

Design and Simulation Analysis of Novel Capacitive Micromechanical Ultrasonic Transducers*

SONG Jinlong*, ZHENG Xinyi, FENG Rui, ZHOU Ming, SHANG Xinglian

(East China Institute of Photo-Electronic IC, Suzhou Jiangsu 621000, China)

Abstract: Considering that the upper electrode of traditional CMUT is designed on the upper surface of the vibrating membrane, the thickness of the vibrating membrane will increase the effective distance between the upper and lower plates, which will affect the transmitting and receiving performances of CMUT. A novel structure of CMUT is proposed, in which the upper electrode is designed at the bottom of the vibrating membrane to reduce the effective distance between the upper and lower plates. First, the influence of the distance between the upper and lower plates on the transmitting performance is analyzed. Then the process flow of the novel structure CMUT is designed. Last, the CMUT of the novel structure is simulated and analyzed. Pull-in simulation results show that the displacement of the center point of the vibrating film is 36.52% of the cavity height when the vibrating film is attracted to the lower electrode, which is close to the theoretical value one third. The simulation results are consistent with the results of COMSOL Multiphysics case, which proves that the simulation model established in this paper holds high accuracy. Results of modal analysis and frequency domain analysis show that the first natural frequency is about 6.1 MHz. The results of time domain analysis show that the transmitting and receiving performances of the novel CMUT structure are improved by 11.9 times and 12.2 times respectively compared with the traditional structure.

Key words: capacitive micromechanical ultrasonic transducers; effective distance; transmitting performances; receiving performances; pull-in

EEACC: 7810C

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.05.013

新型电容式微机械超声波换能器 (CMUT) 设计及仿真分析*

宋金龙*, 郑欣怡, 凤 瑞, 周 铭, 商兴莲

(华东光电集成器件研究所, 江苏 苏州 621000)

摘 要: 针对传统 CMUT 的上电极加工在振动薄膜的上表面, 振动薄膜的厚度会增加上、下极板之间的有效距离, 影响 CMUT 的发射性能和接收性能的问题, 提出了一种将上电极加工在振动薄膜的底部以减小上、下极板之间有效距离的新型结构 CMUT。首先从理论上分析了上、下极板之间有效距离对发射和接收性能的影响。然后设计了新型结构 CMUT 的加工工艺流程。最后对新型结构 CMUT 进行了仿真分析。吸合仿真结果表明振动薄膜与下电极发生吸合时振动薄膜中心点位移为腔高的 36.52%, 与理论值三分之一接近。仿真结果与 Comsol Multiphysics 案例中的结果一致, 证明了建立的仿真模型具有很高的准确性。有预应力模态分析和有预应力频域分析得到一阶固有频率约为 6.1 MHz。时域分析结果表明, 新型结构 CMUT 发射和接收性能相对传统结构分别提高了 11.9 倍和 12.2 倍。

关键词: 电容式微机械超声波换能器; 有效距离; 发射性能; 接收性能; 吸合现象

中图分类号: TB552

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2021)05-1098-06

超声波具有广泛的应用前景, 如金属无损探伤和测厚, 超声测距、测流量, 水下定位与通讯, 地下资源

勘查, 超声检测、医学成像, 超声清洗, 指纹识别等^[1-4]。据报道, 仅在医疗、工业和消费类应用的超

项目来源: 国家核心电子器件重大专项(2018ZX01012101-006)

收稿日期: 2020-10-09 修改日期: 2021-01-26

声波传感市场总规模, 预计将在 2023 年增长至约 60 亿美元。超声波换能器是发射和接收超声波的核心元件。目前应用的体压电换能器的压电材料与空气的声阻抗匹配性较差^[5-7]、带宽小, 而且难以满足对换能器小型化、集成化、阵列化的需求。近年来, 基于 MEMS 技术的 MUT 换能器具有一致性高、成本低、易于加工面阵、可与 ASIC 电路集成等优点^[8], 成为未来超声波换能器的发展方向。根据工作原理的不同, MUT 可分为 PMUT 和 CMUT 两种^[9-11]。PMT 工作时将近一半的能量会被非压电层完全消耗, 另外, 压电层的厚度难以在整个晶圆上精确控制。因此, 众多的学者展开了对 CMUT 的研究。当前研究的 CMUT 敏感单元的上电极都在振动薄膜的顶部^[12-13], 振动薄膜的厚度增加了电容器上、下极板之间的有效间距, 直接影响到 CMUT 的静电力、初始电容和电容变化的大小, 最终影响了 CMUT 的发射和接收性能。Kerem Enhos 等人^[14]设计的 CMUT 发射灵敏度约 5.81 kPa/V。张慧等人^[15]设计的 CMUT 单个敏感单元的接收灵敏度约为 0.04 $\mu\text{A}/\text{Pa}$, 接收灵敏度约为 28 Pa/V。文献[16-18]理论分析结果表明, 减小空腔的厚度即减小两电极间的有效距离, 可以提高传感器的机电转换效率进而提高发射性能和接收性能。

为提高 CMUT 的发射和接收性能, 本文设计了上电极在振动薄膜底部的新型结构 CMUT。

1 CMUT 结构及工作原理

1.1 传统 CMUT 结构

CMUT 由若干个敏感单元组成, 传统结构敏感单元的剖视图如图 1 所示。每个敏感单元主要由上电极、振动薄膜、腔体、支撑、硅衬底和下电极组成。硅衬底的电阻率为 $0.001 \Omega \cdot \text{cm}$, 与金属欧姆接触后作为下电极, 上电极在振动薄膜的表面, 上电极可随振动薄膜变形, 下电极是刚体。假设 CMUT 敏感单元为一个理想电容器, 则上极板受到的静电力 F 为

$$F = \frac{1}{2}EQ = \frac{\varepsilon_0 S V^2}{2d^2} \quad (1)$$

式中: E 为电场强度, Q 为电容器的电荷量, ε_0 为真

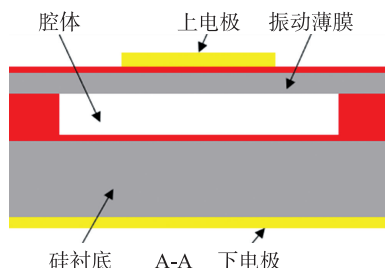


图 1 传统 CMUT 结构敏感单元剖视图

空介电常数, S 为两极之间的有效面积, d 为两极板之间的有效距离。

1.2 CMUT 工作原理

根据 CMUT 工作时激励信号的不同, 其工作模式可分为发射模式和接收模式, 原理如图 2 所示。CMUT 工作在发射模式时开关闭合, 振动薄膜在直流偏置电压和交流激励电压的作用下产生振动, 从而导致声场中介质振动, 实现电信号到声波信号的转换; CMUT 工作在接收模式时开关断开, 直流偏置电压使电容器充满电荷, 超声波信号作用在振动薄膜上使其振动, 导致在振动薄膜表面的电极也发生振动, 引起电容器电荷的变化从而产生电流, 实现声波信号到电信号的转换。

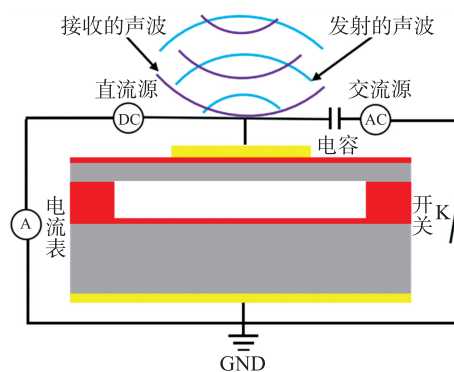


图 2 CMUT 工作原理示意图

假设振动薄膜的弹性系数为 k , 交流激励电压的频率为 f , 则上电极的平均振动速度 \bar{v} 为

$$\bar{v} = \frac{F}{k} f = \frac{\varepsilon_0 S V^2}{2kd^2} f \quad (2)$$

则发射功率 P 为

$$P = F\bar{v} = \left(\frac{\varepsilon_0 S V^2}{2d^2} \right)^2 \frac{f}{k} \quad (3)$$

工作在接收模式时产生的电流 I 为

$$I = \frac{dQ}{dt} = \varepsilon_0 S V \frac{\bar{v}}{(d-x)^2} = \frac{\varepsilon_0^2 S^2 V^3 f}{2kd^2 (d-x)^2} \quad (4)$$

式中: x 为振动薄膜的位移。

从式(2)~式(4)可以看出, CMUT 发射功率和接收电流随着上、下极板之间有效距离 d 的减小而增加, 且与 d 的四次方有关。因此, 减小 CMUT 两极板之间的有效距离可以极大地提高 CMUT 的发射和接收性能。

1.3 新型 CMUT 结构

为了提高 CMUT 的发射和接收性能, 本文设计了一种新型结构的 CMUT, 如图 3 所示, 上极板在振动薄膜的底部, 可以减小上、下极板之间的有效距离。

假设 CMUT 振动薄膜的厚度 (m_t) 为 $2 \mu\text{m}$, 振

动薄膜上两层氧化层的厚度(o_t)均为 300 nm,腔体的高度(h_g)为 198.5 nm,硅和二氧化硅的相对介电常数分别为 11.5 和 3.78。则传统和新型结构 CMUT 上、下两极板之间的有效距离分别为

$$d_{tr} = \frac{2o_t}{3.78} + \frac{m_t}{11.5} + h_g = 531 \text{ nm} \quad (5)$$

$$d_{no} = \frac{o_t}{3.78} + h_g = 278 \text{ nm} \quad (6)$$

从式(5)和式(6)可以看出,新型结构 CMUT 比传统结构 CMUT 上、下两极板之间的有效距离减小了 47.64%(253 nm)。因此,本文提出的新型结构 CMUT 可以有效地提高发射和接收性能。

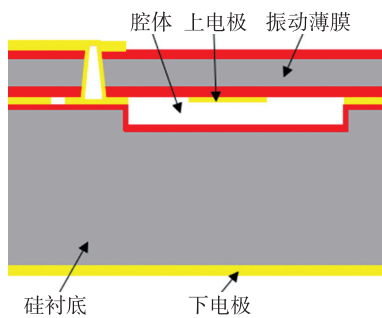


图 3 新型 CMUT 结构敏感单元剖视图

2 工艺流程

新型结构 CMUT 的加工需要 SOI 片和低阻硅片各一片。本文仅以 CMUT 一个敏感单元为例简要说明其加工过程。

(1)SOI 片氧化。在 SOI 片器件层表面氧化生长一层二氧化硅作为上电极与器件层之间的绝缘层,如图 4(a)。

(2)湿法腐蚀。先用 HF 酸腐蚀器件层表面的氧化层,然后用 KOH(或 TMAH)溶液腐蚀器件层,再用 HF 腐蚀 SOI 片的氧化层,最后用 KOH(或 TMAH)腐蚀 SOI 片的衬底层,如图 4(b)。

(3)淀积金属并图形化。在 SOI 片器件层表面淀积一层金属金并图形化,如图 4(c)。在淀积金属金之前要先在器件层表面淀积一层 Cr 或 Ti 作为粘附层,金图形化可以用剥离工艺。

(4)硅片刻蚀腔体。在硅片上刻蚀腔体使电容的上极板与下极板之间形成间隙,如图 4(d)。

(5)氧化。对硅片进行氧化工艺,在腔体表面生长一层氧化层,防止 CMUT 塌陷时上电极与下电极直接接触发生短路,如图 4(e)。

(6)淀积金属并图形化。在硅片有腔体的一面淀积金属金并图形化,如图 4(f)。两侧的金起键合作用,中间的金将上电极引到 CMUT 的表面。

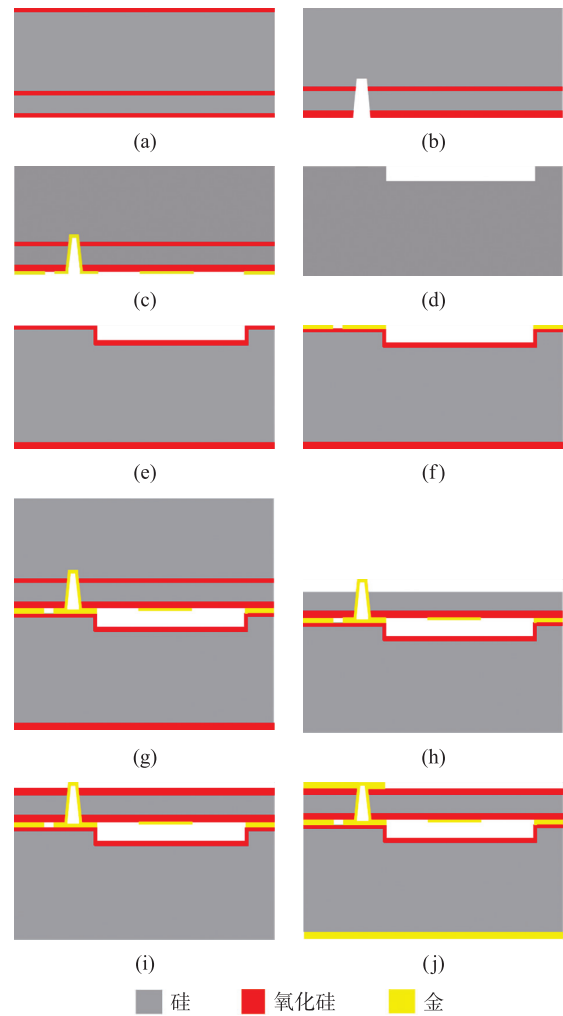


图 4 新型结构 CMUT 加工工艺流程

(7)SOI 片与硅片键合。先将 SOI 片器件层与硅片有腔体一侧进行对准,再进行金-金热压键合,如图 4(g)。

(8)去除 SOI 片衬底层和氧化层。先用 CMP 对 SOI 片的衬底层进行减薄,然后用 KOH(或 TMAH)溶液将衬底层去除干净,最后用 HF 将 SOI 片的氧化层去除,在这个过程中硅片表面的氧化层也被去除,如图 4(h)。在该工艺过程中 KOH(或 TMAH)溶液和 HF 不会腐蚀金。

(9)生长氧化层并图形化。先用 PECVD 在 CMUT 振动薄膜表面生长一层二氧化硅,将金属与振动薄膜绝缘隔离,再用 HF 腐蚀焊盘处的二氧化硅将金露出来,如图 4(i)。

(10)淀积金属并图形化。先在振动薄膜表面和重掺硅片表面分别淀积一层金,再将振动薄膜表面的金图形化得到焊盘,最后进行退火使金与重掺硅形成良好的欧姆接触,如图 4(j)。

(11)划片。根据需要将晶圆划成 CMUT 阵列或阵元。

3 仿真分析

为了验证提出的新型结构 CMUT 可以提高发射和接收性能, 对所设计的 CMUT 进行了仿真分析。用 Comsol Multiphysics 案例库中电容式谐振器的结构尺寸及材料属性对 CMUT 敏感单元进行仿真分析, CMUT 敏感单元结构尺寸及材料属性如表 1 所示。

表 1 CMUT 敏感单元结构尺寸及材料属性

参数	大小	
振动薄膜	长度/ μm	45
	厚度/ μm	2
上电极	长度/ μm	20
	高度/ μm	20
腔体	长度/ μm	45
	高度/ nm	198.5
硅	密度/ (kg/m^3)	2 320
	杨氏模量/ Pa	160×10^9
	泊松比	0.22
水	密度/ (kg/m^3)	1 000
	声速/ (m/s)	1 500

建立的二维仿真模型示意图如图 5 所示。由于振动薄膜上二氧化硅层的厚度远小于硅的厚度, 为了提高仿真时的计算效率, 在建模时没有考虑二氧化硅层的厚度。本文建立的模型与案例库中的模型相比增加了支撑将腔体与水域隔离开。

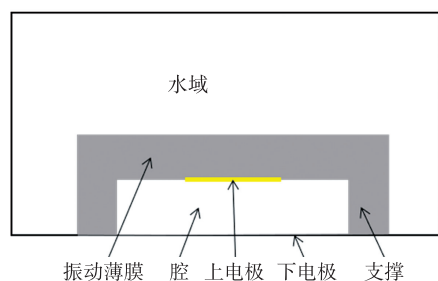


图 5 仿真模型结构示意图

3.1 吸合分析

CMUT 工作在发射模式和接收模式下都需要直流偏置电压的作用。随着直流偏置电压的增加, 振动薄膜中心与下电极的距离不断减小, 减小到一定值时振动薄膜会突然吸合到下电极上。CMUT 吸合仿真分析结果如图 6 所示, 从图中可以看出当振动薄膜中心的坐标为 126 nm, 即位移量为 72.5 nm 时

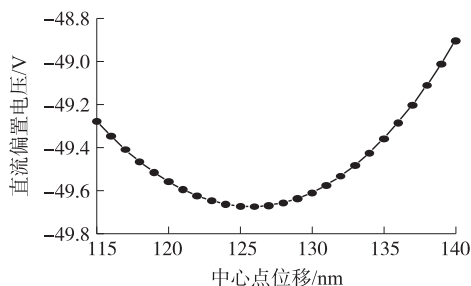


图 6 吸合分析结果

发生吸合现象。振动薄膜吸合时中心点的位移为腔高的 36.52%, 接近理论值的三分之一。

3.2 有预应力模态分析

直流偏置电压 35 V 时, 新型结构 CMUT 敏感单元模态仿真分析结果如图 7 所示, 从图中可以看出, 一阶固有频率为 6.09 MHz, 振动薄膜沿其法线方向振动, 中心位置处的位移最大, 边缘位置处的位移最小。

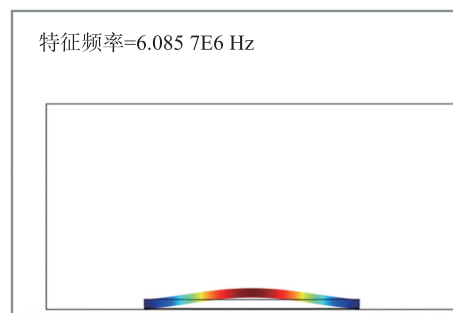


图 7 模态仿真结果

3.3 有预应力频域分析

直流偏置电压 35 V, 谐波扰动电压 0.1 V 时, 新型结构 CMUT 的有预应力频域分析结果如图 8 所示。从图中可以看出, 一阶谐振频率为 6.05 MHz, 考虑到仿真误差的影响, 有预应力频域仿真与有预应力模态仿真得到的一阶固有频率相同。

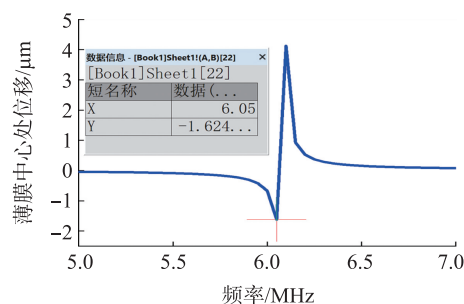


图 8 有预应力频域仿真结果

Comsol Multiphysics 案例库中发生吸合现象时中心点处的位移为 74 nm, 有预应力模态分析和有预应力频域分析得到的一阶固有频率为 8.08 MHz。产生误差的主要原因是振动薄膜约束的边界条件不同, 案例库中将振动薄膜的周边位移约束为零, 而本文中振动薄膜固定在支撑上, 支撑的位移约束为零, 本文中的模型更接近于 CMUT 的实际工作情况。将案例库中约束改为本文的约束方法之后, 当振动薄膜中心的坐标为 127 nm, 即位移量为 71.5 nm 时振动薄膜会吸合到下电极上, 预应力模态分析和预应力频域分析得到一阶固有频率为 6.1 MHz, 与本文的仿真结果一致。因此, 本文所建立的仿真模型是有效且准确的。

3.4 瞬态分析

当直流偏置电压为 35 V, 交流激励电压为 1 V、频率为 6 MHz 时, CMUT 敏感单元工作在发射模式时的仿真结果如图 9 所示。实线表示新型结构振动薄膜顶部中心处的声压, 虚线表示相同条件下传统结构振动薄膜顶部中心处的声压。从图中可以看出新型结构 CMUT 敏感单元的发射能力 8.00 kPa/V, 为传统结构的 11.9 倍。

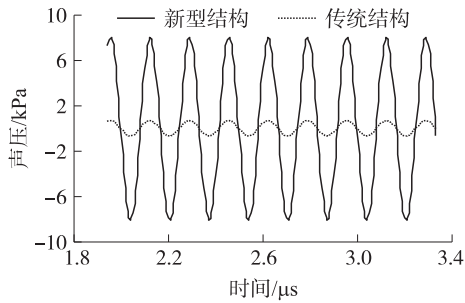


图 9 CMUT 敏感单元发射性能仿真结果

直流偏置电压为 35 V, 超声波信号的幅值为 10 Pa、频率为 6 MHz 时, CMUT 敏感单元工作在接收模式时的仿真结果如图 10 所示。虚线表示新型结构 CMUT 敏感单元产生的电流, 实线表示传统结构 CMUT 敏感单元产生的电流, 从图中可以看出新型结构单个 CMUT 敏感单元的接收灵敏度约 0.3 $\mu\text{A}/\text{Pa}$, 约为传统结构的 12.2 倍。

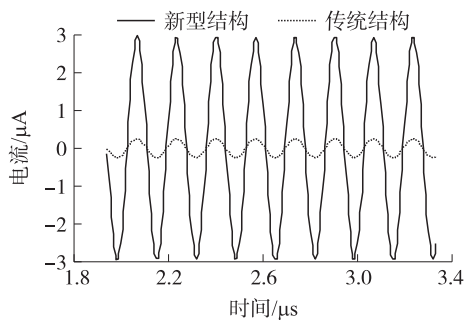


图 10 接收性能仿真分析结果

从 CMUT 单个敏感单元的时域仿真结果可以看出, 本文设计的新型结构 CMUT 的发射能力和接收能力明显优于传统结构 CMUT 的发射和接收性能。

4 结束语

理论分析表明减小 CMUT 上、下极板之间的有效距离可以增强其发射和接收性能, 基于该结论通过将 CMUT 敏感单元的上电极设计在振动薄膜的底部提出了一种新型结构 CMUT。设计了新型结构 CMUT 的加工工艺流程, 利用金-金热压键合的方法在实现了 SOI 片器件层转移到硅片上的同时, 将振

动薄膜底部的信号引到顶部。对新型结构的 CMUT 进行了吸合分析、有预应力模态分析和有预应力频域分析, 仿真结果与 Comsol Multiphysics 案例库的结果一致, 证明了所建模型的准确性, 发射模式和接收模式时域仿真结果表明, 本文提出的新型结构 CMUT 相对于传统结构 CMUT 可以明显地提高其发射和接收性能。

参考文献:

- [1] Adelegan O J, Coutant Z A, Zhang X, et al. Fabrication of 2D Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer (CMUT) Arrays on Insulating Substrates with Through-Wafer Interconnects Using Sacrificial Release Process[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2020, 4(29): 553-561.
- [2] 吕云飞. 电容式微机械超声换能器建模与仿真技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [3] Hery M, Sénégond N, Certon D. A Boundary Element Model for CMUT-Arrays Loaded by a Viscoelastic Medium[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 4(67): 779-788.
- [4] Gurun G, Tekes C, Zahorian J, et al. Single-Chip CMUT-on-CMOS front-End System for Real-Time Volumetric IVUS and ICE Imaging [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2014, 61(2): 239-250.
- [5] Savoia A S, Caliano G, Pappalardo M. A CMUT Probe for Medical Ultrasonography: From Microfabrication to System Integration [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2012, 59(6): 1127-1138.
- [6] Song J L, Xue C Y, He C D, et al. Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers (CMUTs) for Underwater Imaging Applications [J]. Sensors, 2015, 15(9): 23205-23217.
- [7] Zhang W, Zhang H, Du F, et al. Pull-In Analysis of the Flat Circular CMUT Cell Featuring Sealed Cavity [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015: 1-9.
- [8] Salim M S, Malek M F A, Heng R B W, et al. Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers: Technology and Application [J]. Journal of Medical Ultrasound, 2012, 1(20): 8-31.
- [9] 栾桂冬. 压电 MEMS 超声换能器研究进展 [J]. 应用声学, 2012, 3: 3-12.
- [10] 石建超. 电容式微超声换能器等效电路模型与优化设计 [D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [11] 王红亮. CMUT 及其阵列工作机理与应用基础研究 [D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [12] Gross D, Coutier C, Legros M, et al. A CMUT Probe for Ultrasound-Guided Focused Ultrasound Targeted Therapy [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2015, 6(62): 1145-1160.
- [13] Heller J, Boulmé A, Alquier D, et al. Modeling and Characterization of cMUT-Based Devices Applied to Galvanic Isolation [J]. Physics Procedia, 2015, 70: 987-991.
- [14] Enhos K, Tasdelen A S, Yilmaz M, et al. Transmitting CMUT Arrays without a DC Bias [C] // 2019 IEEE International Ultrasonics Sym-

- posium(IUS). Glasgow UK;IEEE,2019:750-753.
- [15] 张慧,李志,郑冠儒,等. 空气耦合电容式微超声换能器设计[J]. 声学学报,2019(44)1:116-124.
- [16] 张雪晴. 电容式微加工超声传感器有限元仿真及薄膜静动态性能分析[D]. 广州:华南理工大学,2020.
- [17] 孙舸. 基于 SOI 的空气耦合电容式微机械超声换能器阵列的研究[D]. 吉林:吉林大学,2019.
- [18] Maity R, Maity N P, Rao K S, et al. Fringing Capacitive Effect of Silicon Carbide Based Nano-Electro-Mechanical-System Micromachined Ultrasonic Transducers: Analytical Modeling and FEM Simulation[J]. Transactions on Electrical and Electronic Materials, 2019,20:473-480.



宋金龙(1990—),男,山东临沂人,工程师,就职于华东光电集成器件研究所,研究方向为 MEMS 声学传感器, b1506015@st.nuc.edu.cn。