

血管内超声换能器的研究现状与进展

侯尚,费春龙,杨新宇,孙昕郝,周歧发

(西安电子科技大学 微电子学院,陕西 西安 710071)

摘要:血管内超声(IVUS)是通过心导管将微型化的超声换能器插入心血管腔内进行探测,再经电子成像系统显示心血管断面形态和血流图形的技术。面对商用 IVUS 换能器成像分辨率不足等问题,该文归纳并总结了近几年研究中多种提高 IVUS 换能器成像性能的方式,即增加换能器的频率、采用性能优越的压电材料以及改善换能器的结构等,并预测了 IVUS 换能器的发展方向。

关键词:血管内超声;高频超声换能器;复合材料;多频超声;聚焦波束

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2019.03.015

Research Status and Progress of Intravascular Ultrasound Transducer

HOU Shang, FEI Chunlong, YANG Xinyu, SUN Xinhao, ZHOU Qifa

(School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The intravascular ultrasound (IVUS) is a technique that a miniaturized ultrasound transducer is inserted into the lumen of the cardiovascular vessel through a cardiac catheter for detection, and the morphology and blood flow pattern of the cardiovascular section are displayed by an electronic imaging system. Facing the problems of insufficient imaging resolution of commercial IVUS transducers, this paper sums up and summarizes several ways to improve the imaging performance of IVUS transducers in recent years, such as increasing the frequency of transducers, using piezoelectric materials with superior performance and improving the structure of transducers, and predicts the development direction of IVUS transducers.

Key words: intravascular ultrasound; high frequency ultrasonic transducer; composite material; multi-frequency ultrasound; focused beam

0 引言

随着经济的飞速发展,人们的物质生活质量不断提高,心脑血管疾病的患病率呈现上升趋势。目前,心血管疾病患者人数约 2.9 亿,心血管疾病已成为当代社会发病率、致残率最高的疾病之一^[1]。最常见的心血管疾病为动脉粥样硬化,其特征主要是动脉管壁变厚、变硬,管壁失去弹性及管腔缩小。动脉粥样硬化的死亡风险随着易损斑块破裂而显著增加。确定斑块易损性有 3 个主要因素:纤维帽的厚度,动脉粥样硬化脂质核心的大小和构成及纤维帽内部或邻近区域的炎症。易损性斑块的薄纤维帽位于血管壁表面附近,脂质核通常

在动脉壁内沉降,并被薄纤维帽覆盖^[2]。这些与正常动脉壁结构相异的特点,可以通过血管内超声技术来检测。

1 血管内超声(IVUS)换能器研究现状

IVUS 是 20 世纪 80 年代末发展起来的介入式超声成像技术。如图 1 所示,IVUS 通过心导管将微型化的超声探头插入心血管腔内进行探测,再经电子成像系统显示心血管断面的形态和血流图形^[3]。在心血管疾病领域,血管造影是确定粥样硬化血管狭窄位置和程度的常规诊断技术。然而,它不能获得狭窄血管壁的结构信息来准确评估粥样硬化疾病。比较而言,IVUS 不仅可以了解管腔的大

收稿日期:2018-06-20

基金项目:国家国际科技合作重点专项(2016YFE0107900);陕西省自然科学基金青年项目(2017JQ1006);西安电子科技大学自由探索项目(XJS16034, JBG161101)

作者简介:侯尚(1995-),女,河南镇平人,硕士生,主要从事血管内超声换能器的制备及性能的研究。通信作者:周歧发,教授,国际光学与光子学会会员,美国医学与生物工程院院士,IEEE UFFC 铁电委员会委员,主要研究方向为超声换能器和医学成像应用的压电材料与器件。

小、形状及管壁结构,还可以精确地测量血管腔的截面积,辨认血管壁钙化、纤维化和脂质核等病变^[4]。近年来,IVUS已成为心血管疾病诊断治疗的重要手段。

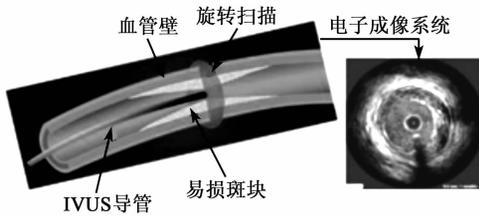


图1 IVUS成像原理

目前,市场上IVUS系统中常用的IVUS导管有两种:

1) 机械旋转型。其通过马达驱动旋转轴末端的换能器旋转来获取回波信号。波科(Boston Scientific)公司的 Atlantis SR Pro 系列导管及飞利浦火山公司(Philips Volcano)的 Revolution 系列导管均属于机械旋转型。

2) 相控阵型。其由环状排列的多阵元相控阵换能器构成。飞利浦火山公司(Philips Volcano)的 Eagle Eye Platinum 系列导管是市场上唯一的相控阵型导管。

机械旋转型IVUS导管的缺点是在弯曲血管段旋转轴与导管内壁易发生摩擦,产生不均匀旋转,导致图像变形;而相控阵型IVUS导管的换能器无需驱动和回撤装置,即插即用,但其图像分辨率比机械旋转型的差,在导管周边还会有超声盲区。

商用IVUS换能器中的压电阵元均采用 $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ (PZT)陶瓷,其中心频率为20~40 MHz,轴向分辨率为70~200 μm ,横向分辨率为200~400 μm ,成像深度为5~10 mm,而薄纤维帽的厚度通常小于65 μm ^[5]。较差的空间分辨率将造成血管和血小板组成的微结构详细信息的缺失,临床检测需要更高的空间分辨率来评估动脉粥样硬化斑块的易损性。

2 血管内超声换能器研究进展

2.1 压电阵元

压电阵元作为IVUS换能器中最重要的部分,压电材料性能的优劣对换能器而言至关重要。近年来, $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})-\text{PbTiO}_3$ (PMN-PT)单晶的研究与制备愈发成熟^[6]。 $\text{PbIn}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3-\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3-\text{PbTiO}_3$ (PIN-PMN-PT)、PMN-PT以及PZT的

性能参数如表1所示。与PZT陶瓷相比,PMN-PT单晶具有更高的机电耦合系数 k_t 、相对介电常数 ϵ_r/ϵ_0 和压电常数 d_{33} 。PMN-PT单晶的居里温度 T_C 较低,在换能器制作过程及后续的高温灭菌过程中易退极化,导致换能器性能下降;而基于PMN-PT材料掺杂制备的PIN-PMN-PT单晶具有较高的 T_C ,温度依赖性低,制备的换能器性能更稳定^[7]。

表1 材料性能参数

材料	k_t	$d_{33}/$ ($\text{pC} \cdot \text{N}^{-1}$)	ϵ_r/ϵ_0 (1 kHz)	$T_C/^\circ\text{C}$
PIN-PMN-PT ^[7]	0.58	1 301	4 160	160
PMN-PT ^[7]	0.58	1 430	5 229	131
PZT ^[5]	0.51	593	1 470	193

由于压电材料尺寸限制了其在高频换能器方面的应用,因此,压电薄膜更适用于制备高频IVUS换能器。Li Xiang等^[8]制备了PMN-PT自支撑薄膜,利用该薄膜材料制备的换能器获得的兔主动脉IVUS图像如图2所示。与35 MHz PMN-PT单晶换能器相比,80 MHz PMN-PT薄膜换能器具有更高的空间分辨率(轴向分辨率为35 μm ,横向分辨率为176 μm),可以清楚地识别兔主动脉的血管壁分层和脂肪组织。

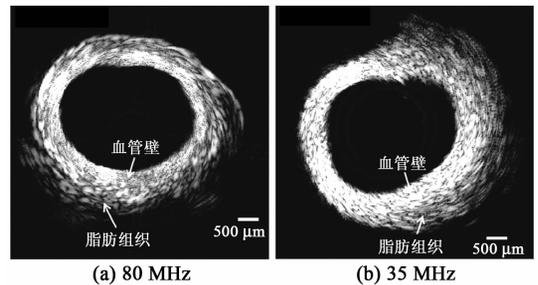


图2 IVUS换能器获得的兔主动脉截面

与单一压电材料相比,压电复合材料的性能更优越。压电复合材料的声阻抗明显低于单一压电材料,可以有效地减少IVUS换能器与组织之间的声阻抗失配,提高声能传输效率,故制作的IVUS换能器具有更大的频域带宽,轴向分辨率得到改善。压电复合材料的 k_t 高于单一压电材料,制作的IVUS换能器具有更高的灵敏度。此外,压电复合材料是由较大比例的聚合物(如环氧树脂)组成,在高温下具有较好的柔韧性,易实现几何聚焦。

在压电复合材料中,1-3型压电复合材料的潜力巨大,特别适用于医学成像。Jian Xiaohua等^[9]

制作的 50 MHz 1-3 型复合 PZT IVUS 换能器的 k_t 高达 0.7 (PZT 陶瓷的 k_t 约为 0.5)。Yuan Jian 等^[10]制作的 40 MHz 1-3 型复合 PMN-PT IVUS 换能器的 k_t 高于 0.7, 声阻抗低至约 20 MRayl (PZT 陶瓷声阻抗约为 36 MRayl), -6 dB 带宽和灵敏度几乎是传统 PZT 陶瓷 IVUS 换能器的两倍。Li Xiang 等^[11]制备的 1-3 复合型 PIN-PMN-PT 如图 3 所示, 利用该材料制备的 40 MHz IVUS 换能器的 k_t 高于 0.75, 声阻抗在 20~22 MRayl, -6 dB 带宽约为 40 MHz PMN-PT 单晶换能器的 2 倍。综上所述, 复合材料在 IVUS 超声换能器中应用前景广阔。

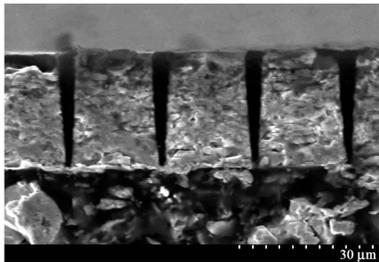


图3 带有导电背衬的 1-3 型复合 PIN-PMN-PT

PZT 陶瓷、PMN-PT 单晶及其复合材料均是铅基压电材料, 而有毒的铅基压电材料的应用引起了严重的环境污染等问题。目前, 无铅材料的研究已取得了很大的进展。Yan Xingwei 等^[12]制备的 $0.5\text{Ba}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3-0.5(\text{Ba}_{0.7}\text{Ca}_{0.3})\text{TiO}_3$ (BZT-50BCT) 具有良好的压电性能, 其 d_{33} 为 597 pC/N, 与 PZT 陶瓷相当, 利用该陶瓷制备的 30.5 MHz IVUS 换能器的 k_t 为 0.41。Zhu Benpeng 等^[13]制备了 $\text{K}_{0.504}\text{Na}_{0.496}\text{Li}_{0.933}\text{NbO}_3$ (KNLN) 厚膜, 其 d_{33} 为 150 pm/V, 利用该厚膜制备的 52 MHz IVUS 换能器的 k_t 为 0.44。由此可以看出, 无铅压电材料拥有与铅基压电材料可比拟的压电性能, 有望代替铅基压电材料应用于 IVUS 压电器件中, 具有广阔的应用前景。

2.2 聚焦结构

聚焦 IVUS 超声换能器通过将超声能量集中到一个焦点区域来提高声场强度, 减少波束宽度, 提高 IVUS 换能器的空间分辨率, 可以更有效地描述冠状动脉的形态和病理信息。常见的聚焦方式有球压聚焦 (press-focusing technique) 和机械研磨聚焦 (mechanical dimpling technique) 两种。两种聚焦方式都可以减少波束宽度, 提升横向分辨率, 但机械研磨聚焦技术引起压电阵元厚度连续变化, 增大了换

能器的频域带宽, 提高了 IVUS 换能器的轴向分辨率。Lee Junsu 等^[14]利用 press-focusing 技术制备的长方形聚焦 IVUS 换能器如图 4 所示, 该设计有效地提高了 IVUS 换能器的横向分辨率。Fei Chunlong 等^[15]利用 mechanical dimpling 技术研制的 30 MHz PMN-PT 聚焦 IVUS 换能器如图 5 所示, 与厚度均匀的平面 IVUS 换能器相比, 该聚焦换能器具有更优的频率带宽与空间分辨率。

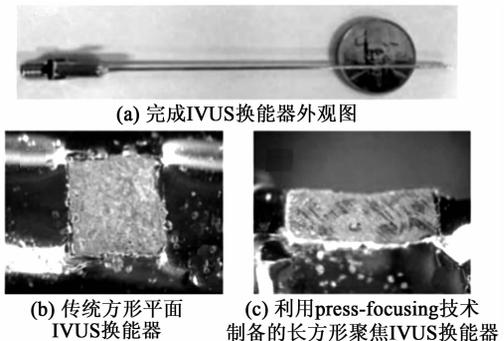


图4 IVUS 换能器的研制

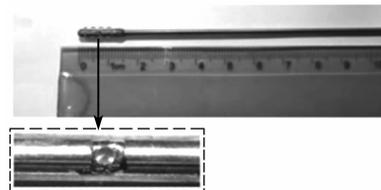


图5 30 MHz PMN-PT 基聚焦 IVUS 换能器

2.3 多频换能器

提高 IVUS 换能器的频率可以改善 IVUS 成像的空间分辨率, 但高频超声在血液和血管组织中具有较强的衰减性, 其穿透深度会随着频率的增高而降低。多频换能器通过将低频、高频换能器集成在一起, 工艺实现难度低, 且图像易配准, 较好地兼顾了空间分辨率与穿透深度。

多频换能器利用其中的低频换能器获取血管壁的整体信息, 利用高频换能器获取血管壁表面的微结构信息, 这种换能器常见的结构为横排式和背对式。Yoon angpil 等^[16]制作的横排式多频换能器结构如图 6 所示。成像时, 高频 IVUS 换能器在低频 IVUS 换能器成像完成时需上移 1.5 mm 来保证对血管同一截面成像。Ma Teng 等^[5]制作了背对式多频换能器, 在两个背对的 IVUS 换能器之间用环氧树脂键合一层聚酰亚胺层, 以进一步隔离电信号。成像后, 将其中一个 IVUS 换能器所成图像旋转 180°, 即可实现与另一个 IVUS 换能器所成图像的共配准。

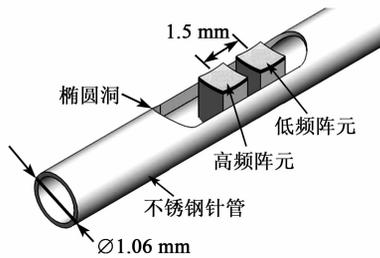


图6 横排多频IVUS换能器结构图

堆栈式多频换能器利用其中的低频换能器发射穿透深度较深的超声波,利用高频换能器接收回波,保证成像的空间分辨率,在IVUS造影成像的应用上潜力巨大。Ma Jianguo等^[17]设计了堆栈式多频换能器,高频换能器位于低频换能器之上,其间设置声学滤波器层,在抑制高频波传播的同时仍允许低频波传播,实现了“低发高收”。

3 血管内超声换能器发展趋势

面对商用PZT陶瓷IVUS换能器存在成像分辨率不足等问题,医疗检测需要高空间分辨率($< 65 \mu\text{m}$),高穿透深度($> 5 \text{mm}$)、微型化($< 0.7 \text{mm}$)的IVUS换能器来检测病变血管^[16]。PIN-PMN-PT压电复合材料(高 k_t 、高 d_{33} 、高 ϵ_r/ϵ_0 及低声阻抗)性能优异,更适合制作高分辨率、高灵敏度、微型化的IVUS换能器。调整PIN-PMN-PT制备工艺、掺杂元素的类型及比例,提升PIN-PMN-PT的居里温度,掺杂PIN-PMN-PT压电复合材料有望代替PZT陶瓷成为新一代商用IVUS换能器的压电材料。

面对IVUS换能器穿透深度和空间分辨率不可兼得的矛盾,一种方案是在较低频率(40 MHz)IVUS换能器上采用新型匹配层来提升换能器的带宽,进而提高IVUS换能器的轴向分辨率^[18];另一种方案是多频换能器。此外,在工艺水平允许的情况下,可将IVUS与其他成像方式(如光学相干断层扫描(OCT))结合,既保留了IVUS高穿透深度的特点,又引进了OCT高空间分辨率的优势,这种双模成像模式将成为诊断心血管疾病的重要手段。

考虑到机械旋转型IVUS导管成像存在伪像,改进相控阵型换能器(如提高频率(商用20 MHz))也将是IVUS换能器的发展趋势。

4 结束语

从IVUS换能器的研究现状和进展来看,IVUS换能器压电材料对陶瓷、单晶、薄膜、复合材料及无

铅材料均有选用。结构上,聚焦结构提高了IVUS换能器空间分辨率,多频换能器兼顾了空间分辨率和穿透深度。新型压电材料的应用和结构的改善依然是IVUS换能器的发展方向。

参考文献:

- [1] 陈伟伟.《中国心血管病报告》2017概要[J].中国循环杂志,2018,33(1):1-8.
CHEN Weiwei. China cardiovascular diseases report 2017 summary[J]. Chinese Circulation Journal, 2018, 33(1):1-8.
- [2] HARTMANN M, HUISMAN J, BÖSE D, et al. Serial intravascular ultrasound assessment of changes in coronary atherosclerotic plaque dimensions and composition: an update[J]. European Journal of Echocardiography, 2011, 12(4): 313-321.
- [3] 万明习.生物医学超声学[M].北京:科学出版社,2010.
- [4] KASTELEIN J J, DE GROOT E. Ultrasound imaging techniques for the evaluation of cardiovascular therapies[J]. European Heart Journal, 2008, 29(7): 849-858.
- [5] MA Teng, YU Mingyue, CHEN Zeyu, et al. Multi-frequency intravascular ultrasound (IVUS) imaging[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2015, 62(1):97-107
- [6] GUO Feifei, LIU Cheng, YAO Heng, et al. Development of focused IVUS transducer using PMN-PT single crystal[J]. 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2014, 62(1): 97-100.
- [7] SUN Ping, ZHOU Qifa, ZHU Benpeng, 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.
- [8] LI Xiang, ZHOU Qifa, SHUNG K, et al. Novel PMN-PT free standing film for high frequency (80 MHz) intravascular ultrasonic imaging[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(11): 2281-2288.
- [9] JIAN Xiaohua, HAN Zhile, LIU Pengbo, et al. Fabrication and performance of a micro 50 MHz IVUS Transducer based on a 1-3 composite with geometric focusing [J]. 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2015, 41(6):1-4.