

引用格式: 李霞, 陈益良, 苏敏. 用于血管内超声成像的高频换能器研制[J]. 声学技术, 2024, 43(1): 142-146. [LI Xia, CHEN Yiliang, SU Min. Development of a high frequency transducer for intravascular ultrasound imaging[J]. Technical Acoustics, 2024, 43(1): 142-146.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2024.01.019

# 用于血管内超声成像的高频换能器研制

李霞<sup>1</sup>, 陈益良<sup>1,2</sup>, 苏敏<sup>2</sup>

(1. 桂林理工大学化学与生物工程学院, 广西桂林 541006;

2. 中国科学院深圳先进技术研究院保罗 C. 劳特伯生物医学成像研究中心, 广东深圳 518005)

**摘要:** 血管内超声(Intravascular Ultrasound, IVUS)成像技术可以精确评估血管腔口径、血管壁形态和其他相关血流和血管特性, 在冠状动脉疾病的诊断、治疗指导和治疗后的评估中发挥着重要作用。文章设计并制备了一种用于血管内超声成像的高频超声换能器, 并对换能器的电学和声学性能进行测试和表征。结果表明, 所制备 IVUS 换能器的中心频率为 38.9 MHz, -6 dB 相对带宽为 56.6%, 在谐振频率 42.3 MHz 处的电阻抗为 22.6  $\Omega$ , 在反谐振频率 48.2 MHz 处的电阻抗为 56.5  $\Omega$ , 有效机电耦合系数为 0.48。使用该换能器进行线仿体成像实验的结果显示, 换能器的纵向分辨率为 54  $\mu\text{m}$ , 横向分辨率为 209  $\mu\text{m}$ 。最后, 将文中制备的超声换能器与国外同类型换能器进行比较, 结果表明, 该换能器的性能良好, 能够满足血管内超声临床检测需求, 未来有望能够突破技术瓶颈, 实现国产替代。

**关键词:** 心血管疾病; 血管内超声成像; 高频超声换能器

中图分类号: TB552

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2024)-01-0142-05

## Development of a high frequency transducer for intravascular ultrasound imaging

LI Xia<sup>1</sup>, CHEN Yiliang<sup>1,2</sup>, SU Min<sup>2</sup>

(1. School of Chemical and Biological Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, Guangxi, China;

2. Paul C. Lauterbur Research Center for Biomedical Imaging, Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

**Abstract:** Intravascular ultrasound (IVUS) imaging technology can accurately evaluate vascular lumen diameter, vascular wall morphology, related blood flow and vascular characteristics. It also plays an important role in the diagnosis, treatment guidance and post-treatment evaluation of coronary artery disease. In this paper, a high-frequency ultrasonic transducer for IVUS imaging is designed and fabricated, and the electrical and acoustic performances of the transducer are tested and characterized. The results show that the center frequency of the IVUS transducer is 38.9 MHz, and the -6 dB bandwidth is 56.6%, the resonant frequency is 42.3 MHz at which the electrical impedance is 22.6  $\Omega$ ; the anti-resonant frequency is 48.2 MHz, at which the electrical impedance is 56.5  $\Omega$ ; and the effective electromechanical coupling coefficient is 0.48. The results of wire phantom imaging experiments display that the axial and lateral resolutions of the transducer are 54  $\mu\text{m}$  and 209  $\mu\text{m}$ , respectively. Finally, compared with foreign IVUS transducers, the comprehensive results show that the proposed transducer has good performance to meet the needs of clinical diagnose. In the future, the proposed transducer is likely to break through the "bottleneck" technology and achieve domestic replacement.

**Key words:** cardiovascular disease; intravascular ultrasound; high-frequency ultrasonic transducer

## 0 引言

随着生活水平的提高, 人口老龄化的加剧, 心血管疾病的患病率逐年上升, 已成为致死率最高的

疾病之一<sup>[1]</sup>。动脉粥样硬化是常见的心血管疾病, 其特征是动脉壁中富含脂质的斑块逐渐积聚, 导致动脉管壁变厚、变硬, 管壁失去弹性及管腔缩小<sup>[2]</sup>。具有高破裂风险的斑块称为易损斑块, 当易损斑块破裂形成腔内血栓时, 会限制和阻塞血流, 严重时甚至危及生命<sup>[3]</sup>。因此, 如何有效检测心血管疾病吸引了众多学者的关注和研究。

目前, 诊断动脉粥样硬化的金标准是有创冠状动脉造影术<sup>[4]</sup>。在这种成像方法中, 主要是根据病灶位置将导管送入左或右冠状动脉开口, 注射造影

收稿日期: 2022-05-20; 修回日期: 2022-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(12004411)。

作者简介: 李霞(1981—), 女, 黑龙江肇东人, 博士, 教授, 研究方向为天然产物开发与利用。

通信作者: 苏敏, E-mail: min.su@siat.ac.cn

剂,然后在X射线图像上可以看到血管的异常,如血管狭窄和堵塞<sup>[5]</sup>。尽管有创冠状动脉造影术具有空间分辨率高、能评估管腔不规则性和实时评估等优点,但冠状动脉造影术是一种二维图像,可能会因为成像角度而发生漏检,并且不能提供有关血管壁和斑块特征的信息<sup>[6]</sup>。

血管内超声(Intravascular Ultrasound, IVUS)成像是一种用于心血管疾病诊断的介入式影像诊断技术。该技术利用导管将微型超声换能器插入心动脉腔内,在血管内部成像,能够实时显示血管横截面组织分布,可以精确评估血管腔开口、血管壁形态和其他相关的血液和血管特性,在冠状动脉疾病的诊断、治疗指导和治疗后评估中发挥着至关重要的作用。

超声换能器作为IVUS成像系统的关键部件,其性能是影响IVUS成像质量的关键因素。制备IVUS换能器是一项非常复杂且难度较大的工作,换能器的尺寸不足1 mm。同时为了发射高频超声波,实现高分辨率成像,压电材料的厚度要求薄至几十微米,超小尺寸和超薄厚度要求使得换能器制备极为困难。如何引线实现电连接也是该换能器制备的一大难点,因此开展IVUS换能器的设计与研究具有重要的学术价值和临床意义。

本文设计并制备了一种用于血管内超声成像的高频超声换能器,并对换能器的电学和声学性能进行测试和表征。测试结果表明,本文中所制备IVUS换能器的中心频率为38.9 MHz, -6 dB相对带宽为56.6%,在谐振频率42.3 MHz处的电阻抗为22.6  $\Omega$ ,在反谐振频率48.2 MHz处的电阻抗为56.5  $\Omega$ ,有效机电耦合系数为0.48。使用该换能器进行线仿体成像实验的结果显示,换能器的纵向分辨率为54  $\mu\text{m}$ ,横向分辨率为209  $\mu\text{m}$ 。最后,与国外同类型换能器进行比较,综合结果表明,该换能器的性能良好,能够满足血管内超声临床检测需求,未来有望能够突破“瓶颈”技术,实现国产替代。

## 1 换能器设计与制备

### 1.1 换能器仿真设计

PiezoCAD换能器建模软件是一款基于KLM模型的仿真软件,能够通过设置阵元尺寸和材料参数获取换能器的回波、阻抗等数据。选用PZT-5H陶瓷(3203HD, CTS, 中国天津)作为压电材料,银粉与Insulcast 502和Insulcure 9(美国)混合物作为第一层匹配层,聚对二甲苯(Parylene)作为第二层匹配层, E-solder 3022(美国)作为背衬材料,通过Piezo-

CAD进行仿真,优化换能器的参数如表1和表2所示。

表1 换能器尺寸及其特征参数

Table 1 Transducer size and its characteristic parameters

尺寸/mm	中心频率/MHz	-6 dB 相对带宽/%	谐振阻抗/ $\Omega$
0.5×0.5	40	62	32.7

表2 换能器的材料及其参数

Table 2 Transducer materials and their parameters

材料	功能	厚度/ $\mu\text{m}$	声阻抗/MRayl
PZT-5H	压电材料	45	37.0
Ag+Epoxy	第一层匹配层	10	7.33
Parylene	第二层匹配层	13	2.5
E-solder 3022	背衬材料	500	5.9

注: 1 MRayl= $1 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

### 1.2 换能器制备

根据PiezoCAD仿真结果,将PZT-5H陶瓷片研磨至45  $\mu\text{m}$ 厚,抛光清洁,镀上金电极。并在镀金陶瓷面上制作第一层匹配层银粉与Insulcast 502和Insulcure 9混合物,并将第一层匹配层厚度研磨至10  $\mu\text{m}$ 厚。对陶瓷片翻面镀金,制作背衬材料Esolder 3022,并将该材料厚度研磨至500  $\mu\text{m}$ 厚。将晶片放至划片机中切割成尺寸为0.5 mm×0.5 mm的大小。由于晶片的尺寸很小,在晶片上引线十分困难,引线不好易导致引线无法连接或者造成正负极导通。因此,本文设计了一款夹具装置,如图1所示。夹具装置可以精确控制x、y、z方向移动和x、y平面的角度旋转,通过操作夹具装置使同轴电缆信号线精准移动到晶片的背衬和匹配层表面上,然后涂抹Esolder 3022进行焊接实现电连接,有效降低引线难度。

将带有同轴电缆线的晶片组装到直径为0.76 mm、长度为2 mm的铜外壳中,使用Epo-Tek 301(美国)环氧树脂填充晶片与外壳之间的缝隙,在晶片表面镀13  $\mu\text{m}$ 厚的parylene作为第二层匹配层和保护层

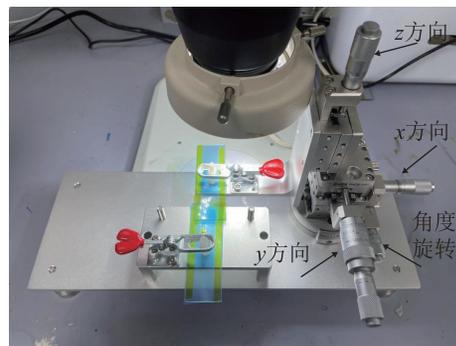


图1 夹具装置图

Fig.1 Fixture drawing

即可完成换能器的制备。换能器的实物图如图2所示。



图2 超声换能器实物图

Fig.2 Picture of a real ultrasonic transducer

### 1.3 换能器性能测试

使用精密阻抗分析仪 6500B(英国)在去离子水中测试换能器的电阻抗。在室温下去离子水中测试换能器脉冲回波响应, 选择一个表面抛光的 X-切石英作为信号反射板, 脉冲发生器/接收仪 UT340(加拿大)以 100 V 电压、2 ns 脉冲宽度激励换能器, 并接收回波信号, 回波信号输出到数字示波器 DPO 4104(美国)上显示。将三根直径为 12.7  $\mu\text{m}$  的钨丝(美国)分别放置在半径为 2.2、3.4、4.6 mm 的同心圆上, 换能器放置在同心圆的中心, 同轴电缆线连接到 Verasonics 数据采集平台开展线仿体成像实验。

## 2 实验结果与讨论

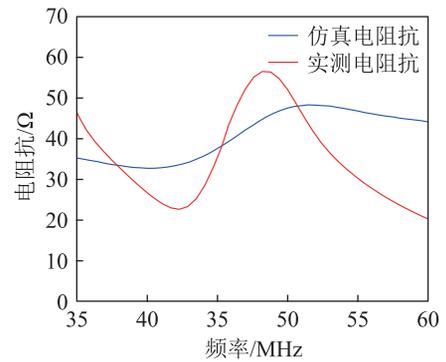
换能器电阻抗和相位角的仿真和实测结果如图3所示。由图3可知对于 PiezoCAD 软件的仿真结果, 谐振频率为 40 MHz, 谐振频率处电阻抗为 32.7  $\Omega$ , 反谐振频率为 51.5 MHz, 反谐振频率处电阻抗为 48.3  $\Omega$ ; 对于在水中实际测试结果, 谐振频率为 42.3 MHz, 谐振频率处电阻抗为 22.6  $\Omega$ , 反谐振频率为 48.2 MHz, 反谐振频率处电阻抗为 56.5  $\Omega$ , 谐振阻抗和反谐振阻抗接近 50  $\Omega$ , 较易实现与电子系统相匹配, 且仿真与实际测试结果大致吻合。

换能器有效机电耦合系数  $K_{\text{eff}}$  的计算公式为

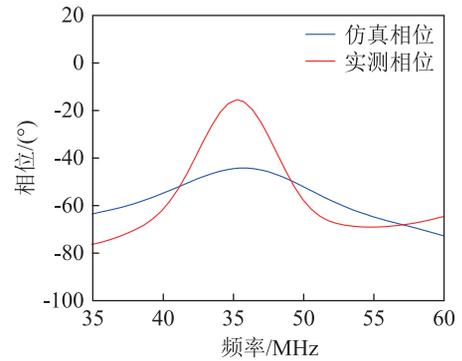
$$K_{\text{eff}} = \sqrt{1 - \frac{f_r^2}{f_a^2}} \quad (1)$$

式中:  $f_r$  和  $f_a$  分别是压电陶瓷的谐振频率和反谐振频率, 根据式(1)可算出换能器实际测试有效机电耦合系数  $K_{\text{eff}}$  为 0.48。

换能器脉冲回波响应和归一化频谱的仿真和实测结果如图4所示。中心频率  $f_c$  和 -6 dB 相对带宽  $W$  分别为



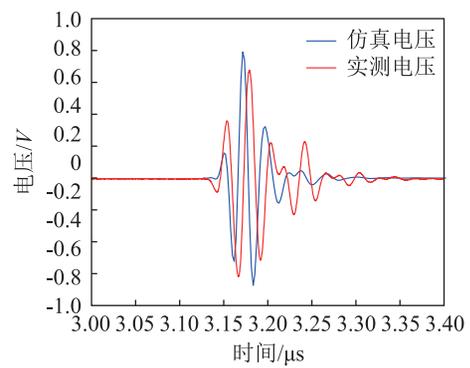
(a) 仿真结果



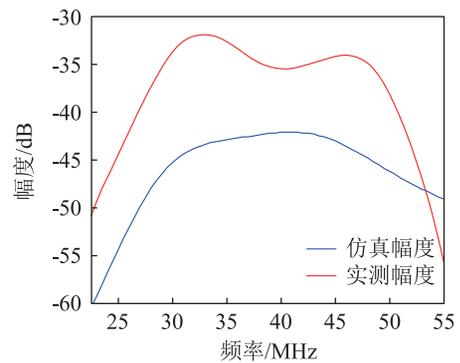
(b) 实测结果

图3 仿真和实际测试的换能器电阻抗和相位角随频率的变化关系

Fig.3 Relationships of the simulated and tested electrical impedances and phase angles with frequency



(a) 仿真结果



(b) 实测结果

图4 仿真和实际测试的脉冲回波波形及其频谱  
Fig.4 Simulated and tested pulse echo waveforms and their spectrums

$$f_c = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (2)$$

$$W = \frac{f_2 - f_1}{f_c} \quad (3)$$

式中： $f_1$ 和 $f_2$ 分别为-6 dB的下限频率和上限频率， $f_c$ 为中心频率， $W$ 为-6 dB相对带宽。根据图4及式(2)、(3)的计算可知，换能器仿真的中心频率为40 MHz，-6 dB相对带宽为62.1%。换能器实际测试中心频率为38.9 MHz，-6 dB相对带宽为56.6%，仿真与实际测试结果大致吻合。

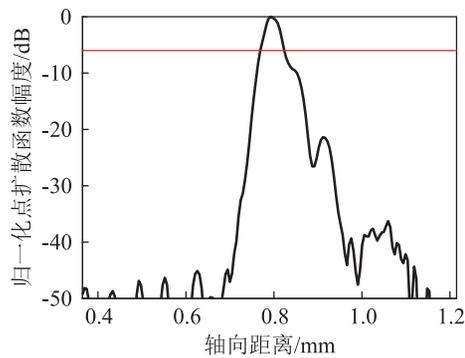
换能器线仿体超声图像如图5所示。图5中显示了动态范围为50 dB的线仿体超声图像，换能器能够分辨出不同半径的钨丝，表明该换能器能够实现高分辨率成像。

线仿体轴向和横向归一化点扩散函数如图6所

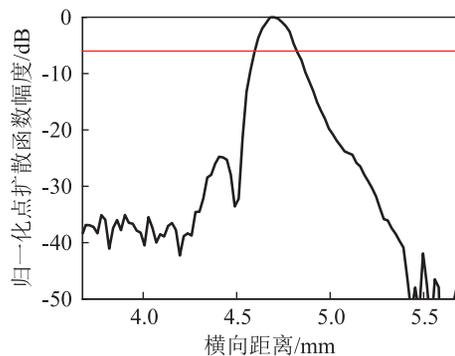


图5 超声换能器线仿体成像结果

Fig.5 Wire phantom imaging result of the ultrasonic transducer



(a) 轴向



(b) 横向

图6 线仿体的轴向和横向归一化点扩散函数图

Fig.6 Graphs of the normalized axial and lateral point diffusion functions of the wire phantom

示。所测得换能器的轴向分辨率为54  $\mu\text{m}$ ，横向分辨率分别为209  $\mu\text{m}$ 。

本文制备的换能器与其他同类型换能器性能比较如表3所示。由表3可知，本文使用PZT-5H压电材料制备的换能器性能能够与其他文献报道压电材料制备的换能器性能相媲美，未来有望能够突破技术瓶颈，实现国产替代。

表3 本文制备的换能器与其他同类型换能器性能比较

Table 3 Performance comparison of this transducer with others of the same type

压电材料	中心频率/ MHz	-6 dB 相对 带宽/%	机电耦合 系数
PMN-PT <sup>[7]</sup>	45	45	0.55
PZN-7%PT <sup>[8]</sup>	43	45	0.53
PMN-0.28PT <sup>[9]</sup>	35	54	-
PIN-PMN-PT <sup>[10]</sup>	35	48	0.56
PZT-5H <sup>[11]</sup>	45.5	48.7	-
PZT-5H(本文)	38.8	56.6	0.48

### 3 结论

本文设计并制备了一种用于血管内超声成像的高频超声换能器，并对换能器的电学和声学性能进行测试和表征。测试结果表明，本工作所制备的IVUS换能器的中心频率为38.9 MHz，-6 dB相对带宽为56.6%，在谐振频率42.3 MHz处的电阻抗为22.6  $\Omega$ ，在反谐振频率48.2 MHz处的电阻抗为56.5  $\Omega$ ，有效机电耦合系数为0.48。使用该超声换能器进行线仿体成像实验的结果显示，换能器的纵向分辨率为54  $\mu\text{m}$ ，横向分辨率为209  $\mu\text{m}$ 。最后，将本文中制备的超声换能器与国外同类型换能器进行比较，结果表明，该换能器的性能良好，能够满足血管内超声临床检测需求，未来有望能够突破“瓶颈”技术，实现国产替代。

### 参 考 文 献

- [1] 《中国心血管健康与疾病报告》编写组. 《中国心血管健康与疾病报告 2020》概述[J]. 中国心血管病研究, 2021, 19(7): 582-590.
- [2] VIRMANI R, KOLODZIE F D, BURKE A P, et al. Lessons from sudden coronary death: a comprehensive morphological classification scheme for atherosclerotic lesions[J]. Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology, 2000, 20(5): 1262-1275.
- [3] GARCIA-GARCIA H M, de ARAUJO GONÇALVES P. On the pathophysiology of Coronary Artery disease: we were told where to go but not how to get there[J]. JACC. Cardiovascular Imaging, 2018, 11(12): 1795-1798.
- [4] TARKIN J M, DWECK M R, EVANS N R, et al. Imaging atherosclerosis[J]. Circulation Research, 2016, 118(4): 750-769.

- [5] SETTECASE F, RAYZ V L. Advanced vascular imaging techniques[J]. Handbook of Clinical Neurology, 2021, **176**: 81-105.
- [6] JOSHI F R, LINDSAY A C, OBAID D R, et al. Non-invasive imaging of atherosclerosis[J]. European Heart Journal - Cardiovascular Imaging, 2012, **13**(3): 205-218.
- [7] ZHOU Q F, XU X C, GOTTLIEB E J, et al. PMN-PT single crystal, high-frequency ultrasonic needle transducers for pulsed-wave Doppler application[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2007, **54**(3): 668-675.
- [8] ZHOU Q F, WU D W, JIN J, et al. Design and fabrication of PZN-7%PT single crystal high frequency angled needle ultrasound transducers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2008, **55**(6): 1394-1399.
- [9] FEI C L, YANG Y H, GUO F F, et al. PMN-PT single crystal ultrasonic transducer with half-concave geometric design for IVUS imaging[J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2018, **65**(9): 2087-2092.
- [10] SUN P, ZHOU Q F, ZHU B P, et al. Design and fabrication of PIN-PMN-PT single-crystal high-frequency ultrasound transducers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, **56**(12): 2760-2763.
- [11] ZHANGJIAN L, WEIWEI S, YONGJIA X, et al. Different layer thickness influences of a 50MHz intravascular ultrasound transducer[J]. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference, 2014, **2014**: 542-545.