(Tektronix DPO)产生一个脉冲信号,每一个脉冲信号包含3个频率为 $400\ \text{kHz}$ ,幅度为 $800\ \text{mV}$ 的正弦信号。然后,功率放大器

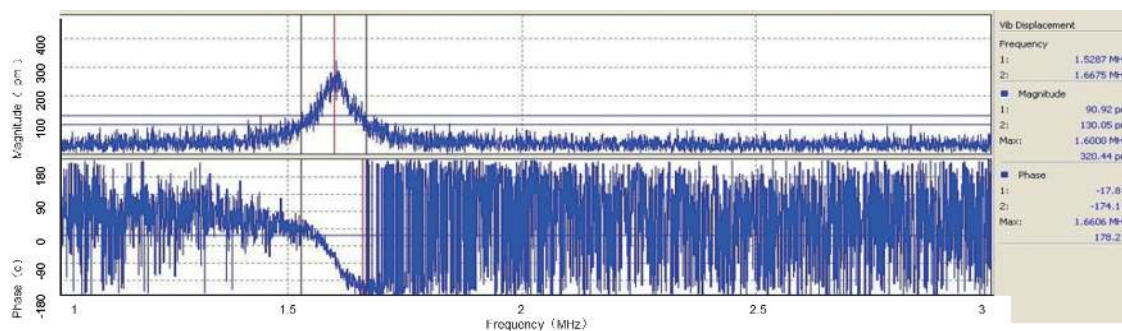


图 4 MSA 测试

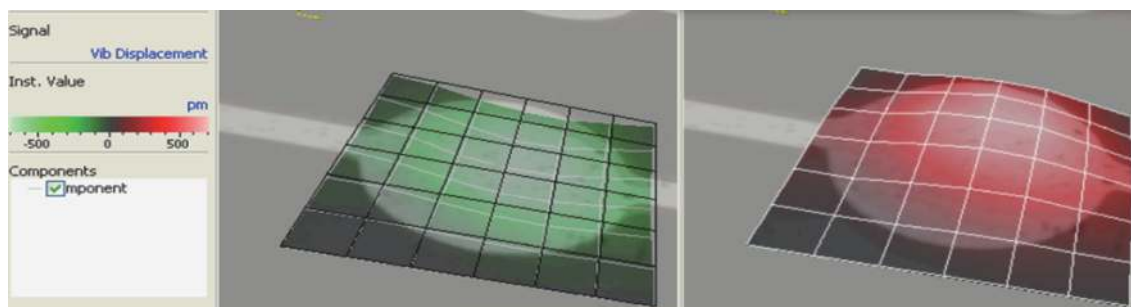


图 5 薄膜振动

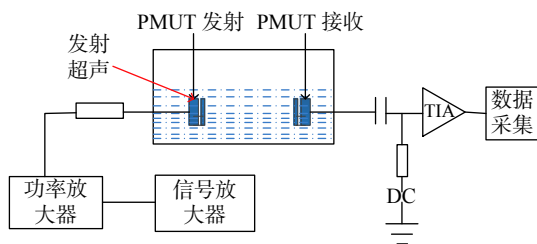


图 6 水下金属探测实验装置示意图

(GA-2500A)将脉冲信号放大 100 倍驱动 PMUT 发射超声波。超声波达到 PMUT 时,引起 PMUT 膜的振动,从而引起电荷量的变化产生电压信号,将信号输入示波器(Tektronix AFG3022C)得到 PMUT 的接收信号,如图 7 所示。超声波在水中的传播速率为 1 480 m/s,通过计算接收信号发和发射信号之间的时间差可以得到发射 PMUT 和接收 PMUT 之间的距离。利用这种测试方法测出 PMUT 的最大

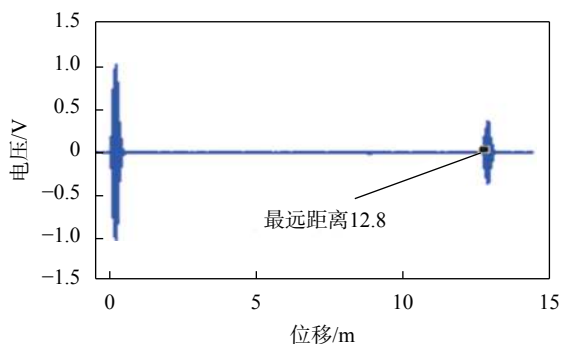


图 7 最大发射距离

发射距离为 12.8 m,能够满足水下远距离应用的目的并且测试距离远超现在所报道的器件。距离测试如表 2 所示。

### 2.4 水下成像

实验水下成像装置如图 8(a)所示。成像目标是放置在距离传感器 1 m 的指定距离的铝块。利用收发一体 PMUT 进行发射与接收。将 PMUT 传感器从水箱的左侧移动到成像目标的右侧,采集接收信号。利用 Matlab 进行算法成像,对接收信号进行带通滤波处理,获得初始二维超声成像结果,然后对信号进行包络检测、对数压缩、图像处理、灰度转换,最后得出金属灰度图如图 8(b)所示。从图中可以明显看出目标的存在,并且可以大致判断目标金属的大体轮廓。因此,本实验证明了所设计的换能器可以用于水下远距离金属成像。

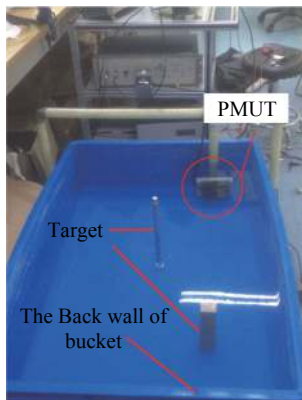
### 3 结束语

本文设计了一种用于水下成像的 PMUT,详细介绍了其工艺制作过程及所用材料的参数,为 PMUT 设计与工艺实现提供参考。设计的测试实验具有良好的重复性,且设计的压电式微机械超声换能器(PMUT)最大测试距离为 12.8 m,最大误差为 0.67 cm,能够满足远距离水下测试与成像的要求,具有良好的应用前景。本文的成像方法对水下超声成像具有参考意义。

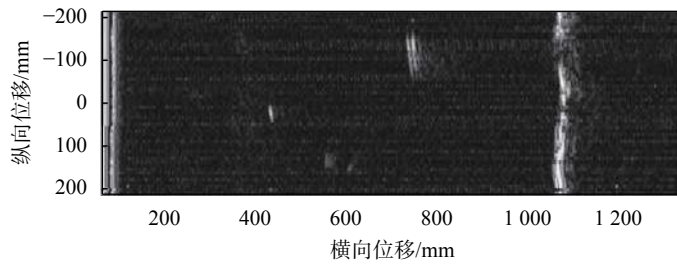


表2 两个 PMUT 之间的真实距离和测量距离之差

编号	真实距离/cm	测试距离/cm	误差/cm	编号	真实距离/cm	测试距离/cm	误差/cm
1	100	100.25	0.25	8	800	800.55	0.55
2	200	200.27	0.27	9	900	900.57	0.57
3	300	300.38	0.38	10	1 000	1 000.62	0.62
4	400	400.40	0.40	11	1 100	1 100.64	0.64
5	500	500.42	0.42	12	1 200	1 200.66	0.66
6	600	600.47	0.47	13	1 280	1 280.67	0.67
7	700	700.53	0.53				



(a) 水下成像实验



(b) 目标成像结果

图8 水下成像装置及成像结果

## 参考文献

- [1] LU Y, TANG H, WANG Q. Waveguide piezoelectric micromachined ultrasonic transducer array for short-range pulse-echo imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(19): 1101.
- [2] 于佳琪. 基于 Si-SOI 键合的微电容超声波换能器设计 [D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [3] MASSIMINO G, COLOMBO A, PROCOPIO F, et al. Multiphysics modelling and experimental validation of an air-coupled array of PMUTs with residual stresses[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2018, 28(5): 054005.
- [4] 穆林枫, 张文栋, 何常德, 等. 微电容超声传感器的设计与测试 [J]. *仪表技术与传感器*, 2015(8): 1-3.
- [5] SEIFI M, WALTER M A. Accurate prediction of functional, structural, and stability changes in PITX2 mutations using in silico bioinformatics algorithms[J]. *Plos One*, 2018, 13(4): 0195971.
- [6] SHIEH B, SABRA K G, DEGERTEKIN F L. A hybrid boundary element model for simulation and optimization of large piezoelectric micromachined ultrasonic transducer arrays[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2018(99): 50-59.
- [7] 张慧, 宋光德, 官志坚, 等. 电容式微加工超声传感器结构参数对性能的影响分析 [J]. *传感技术学报*, 2008, 21(6): 951-953.
- [8] JEONG B G, KIM D K, HONG S W, et al. Performance and reliability of new CMUT design with improved efficiency[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2013, 199(9): 325-333.
- [9] EMADI T A, BUCHANAN D A. Multiple moving membrane CMUT with enlarged membrane displacement and low pull-down voltage[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2013, 34(12): 1578-1580.
- [10] TSENG C, CHEN C J, YEN J H, et al. Next-generation sequencing profiling of mitochondrial genomes in gout[J]. *Arthritis Research & Therapy*, 2018, 20(1): 137.
- [11] 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.
- [12] WANG J, LIU Z, ZHOU Z. The N - terminal domain of pullulanase from *Anoxybacillus* sp. WB42 modulates enzyme specificity and thermostability[J]. *Chembiochem A European Journal of Chemical Biology*, 2018, 19(9): 949-955.
- [13] HAHAAMOVICH E, ROSENTHAL A. Ultrasound detection using acoustic apertures[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2018(99): 120-126.

(编辑:商丹丹)