

水下探测微电容超声波换能器线阵设计与封装^{*}

张 睿^{1,3}, 潘理虎¹, 陈立潮¹, 张永梅², 薛晨阳³, 张文栋³, 何常德³

(1. 太原科技大学计算机科学与技术学院 太原, 030024)

(2. 北方工业大学计算机学院 北京, 100144) (3. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原, 030051)

摘要 提出一种应用于水下探测的低频微电容超声波换能器阵列。在分析微电容超声波换能器阵列复合结构和工作原理的基础上,建立了换能器阵元和一维线阵的指向性表达式,并通过分析结构参数对指向性的影响,确定了阵列几何参数。针对微电容超声波换能器水下应用需求,研究了阵列水下封装方法,通过封装结构设计和封装材料的选取,完成了换能器阵列水密封装。同时,制定了换能器阵列性能测试方案,并搭建了相应的测试、探测系统,经测试换能器线阵-3 dB 主瓣宽度为 5°,最大旁瓣级为-13.5 dB,可实现水下 1 m 范围内的目标清晰探测。实验表明,提出的微电容超声波换能器阵列设计和封装方法合理,为改善微电容超声波换能器阵列水下探测性能提供了设计依据。

关键词 微电容超声波换能器; 阵列设计; 阵列封装; 水下探测

中图分类号 TB565; TB553

引 言

超声波具有较好的定向性能和穿透性,易于将声能集中传播,探测范围广,这些优势为快速、准确获取水下地理信息和资源信息提供了技术保障^[1]。通常将发射和接收超声波的探头称为超声换能器,它是水下超声探测系统最重要的部件,制约着水下探测技术的发展。基于微机电系统(micro-electro-mechanical system,简称 MEMS)制作的超声波换能器(micromachined ultrasonic transducer,简称 MUT)是现阶段超声波换能器研究的新热点以及将来的发展趋势。新型 MUT 利用高精度(微米量级)微电子和微机械加工技术严格降低了制作阵列的误差,在优化换能器及其阵列尺寸的同时提高了探测的分辨率^[2]。基于 MEMS 技术的微电容超声波换能器(capacitive micromachined ultrasonic transducer,简称 CMUT)被近似认为是一种下电极固定,上电极振动的微型平行板电容器,工作模式下通过驱动上电极的振动使平行电容间电容量发生改变,进而最终达到电能与声能互相转换的目的。

国内外对 CMUT 的研究多是针对 3 MHz 以上

医学探测应用,水下探测的研究刚刚起步,现有相关水下研究^[3-5]并不多见,且报道的 CMUT 频率与医学探测频率相近(≥ 2 MHz),限制了水下探测距离(≤ 300 mm)。相比目前国内外水下探测换能器主要采用的分立压电陶瓷探测阵列、集成压电陶瓷探测阵列而言,基于光刻工艺的 CMUT 拥有较低的声特性阻抗,能够在液体环境下实现良好的阻抗匹配,无需制备表面匹配层,频带较宽,灵敏度较高,且加工工艺复杂度较低,易于集成阵列^[6-8]。这些优势使得 CMUT 阵列满足成为水下高分辨率探测声呐的条件,在水下探测领域具有较好的发展前景。

笔者以实现小型化 CMUT 阵列水下高分辨目标探测为主要目标,开展了水下探测 CMUT 阵列几何优化设计、CMUT 水下封装和性能测试技术三方面的研究,为我国自主研发水下勘探超声设备的改进提供理论支撑。

1 工作原理

如图 1 所示,CMUT 阵列属于多层复合结构,阵列由多组阵元规则排列构成,单个阵元又由较多基础元素敏感单元并行规则排列组成。敏感单元结

^{*} 国家杰出青年科学基金资助项目(61525107);国家自然科学基金资助项目(61371143);“十二五”山西科技重大专项基金资助项目(20121101001);山西省中科院科技合作项目(20141101001);山西省科技攻关项目(20141039);太原科技大学博士科研启动项目(20162036);山西省应用基础研究资助项目(201801D221179)

收稿日期:2017-05-10;修回日期:2017-12-06

构如图 2 所示,由上而下依次为金属铝上电极、SOI 片的顶层硅制作的振动薄膜、氧化硅隔离层、氧化硅刻蚀得到的密闭真空腔体、氧化硅绝缘层、硅衬底及金属铝下电极构成。CMUT 的工作模式离不开直流偏置电压,工作时需将直流偏置电压施加在上下电极,产生的静电力将薄膜垂直拉向下电极方向,但由于薄膜自身存在反向的回复力,薄膜很快停止运动,达到平衡状态。若此刻再次施加所需频率的交流激励电压,会使振动薄膜发生挠曲,辐射相应频率的超声波。若在平衡状态下,外界变化的声压作用在薄膜上,会使薄膜产生挠曲,进而改变空腔内电容量,产生微弱的电流信号,后经跨阻放大等处理,电路实现电压信号接收。综合大气压和水压下最大位移、塌陷电压、机电转化系数要求以及 Si-SOI 键合

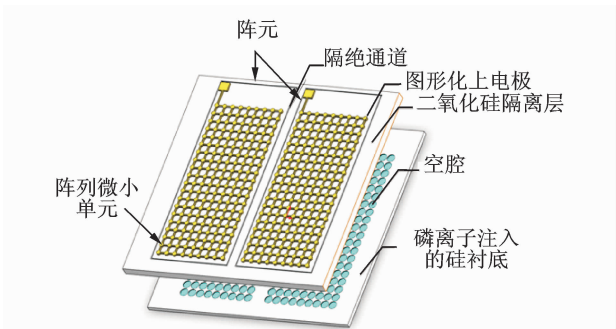


图 1 CMUT 阵列结构示意图

Fig.1 Structure sketch map of CMUT array

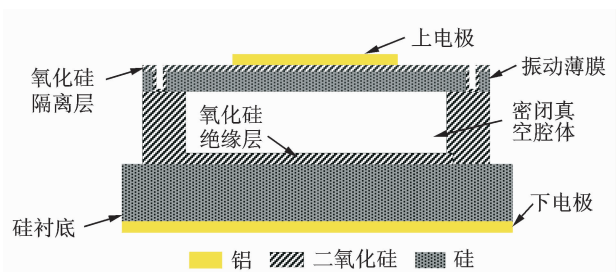


图 2 CMUT 敏感单元结构示意图

Fig.2 Structure sketch map of sensing unit for CMUT

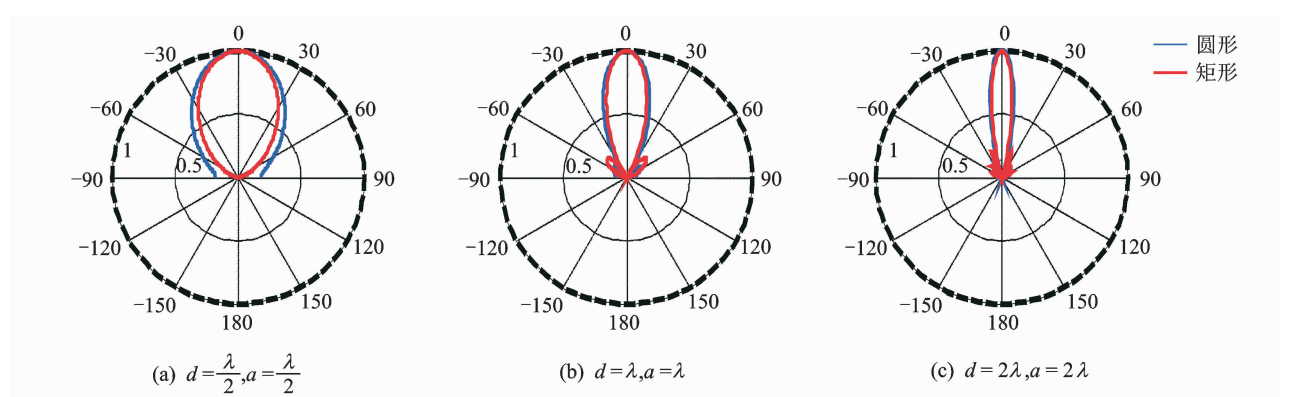


图 3 CMUT 阵元指向性

Fig.3 Directivity map of CMUT element

表 1 敏感单元主要结构参数

Tab.1 Main structural parameters of sensitive unit μm

| 结构参数 | 上电极半径 | 上电极厚度 | 隔离层厚度 | 薄膜半径 | 薄膜厚度 | 空腔高度 | 绝缘层厚度 |
|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| 数值 | 45 | 0.2 | 0.15 | 90 | 3 | 0.8 | 0.15 |

工艺条件,利用课题组 Ansys 有限元分析方法的研究^[9-10]确定了表 1 所示的敏感单元结构参数。

2 CMUT 一维线性复合阵列指向性

指向性是单个 CMUT 阵元或阵列发射/接收响应的幅度随主波束角扫描变化的特性^[11],是阵列设计的重要指标之一。

2.1 CMUT 阵元指向性

分别假设 CMUT 阵元为一圆形平板(半径为 r ,直径为 d)和一矩形平板(宽为 a ,长为 b), $J_1(x)$ 表示第 1 类一阶贝塞尔函数, θ 为偏轴角,归一化指向性表达式^[12]分别为

$$D_{e_circular}(\theta) = \left| \frac{2J_1(kr \sin(\theta))}{kr \sin(\theta)} \right| = \left| \frac{2J_1\left(\frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda}\right)}{\frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda}} \right|$$

（1）

$$D_{e_rectangular}(\theta) = \left| \frac{\sin(ka \sin(\theta)/2)}{ka \sin(\theta)/2} \right| = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi a \sin(\theta)}{\lambda}\right)}{\frac{\pi a \sin(\theta)}{\lambda}} \right|$$

（2）

图 3 为不同尺寸下,面积相当的两种阵元形状声辐射指向性分布。可以看到,不论阵列单元尺寸如何变化,面积相当的单个阵列矩形阵元指向性优于圆形阵元结构。

假设CMUT阵元是由笔者提出的 n 个均匀排

列单元组成的二维矩形平面,由于 $kd_{\text{cell}} = 2\pi d_{\text{cell}}/\lambda < 1$,敏感单元可以视作点声源^[12]来计算 CMUT 阵元的指向性,如图 4 所示, d_x, d_y 分别为沿 x 轴和 y 轴方向的敏感单元中心间距。根据 Bridge 乘积定理^[13],得到 CMUT 单阵元在 xOz 平面归一化指向性函数为

$$\mathbf{D}(\alpha, \theta, \alpha_s, \theta_s) = \mathbf{D}_1(\alpha, \theta, \alpha_s, \theta_s) \times \mathbf{D}_2(\alpha, \theta, \alpha_s, \theta_s) \quad (3)$$
$$\mathbf{D}(\alpha, \theta, \alpha_s, \theta_s) = \left| \frac{\sin[\frac{kMd_x}{2}(\cos\alpha\sin\theta - \cos\alpha_s\sin\theta_s)]}{M\sin[\frac{kd_x}{2}(\cos\alpha\sin\theta - \cos\alpha_s\sin\theta_s)]} \right| \times \left| \frac{\sin[\frac{kNd_y}{2}(\sin\alpha\sin\theta - \sin\alpha_s\sin\theta_s)]}{N\sin[\frac{kd_y}{2}(\sin\alpha\sin\theta - \sin\alpha_s\sin\theta_s)]} \right| \quad (4)$$

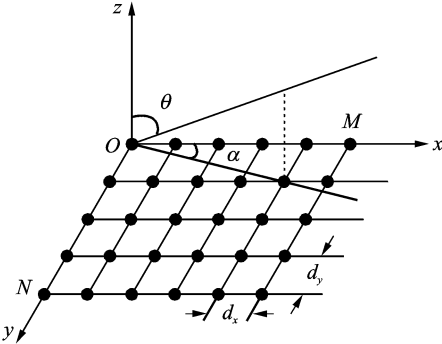


图 4 CMUT 单阵元指向性模型

Fig. 4 Directivity model of a single CMUT element

2.2 CMUT 线阵指向性

CMUT 一维线性复合阵指向性模型如图 5 所示, M' 个等大小矩形阵元等间距(间距为 d)沿 x 轴依次排列。由于 $ka = 2\pi a/\lambda > 1$, a 为阵元宽度。无法将阵列单元近似看作成点声源^[12],由于 CMUT 阵元自身具有指向性,且存在一定的阵元间

距,因此,整个 CMUT 阵列的指向性既与单个 CMUT 阵元有关,又与阵元数的多少及组成的阵形有关,是 CMUT 阵元指向性与阵形指向性的复合系统。同理依据 Bridge 乘积定理^[13],此时该复合阵的归一化指向性函数可表示为图 5 (a)所示的基于点声源的均匀点线阵指向性 $\mathbf{D}_{s1}(\alpha, \theta, \alpha_s, \theta_s)$ 和图 5 (b)所示的矩形点面阵阵元指向性 $\mathbf{D}(\alpha, \theta, \alpha_s, \theta_s)$ 的乘积,即

$$\mathbf{D}_{1\text{Da_rectangular}}(\alpha, \theta, \alpha_s, \theta_s) = \mathbf{D}_{s1}(\alpha, \theta, \alpha_s, \theta_s) \times \mathbf{D}(\alpha, \theta, \alpha_s, \theta_s) \quad (5)$$

$$\mathbf{D}_{s1}(\alpha, \theta, \alpha_s, \theta_s) = \left| \frac{\sin[\frac{kM'd}{2}(\cos\alpha\sin\theta - \cos\alpha_s\sin\theta_s)]}{M'\sin[\frac{kd}{2}(\cos\alpha\sin\theta - \cos\alpha_s\sin\theta_s)]} \right| \quad (6)$$

若取 xOz 定向面,该 CMUT 一维线性复合阵列归一化指向性参量表达式为

$$\mathbf{D}_{1\text{Da_rectangular}}(0, \theta, 0, \theta_s) = \left| \frac{\sin[\frac{kM'd}{2}(\sin\theta - \sin\theta_s)]}{M'\sin[\frac{kd}{2}(\sin\theta - \sin\theta_s)]} \right| \times \left| \frac{\sin[\frac{kMd_x}{2}(\sin\theta - \sin\theta_s)]}{M\sin[\frac{kd_x}{2}(\sin\theta - \sin\theta_s)]} \right| \quad (7)$$

3 CMUT 线阵列结构设计

3.1 阵元数目与间距

选取合适的 CMUT 阵元数目需要尽可能兼顾 CMUT 阵列指向性性能、微加工工艺复杂度和系统控制可行性等要求。声阵列的优化原则是抑制旁瓣、消除栅瓣、保证主瓣宽度最窄。

1) CMUT 一维线阵主瓣的宽度是辐射指向角

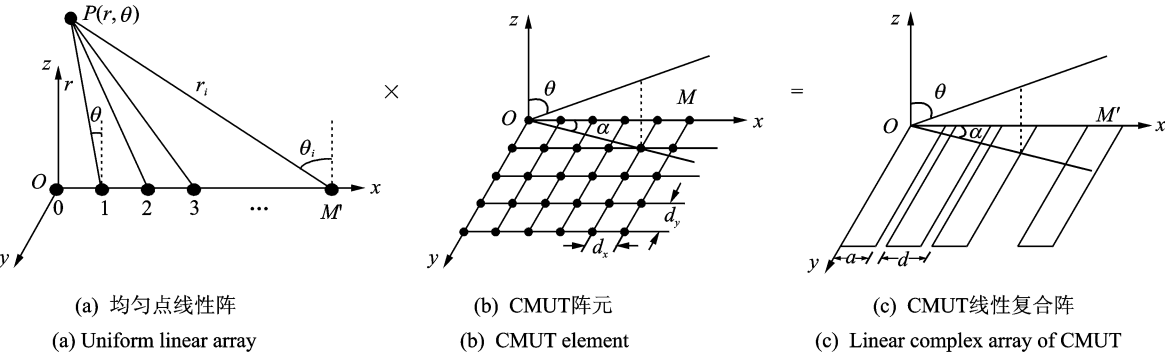


图 5 CMUT 线性复合阵指向性模型

Fig. 5 Directivity model of CMUT linear complex array

所在波束的左右两个零交点之间的距离。令 CMUT 一维线性复合阵指向性函数等于 0,即可求出所有零交点的位置

$$D_{1\text{Da_rectangular}}(0,\theta,0,\theta_s)=0 \tag{8}$$

$$\theta=\arcsin(\sin\theta_s-\frac{n\lambda}{M'd}) \tag{9}$$

其中: $n\neq 0$ 且不为 M' 的整数倍的整数。

$n=\pm 1$ 时的角度代表主瓣波束两边的零交点位置,则标准化主瓣宽度(Q_{MBW})定义为

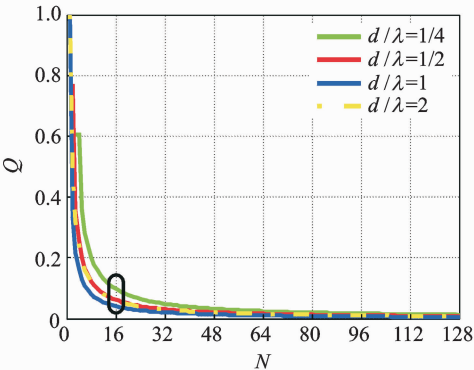
$$Q_{\text{MBW}}=\frac{1}{\pi}[\arcsin(\sin\theta_s+\frac{\lambda}{M'd})-\arcsin(\sin\theta_s-\frac{\lambda}{M'd})] \tag{10}$$

$(0\leq Q_{\text{MBW}}\leq 1)$

2) 栅瓣幅值与主瓣幅值具有相同高度,均为 1,即 CMUT 一维线性复合阵指向性函数等于 1,便得到主瓣与栅瓣的位置,为了消除栅瓣,需将主瓣两边第 1 个栅瓣移出 $[-90^{\circ},90^{\circ}]$ 范围,即可得到消除栅瓣的条件即为

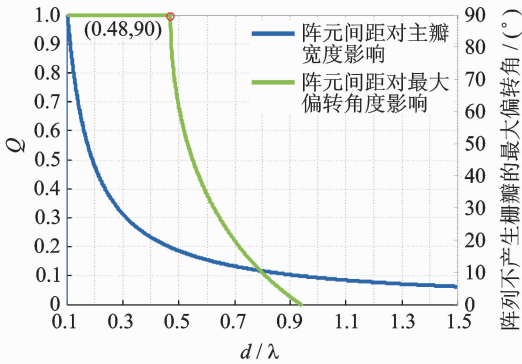
$$d\leq d_{\text{max}}=\left|\frac{(M'-1)\lambda}{M'(1+\sin\theta_s)}\right| \tag{11}$$

图 6(a)为 CMUT 阵元数目对其均匀线阵主瓣



(a) 阵元数目

(a) Array element number



(b) 阵元间距

(b) Array element spacing

图 6 阵列参数与指向性指标之间的关系

Fig. 6 Impact of array parameter on directivity indicators

宽度 Q_{MBW} 参量的影响。可以发现,阵列数目 $N=16$ 是个转折点,当数目增加超过 16 时,所引起的成本提高和换能器纯增加与所受益的指向性轻微改善不成比例,因此在 CMUT 线阵设计初期时,选取阵元数目 $N=16$ 。图 6(b)为 CMUT16 单元均匀线阵阵元间距与阵列指向性指标之间的关系图。蓝线为阵列中心距与标准主瓣宽度 Q_{MBW} 之间的关系,绿线是根据消除栅瓣最大阵元间距原则,给出的偏转方向角与消除栅瓣最大阵元间距之间的变化情况。蓝线表明中心间距的增大会使主瓣宽度减小,且 $d/\lambda=0.5$ 同样是个转折点,当 $d/\lambda>0.5$,间距增加,主瓣宽度减小的程度逐渐缩小。绿线表明随着偏转方向角在 $[0^{\circ},90^{\circ})$ 逐渐增大的同时,其最大消除栅阵阵元中心间距 Q_{MBW} 在 $[0.48,0.97]$ 之间反比例逐渐减小,可以看到当间距大于等于 1 时,栅瓣是必然出现的,已经与偏转方向角无关了。最终在设计中选取 $d=0.48\lambda$ 作为 16 阵元线阵的阵列单元间距。

3.2 阵元结构

阵元的横向宽度 a 应该小于阵元间距,即 $a<d\leq d_{\text{max}}$ 。如果 CMUT 在宽度上由 X 个半径为 r 的 CMUT 敏感单元并联组成,则满足 $2Xr<d=0.48\lambda$,计算得到在宽度上 CMUT 敏感单元的最大数目 M 为 9。由于探测性能对 CMUT 线阵纵向长度没有尺寸限制,敏感单元越多,阵元辐射声压越高,以及接收时电容变化及产生的电流越容易被电路检测,故阵元设计的纵向每列等间距排列了 50 个敏感单元,即 $9\times 50=450$ 个敏感单元并行排列构成阵元。笔者设计的 CMUT16 阵元线阵几何参数如表 2 所示。图 7 为设计的 CMUT 线阵的指向性仿真情况。仿真表明,所设计的 CMUT 线阵主瓣半功率角 -3 dB 为 5° ,波束宽度较窄;最大旁瓣级为 -13.5 dB ,扫描范围内无栅瓣干扰,存在旁瓣伪像,

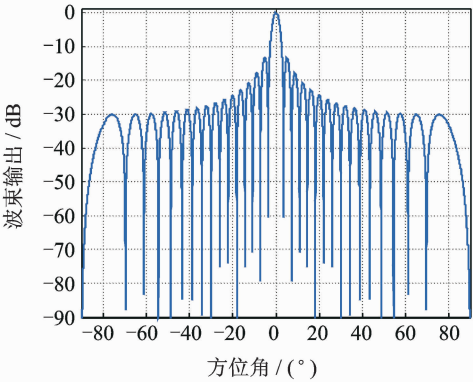


图 7 CMUT 线阵指向性仿真

Fig. 7 The directivity simulation of the CMUT linear array

但影响较低。经课题组^[9-10,14]在 CMUT 晶圆级低温硅-硅键合工艺和二氧化硅刻蚀速率等方面的研究,对 CMUT 1×16 线阵进行了阵列制作。加工后的 CMUT 线阵实物如图 8 所示。

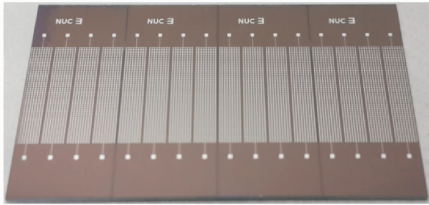


图 8 CMUT 线阵实物图

Fig. 8 The physical map of CMUT linear array

表 2 CMUT 一维线阵主要几何参数

Tab. 2 Main geometric parameters of CMUT linear array

| 参 数 | 工作频 率/kHz | 阵元 数目 | 阵元 形状 | 阵元间 距/ μm | 阵元宽 度/ μm | 阵列长 度/ μm | 阵列宽 度/ μm |
|--------|--------------|----------|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 数值 | 400 | 16 | 矩形 | 1 800 | 1 700 | 9 020 | 30 600 |

4 CMUT 封装

由于 CMUT 阵列需要应用到水下探测,所以水密透声封装是必不可少的。超声波由 CMUT 发出后需分别经过透声液和透声薄膜才能传播至水中。透声薄膜用于隔离介质水和 CMUT 核心部件,透声薄膜的选取必须使超声波尽可能小的损耗传至水中。透声液是填充在透声薄膜和 CMUT 核心部件之间的液体介质。CMUT 无论是工作在发射或是接收模式下,声波都会经过水介质、透声液和透声薄膜。为了减小超声波在异界面处的反射,当且仅当水介质、透声液和透声薄膜 3 种材料声阻抗相互接近时,超声波才能低损耗地从封装材料中透射至水介质。根据文献^[15-16],选取聚氨酯橡胶(声阻抗为 $1.626\times10^6\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,密度为 $1\,070\text{ kg}/\text{m}^3$,声速为 $1\,520\text{ m/s}$)作为透声薄膜材料隔离水和核心部件 CMUT 阵列,硅油(声阻抗为 $1.26\times10^6\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,密度为 $970\text{ kg}/\text{m}^3$,声速为 $1\,300\text{ m/s}$)作为封装液“衔接”核心部件 CMUT 阵列和透声薄膜聚。CMUT 阵列水密封装示意图如图 9 所示。铜箔可以屏蔽静电^[15-16]、电磁波及各种干扰信号屏蔽。环氧树脂^[15-16]用作背衬材料,具有高阻抗、高衰减的特性,使换能器声能经芯片前表面辐射,保持高灵敏度。由于长期在水中工作,故选用耐腐蚀、易加工的 PVC 作为外壳^[15-16],同时还可以有效消除杂散声场干扰。

值得注意的是,图 9 中由于 CMUT 芯片上电极金属焊盘极其微小,直接与导线焊接既难操作又极

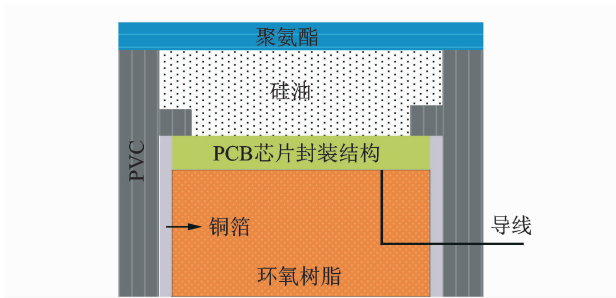


图 9 封装结构示意图

Fig. 9 Sketch map of packing structure

易破损断裂,且下电极在阵列芯片反面,因此引入一种 PCB 板芯片封装方式,如图 10 所示。CMUT 下电极通过导电胶与 PCB 矩形覆金区域粘贴,利用金丝键合将 16 个 CMUT 阵元上电极焊盘与 PCB 板相应位置的焊盘相连接,屏蔽导线一端引入封装外壳,并在 PCB 板引线孔处焊接,另一端连接控制电路,从而实现稳固芯片,对芯片起到保护作用,避免阵列破损。CMUT1×16 线阵的最终封装实物如图 11 所示。

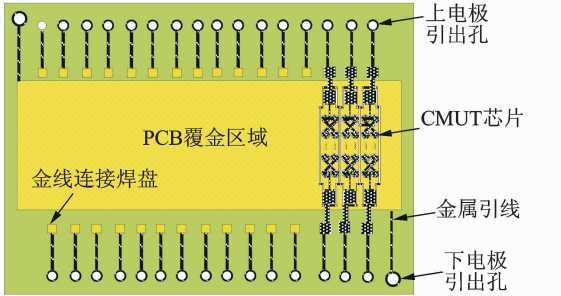


图 10 PCB 示意图

Fig. 10 Schematic diagram of PCB



图 11 最终封装

Fig. 11 Final packing

5 性能测试

5.1 CMUT 指向性分析

指向性测试实验图如图 12 所示。CMUT 作为发射端固定在精密分度转盘的下方,并随分度盘从

−90°到 90°进行旋转扫描。标准压电换能器作为接收信号端被固定在距离发射端正对面 1 m 处,并与 CMUT 保持中心平齐等高。CMUT 阵列由 20 V 偏置电压和 20 V_{pp} 的脉冲信号(400 kHz, 5-cycles)同时激励。每旋转 3°保存一组接收信号数据。CMUT 指向性测试结果如图 13 所示。经测试看出,CMUT 阵列指向性对称性好,−3 dB 主瓣半功率角(波束宽度)为 5°,最大旁瓣级为−13.5 dB,伴随较低的旁瓣干扰,且在扫描范围内无栅瓣出现。所设计的 CMUT 阵列指向性测试结果与仿真结果一致,达到了预期的效果。

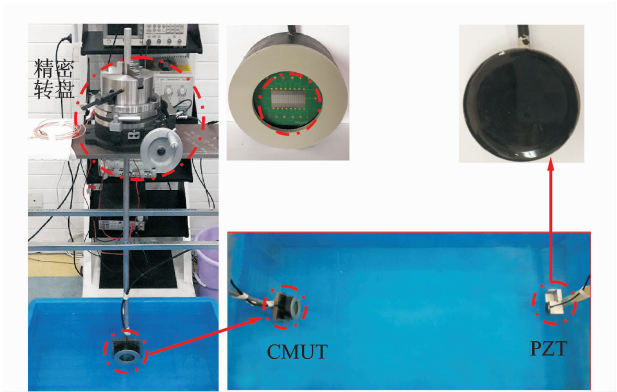


图 12 CMUT 指向性测试图

Fig. 12 The directivity test diagram of CMUT

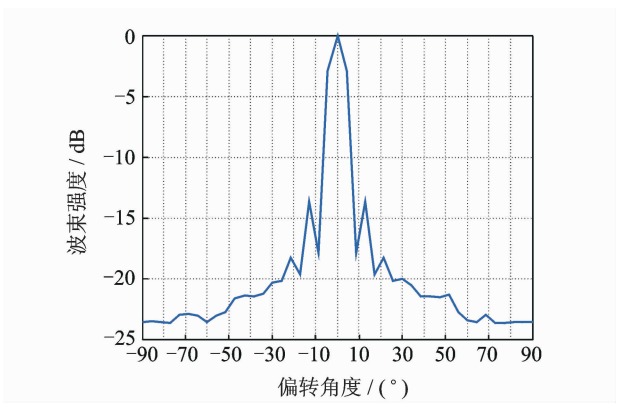


图 13 CMUT 指向性测试结果

Fig. 13 The directivity result map of CMUT

5.2 CMUT 水下扇扫探测

CMUT 阵列水下扇形扫描探测系统如图 14 所示。CMUT 阵列固定在精密分读盘上,放于水槽中。两个长宽均为 1cm 的正方体放置在 CMUT 阵列前方的扫描范围内。面朝两目标物体旋转精密分度盘,−30°至 30°,CMUT 阵列发射并接收回波信号。超声扇形扫描探测是由多束 A-scan 回波信号构成。两目标物体的回波 A-scan 信号如图 15 所示。经过滤波、包络提取和对数压缩后重建的 60°

扇形扫描图如图 16 所示。该次扫描探测给出了 CMUT 阵列 60°前视 110cm 探测范围内景象,且清晰地给出了两目标体的位置,重建图像连续性好,同时目标轮廓明显,达到了预计探测效果。

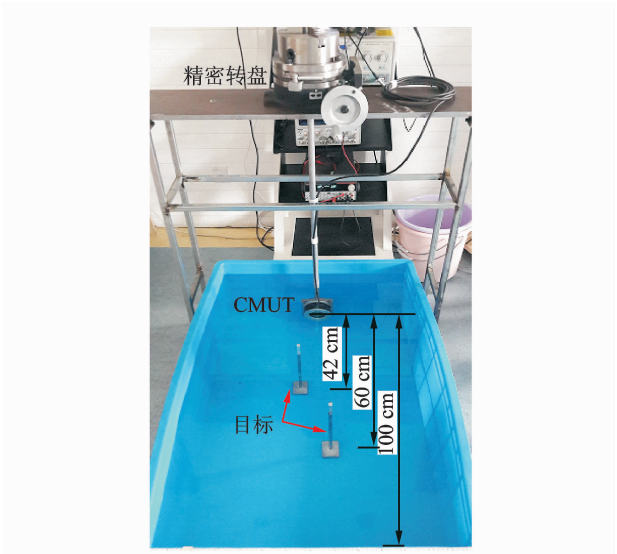


图 14 扇形扫描探测实验图

Fig. 14 Sector scanning detection experiment figure

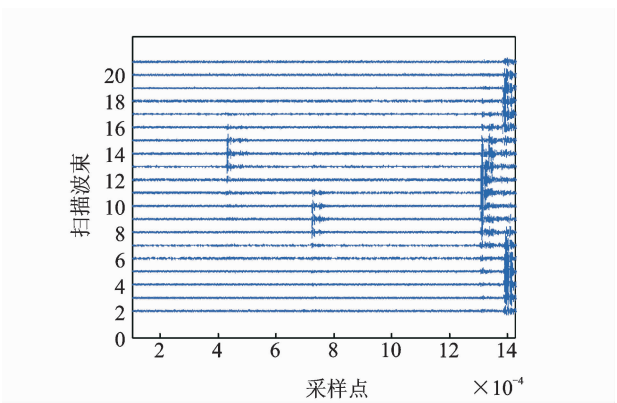


图 15 回波信号

Fig. 15 Echo Signal

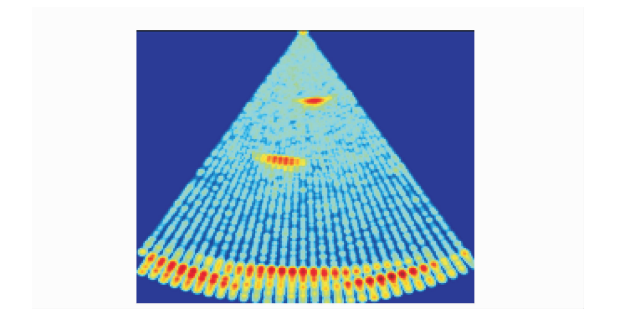


图 16 扇形扫描结果

Fig. 16 Sector scanning results

6 结束语

根据 CMUT 阵列复合结构的特点,结合声场

特性分析,提出了CMUT阵列的几何结构设计依据和方法,并搭建了水下测试系统,对阵列芯片水密封装后进行了CMUT阵列收发性能和水下探测性能的测试分析。经测试,CMUT阵列主瓣对称,−3 dB半功率角为 5° ,最大旁瓣级为−13.5 dB,扫描范围无栅瓣,1 m范围内扇形探测结果清晰,探测分辨率受旁瓣影响较低。结果表明,提出的CMUT阵列设计和水密封装方法合理,初步实现了水下探测应用,为改善微电容超声波换能器阵列水下探测性能提供了设计依据。笔者提出的线阵设计和封装方法对CMUT二维面阵同样有效。

参 考 文 献

- [1] Heaney K D, Campbell R L, Snellen M. Long range acoustic measurements of an undersea volcano[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 134(4):3299-3306.
- [2] 栾桂冬. 电容 MEMS 超声换能器研究进展[J]. *应用声学*, 2012, 31(4):241-248.
Luan Guidong. Progress in capacitive MEMS ultrasonic transducer[J]. *Applied Acoustics*, 2012, 31(4): 241-248. (in Chinese)
- [3] Cheng Xiaoyang, Chen Jingkuang, Li Chuan, et al. A miniature capacitive ultrasonic imager array[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(6): 569-577.
- [4] Liu Chiahung, Chen Peitai. Surface micromachined capacitive ultrasonic transducer for underwater imaging[J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2007, 30(3):447-458.
- [5] Doody C B, Cheng X, Rich C A, et al. Modeling and characterization of CMOS-Fabricated capacitive micromachined ultrasound transducers[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2011, 20(1): 104-118.
- [6] Miao Jing, Shen Wenjiang, He Changde, et al. Micro-electro-mechanical systems capacitive ultrasonic transducer with a higher electromechanical coupling coefficient[J]. *Micro & Nano Letters*, 2015, 10(10): 541-544.
- [7] 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, 37(10): 2218-2225.
Zhang Hui, Zhao Xiaonan, Zhang Wen, et al. Design and analysis of air-coupled capacitive micromachined ultrasonic transducers[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(10):2218-2225. (in Chinese)
- [8] Oralkan Ö, Ergun A S, Johnson J A, et al. Capacitive micromachined ultrasonic transducers; next-generation

arrays for acoustic imaging[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2002, 49:1596-1610.

- [9] Song Jinglong, Xue Chenyang, He Changde, et al. Capacitive micromachined ultrasonic transducers (CMUTs) for underwater imaging applications[J]. *Sensors*, 2015, 15: 23205-23217.
- [10] 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.
- [11] 王志凌,袁慎芳,邱雷,等. 基于压电超声相控阵方法的结构多损伤监测[J]. *振动、测试与诊断*, 2014, 34(5):796-801.
Wang Zhiling, Yuan Shenfang, Qiu Lei, et al. Structure multi-damage monitoring based on the piezoelectric ultrasonic phased array[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2014, 34(5):796-801. (in Chinese)
- [12] 杜功焕,朱哲民,龚秀芳. 声学基础[M]. 3版. 南京:南京大学出版社, 2012:222-223.
- [13] 栾桂冬,张金铎,王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京:北京大学出版社, 2005:1-476.
- [14] Li Yuping, He Changde, Zhang Juanting, et al. Design and analysis of capacitive micromachined ultrasonic transducer based on SU-8[J]. *Key Engineering Materials*, 2015, 645-646:577-582.
- [15] Shih R C, Chang Y F, Chang C H, et al. Ultrasonic synthetic aperture focusing using the root-mean-square velocity[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2014, 33(1):12-22.
- [16] 赵鹏,张国军,刘源,等. 纳机电矢量水听器耐压结构设计[J]. *传感技术学报*, 2014, 27(5):610-615.
Zhao Pen, Zhang Guojun, Liu Yuan, et al. The design of pressure-resisting structure for NEMS vector hydrophone[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2014, 27(5):610-615. (in Chinese)



第一作者简介:张睿,男,1987年2月生,博士、讲师。主要研究方向为超声 MEMS 及智能信息处理。曾发表《Design of capacitive micromachined ultrasonic transducer (CMUT) linear array for underwater imaging》(《Sensor Review》2015, Vol. 36, No. 1)等论文。
E-mail: fly_zr@126.com

通信作者简介:张永梅,女,1967年1月生,博士、教授。主要研究方向为智能信息处理。
E-mail: zhangym@ncut.edu.cn

