

# 薄膜体声波传感器及其读出电路进展

高 杨<sup>1,3</sup>, 何婉婧<sup>2</sup>, 李君儒<sup>2</sup>, 黄振华<sup>2</sup>, 蔡 洵<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川绵阳 621999; 2. 西南科技大学 信息工程学院, 四川绵阳 621010;

3. 重庆大学 新型微纳器件与系统技术国防重点学科实验室, 重庆 400044)

**摘 要:** 薄膜体声波谐振器(FBAR)具有高灵敏度、高工作频率、低功耗、小尺寸及制造工艺 IC 兼容的特点, 使其成为高效能换能器和传感器的理想技术。基于 FBAR 的传感器, 如高灵敏度质量传感器、DNA 和蛋白质探测器、气体传感器、水银离子探测器和微区质量探测器, 与采用其他微电子机械系统的同类传感器相比, 已取得了更好的传感性能。该文综述了 FBAR 传感器的进展, 特别是 FBAR 高灵敏度传感器、FBAR 谐振式传感器及其高频读出电路; 提出了采用六端口反射计实现 FBAR 换能器的射频频率偏移信号读出、基于单片微波集成电路或低温共烧陶瓷工艺制备的六端口网络构建集成 FBAR 传感器的原创设想。

**关键词:** 薄膜体声波谐振器; 传感器; 换能器; 微机电系统(MEMS); 读出电路; 六端口反射计

**中图分类号:** TN405; TP212.1 **文献标识码:** A

## FBAR Sensors and Their Read-out Circuits-a Review of Status

GAO Yang<sup>1,3</sup>, HE Wanjing<sup>2</sup>, LI Junru<sup>2</sup>, HUANG Zhenhua<sup>2</sup>, CAI Xun<sup>2</sup>

(1. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;

2. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

3. National Key Lab. of Fundamental Science of Micro/Nano-Device and System Technology,

Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The high sensitivity, high operating frequencies (GHz), low power consumption, small size and IC compatible fabrication process of FBAR make this technology ideal for high performance transducers and sensors. FBAR-based sensors as, for example, high sensitivity mass sensors, DNA and protein detector, gas sensor, mercury-ion detector, and localized-mass detector achieve improved sensing performance compared to other MEMS sensor technologies. The primary focus of this paper is to summarize the FBAR sensor technology developments and the investigations of the FBAR high sensitive sensor, FBAR resonant sensor and their high frequencies read-out circuit. The original idea which presented here is to achieve the FBAR transducers' resonant frequency shift signal read-out by the six-port reflectometer scheme, and to fulfill the FBAR sensors' monolithic integration with the MMIC or LTCC fabricated six-port networks.

**Key words:** film bulk acoustic resonator(FBAR); sensor; transducer; MEMS; read-out circuit; six-port reflectometer

### 0 引言

1981年, Lakin等<sup>[1]</sup>最早报道了硅基薄膜体声波谐振器(FBAR)。20年后, Bradley等在Agilent公司实现了FBAR滤波器的量产<sup>[2]</sup>。由于FBAR具有工作频率高, 体积小, 品质因数(Q)高, 损耗低, 功率容量大, 换能效率高及互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容等优点, 在通信领域得到了广泛

应用。如Avago公司计划在15个4G/LTE频段采用FBAR滤波器, 解决多种通信体制充分利用2.3~2.7 GHz频段的问题。

FBAR技术从射频应用延伸到广阔的传感器应用, 有可能开创一个全新的传感器领域。本文在文献综述的基础上, 提出了以下观点:

**收稿日期:** 2014-05-20

**基金项目:** 中国工程物理研究院超精密加工技术重点实验室基金资助项目(ZZ14001, 2012CJMZZ00009); 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室访问学者基金资助项目; 重庆大学新型微纳器件与系统技术国防重点学科实验室访问学者基金资助项目(2013MS04); 中国工程物理研究院电子工程研究所创新基金资助项目(S20141203); 西南科技大学研究生创新基金资助项目(14YCX107, 14YCX109, 14YCX111)

**作者简介:** 高杨(1972-), 男, 四川绵阳人, 研究员, 博士, 主要从事微机电系统(MEMS)的研究。E-mail: gaoyang@caep.cn.

1) FBAR 是实现高灵敏度传感器、谐振式传感器的理想技术。

2) 不依赖网络分析仪、易与表头集成的射频信号读出电路实现, 已经成为 FBAR 传感器集成化、实用化的共性瓶颈问题之一。

3) 结构简洁, 低成本及易于单片集成的六端口反射计能满足 FBAR 传感器射频信号读出的要求。本文首次提出了采用六端口反射计实现 FBAR 换能器射频频率偏移信号读出及基于六端口技术构建集成 FBAR 传感器的原创设想。

### 1 FBAR 是高灵敏度传感器的理想技术

FBAR 的基本结构如图 1 所示, 由顶电极和底电极夹杂一层压电薄膜(如 AlN、ZnO)组成, 通过在压电薄膜中激发出体声波形成谐振来工作。采用微电子工艺(如磁控反应溅射)制备压电薄膜, 可制作的很薄, 因此, FBAR 的谐振频率通常在 0.5 ~ 10 GHz<sup>[3]</sup>。根据衬底的声学隔离方式, 主要有膜片型和固体装配型(SMR)两种结构<sup>[4]</sup>。膜片型也称作气隙型, 典型结构如图 1 所示<sup>[5]</sup>。固体装配型有更皮实的机械结构, 但需制作 Bragg 声反射镜。

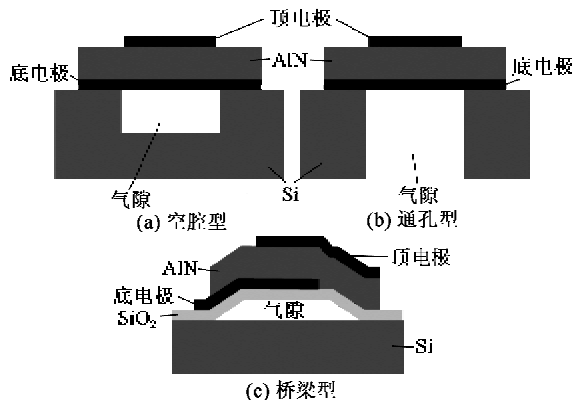


图 1 膜片型 FBAR 的 3 种典型结构

FBAR 是实现高性能换能器/传感器的理想技术, 在传感器领域的应用前景正引起广泛的兴趣。FBAR 传感器的压电声学层常采用 CMOS 工艺兼容的 AlN 或 ZnO 材料, 压电声学层的工作模式主要为厚度伸缩模式或厚度剪切模式(适用于液体环境的传感器), 通过检测 FBAR 谐振频率偏移实现物理量的检测。待测物理量造成的 FBAR 谐振频率偏移通常在数十兆赫兹量级, 因此具有高灵敏度的优点<sup>[6]</sup>。

文献报道了多种 FBAR 新型传感器的实验室成果, 如 DNA 和蛋白质检测器<sup>[7]</sup>、芯片上实验

室<sup>[8]</sup>、气体传感器<sup>[9]</sup>、微区质量检测器<sup>[10]</sup>、汞离子传感器<sup>[11]</sup>、液体粘滞度传感器<sup>[12]</sup>、爆炸物探测器<sup>[13]</sup>、紫外线传感器<sup>[14]</sup>、红外传感器<sup>[15]</sup>及  $\gamma$  射线探测器<sup>[16-17]</sup>等。

近年来, 国内也开展了 FBAR 传感器的研究工作, 如生化传感器<sup>[18]</sup>、毒品检测传感器<sup>[19]</sup>、温度与压力传感器<sup>[20]</sup>、微质量传感器<sup>[21]</sup>等。自 2010 年, FBAR 生物传感器、紫外和红外光传感器等方面的基础研究开始得到国家自然科学基金的资助; 对 FBAR 谐振器、滤波器的资助则始于 2005 年, 与国际上 FBAR 技术从射频应用延伸到传感器应用的趋势吻合。

### 2 FBAR 是谐振式传感器的理想技术

FBAR 作为一种结构简单, 无可动结构, 谐振性能优良及易于集成的电声谐振器, 是建谐振式传感器的理想技术, 可能在提升微型传感器性能(灵敏度、精度等)的同时改善其可靠性、稳定性与可制造性, 满足在军民应用中, 高性能微型传感器苛刻的综合性要求。

微加速度计是最重要的微电子机械系统(MEMS)传感器之一, 从广泛应用的消费电子、汽车电子、医疗仪器到最尖端高新武器装备中都发挥着重要作用。展望微加速度计的发展, 探索新的检测机理和单片集成工艺, 在满足产品性能(灵敏度、精度等)要求的同时提高可靠性、稳定性与可制造性是不断追求的目标。

目前实用化的微加速度计, 主要采用电容、压阻、场效应晶体管(FET)等检测原理; 通过测量输出信号的幅值或相位实现加速度的检测。由于表头输出的模拟信号极其微弱, 易受到环境温度、寄生电容、电磁干扰等的影响。

谐振式微加速度计检测谐振频率偏移信号, 由于频率是时间的倒数、时间在所有物理信号的变换中保持不变, 因此, 谐振式微加速度计具有抗干扰能力强, 分辨率和测量精度高等优点, 且是准数字信号输出, 读出电路易于集成, 在重力测量、惯性导航、油气探测、结构振动监测等中高精度领域有良好的应用前景。谐振式微加速度计需产生谐振的谐振器, 可利用核磁共振(NMR)效应、光波导的 Sagnac 效应、机械音叉谐振等原理, 但前两者需复杂的微光机电集成, 因此, 目前仍主要基于微机械谐振器实现。机械谐振式微加速度计的工作原理是加速度产生的

惯性力使微机械谐振器的质量或刚度发生变化,从而引起其谐振频率偏移,检测谐振频率偏移可实现加速度的测量。由于需要复杂、可动的微机械结构和复杂的驱动/检测电路,实用化的机械谐振式微加速度计必须解决好可靠性、稳定性、选择性等诸多难题。

FBAR 是一种结构简单、无可动结构、谐振性能优良、易于工艺集成的电声谐振器,利用 FBAR 构建新型谐振式微加速度计,是一个崭新的思路,有可能满足中、高精度微加速度计对性能、可靠性、稳定性与可制造性的综合要求。

2009 年, Campanella 等<sup>[22]</sup>报道了一种基于 FBAR 的电声谐振式微加速度计,该工作得到了高精度惯性器件领先制造商 Seiko Epson 的资助。其结构和工作原理如图 2 所示。由图可知,用于信号检测的 FBAR 嵌入到硅微悬臂梁-质量块结构中,硅微结构将惯性加速度信号转换为作用于硅悬臂梁中的应变,再通过表头集成结构的机械耦合,作用于 FBAR 叠层结构(底电极-压电声学层-顶电极)的压电声学层(薄膜),导致 FBAR 谐振频率偏移。检测谐振频率偏移,可实现惯性加速度的测量。

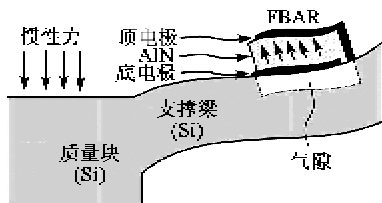
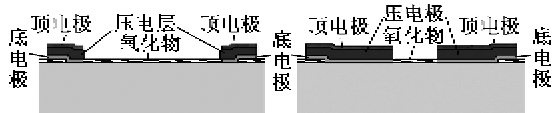


图 2 FBAR 微加速度计的工作原理<sup>[22]</sup>

由于 FBAR 结构简单,与硅微惯性力敏结构工艺兼容,可在硅基 MEMS 工艺中实现 FBAR-硅微机械集成的表头结构。根据 FBAR 与硅微惯性力敏结构的结合方式,可分为“嵌入式 FBAR(embedded-FBAR)”和“FBAR-梁(FBAR-beam)”两种表头集成结构<sup>[22]</sup>,相应的硅基 MEMS 工艺流程如图 3 所示。从工艺角度比较可知,FBAR-梁结构中,FBAR 底电极下的空气腔在硅微弹性梁的成型中同步形成,无需额外的工序;嵌入式 FBAR 结构中,FBAR 底电极下的空气腔则需采用牺牲层表面微机械工艺专门制作,增加了相应的工序,工艺难度较大。



(a) 在硅衬底顶部氧化层上制作 FBAR(金属-压电-金属沉积)

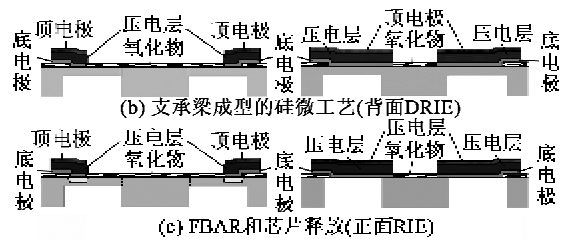


图 3 嵌入式 FBAR 和 FBAR-梁两种集成表头结构及其微加工工艺流程示意图

图 4 为 Campanella 等<sup>[22]</sup>给出的 FBAR 微加速度计实物的扫描电镜(SEM)照片,表头采用 FBAR-梁集成结构,即感知惯性力的弹簧-质量系统为典型的两端对称的四梁-质量块结构;实现力-电(频率)换能的 FBAR(见图 4 中的插图),FBAR 的尺寸为  $20 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。背面深反应离子刻蚀(DRIE)刻蚀后硅腔体的深度约为  $300 \mu\text{m}$ 。表头工艺样品的重力场静态翻转测试结果表明,即便存在 FBAR 键合引线、连接到网络分析仪的射频 SMA(Small A Type)接头和同轴探头等外部连接等系统误差源,其灵敏度仍高达  $100 \text{ kHz}/g_n$  ( $g_n$  为过载数),远优于机械谐振式微加速度计 ( $10 \text{ Hz}/g_n$ ) 的水平<sup>[22]</sup>。

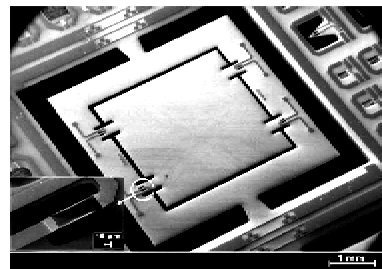


图 4 FBAR 微加速度计实物(SEM照片)<sup>[22]</sup>

### 3 读出电路是 FBAR 传感器集成的瓶颈

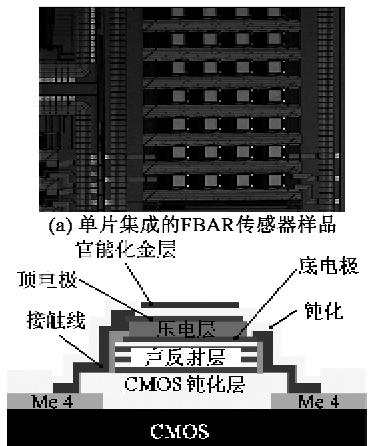
FBAR 的谐振频率通常为  $0.5 \sim 10 \text{ GHz}$ <sup>[3]</sup>,待测物理量引起的 FBAR 谐振频率偏移通常在数十兆赫兹量级,因此,FBAR 传感器的信号检测需在 UHF ( $0.3 \sim 3 \text{ GHz}$ ) 及以上的射频段实现。由于 FBAR 传感器尚处于实验室研究的起步阶段,出于快捷验证概念的目的,实验室中 FBAR 换能器的信号检测主要采用片上(on-wafer)测试、板上(CoB)测试和板上封装(PoB)测试的方法,需使用体积庞大,价格贵及操作复杂的通用电子仪器网络分析仪。

传感器表头与读出电路的集成化,是传感器实用化的前提。集成 FBAR 传感器意味着,目前依赖网络分析仪实现的 FBAR 射频频段谐振频率偏移信号检测功能,必须集成到 FBAR 传感器的读出电路中。不依赖网络分析仪、易与表头集成的射频信

号读出电路实现方法,已成为 FBAR 传感器集成化、实用化的共性瓶颈问题之一。

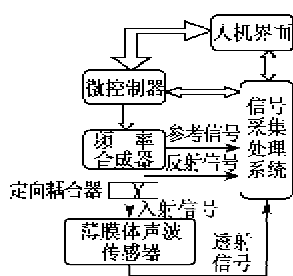
适合集成 FBAR 传感器的信号检测方法目前还鲜有报道,但已有一些尝试。

2009年,德国 Siemens 公司与芬兰 VTT 中心<sup>[23]</sup>联合研制了一种 post-CMOS 工艺单片集成有 64 单元的 FBAR 生化传感器阵列,如图 5(a)所示。传感器单元的结构如图 5(b)所示,FBAR 为 SMR 结构,压电薄膜为 c 轴倾斜 ZnO。CMOS 集成的读出电路采用 0.35 μm CMOS 工艺制造,电路设计基于专利的阻抗分析技术,核心部分为压控振荡器(VCO),VCO 作为传感器的激励源,可在很宽的频带进行扫频,根据 VCO 的输出获得 FBAR 的阻抗。图中,Me 4 是指 CMOS 工艺中的第 4 层金属。

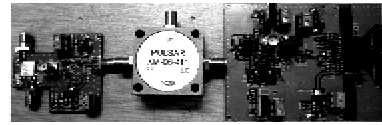


(a) 单片集成的 FBAR 传感器样品  
官能化金属层  
顶电极  
接触线  
压电层  
声反射层  
CMOS 钝化层  
Me 4  
CMOS  
底电极  
钝化  
(b) 集成 FBAR 传感器的横截而示意图  
图 5 单片集成的 FBAR 传感器实例<sup>[23]</sup>

刘兴<sup>[24]</sup>和印显方<sup>[25]</sup>沿用外差式 VNA 复杂架构提出的一种 FBAR 传感器读出电路(见图 6),主要由定向耦合器、接收机、信号前处理和现场可编程门阵列(FPGA)组成,工作原理是检测 FBAR 的反射特性。研制的高频电路、混频器和低频电路 3 个模块,还需结合 PC 机数据采集系统才能实现 FBAR 测试。因此,FBAR 传感器读出电路的集成化必须另辟蹊径。



(a) 基于 VNA 的 FBAR 信号检测实验装置原理框图



(b) 电路实物照片  
图 6 基于 VNA 原理的 FBAR 传感器读出电路

1960 年以来,一直采用外差式网络分析仪自动测量射频/微波器件的散射参数,由于其复杂的电路结构,成本很高且难以满足微型、集成的实用化要求。要解决 FBAR 传感器射频段谐振频率偏移信号读出电路的集成化,必须另辟蹊径。

### 4 FBAR 信号读出的 6 端口反射计方案设想

“6 端口”有 2 个输入端口和 4 个输出端口,基于干涉测量原理工作。1972 年,Engen 等<sup>[26]</sup>最初提出六端口概念时,仅用于简单而精确的功率测量;但很快就在 6 端口反射计的基础上产生了一种新的网络分析仪架构<sup>[27]</sup>。Engen 曾指出,缺乏足够的计算能力是 6 端口技术的一个主要问题。随着现代数字技术(如 DSP、FPGA 等)的发展,这一桎梏已打破。2010 年,Koelpin 等<sup>[28]</sup>曾预言,6 端口技术将在现代社会的测量和通信应用中发挥重要的作用。由于六端口网络具有特别大的带宽、能实现多频带/多模式等优点,近年来更被认为是实现软件无线电(SDR)的最佳方案之一<sup>[29]</sup>。

6 端口反射计的工作原理如图 7 所示。待测器件(DUT)信号的透射分量和反射分量通过定向耦合器 D 进入无源 6 端口的输入端口 P<sub>1</sub> 和 P<sub>2</sub>,六端口中的 3 个正交混合耦合器实现移相和 4 组不同相对相位差(0、π/2、π 和 3π/2)信号的相干并进入输出端口 P<sub>3</sub>~P<sub>6</sub>,再由工作在检波或混频(MIX)模式的二极管电路(功率计)直接下变频得到 4 个基带信号(B<sub>3</sub>~B<sub>6</sub>),由此在数字域重构出复反射系数的幅度和相位。在六端口基础上发展起来的 8 端口、10 端口网络,还具有测量反射系数和传输系数的功能。

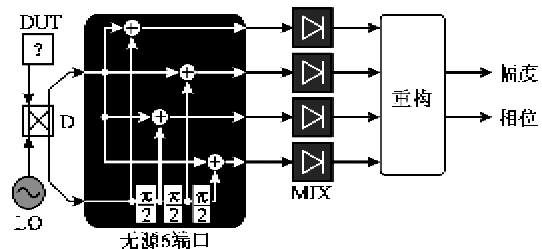


图 7 6 端口反射计的工作原理<sup>[29]</sup>

6 端口是结构简单的无源装置,特别适合单片

微波集成电路(MMIC)、低温共烧陶瓷(LTCC)等方式的单片集成。集成六端口始于 1992 年<sup>[30-31]</sup>。图 8 为一个 1.5 GHz 六端口反射计的 MMIC 实例<sup>[32]</sup>,芯片尺寸仅 2.2 mm<sup>2</sup>。

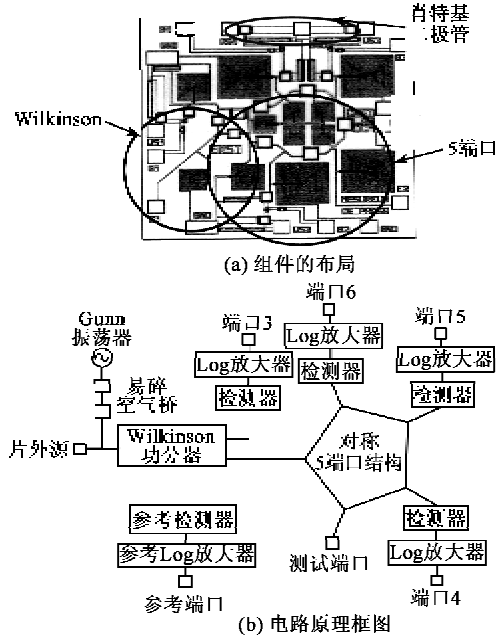


图 8 6 端口反射计 MMIC 实例

CMOS 微波集成 6 端口(见图 9)是 FBAR 传感器硅基单片集成的首选方案。与 GaAs 微波集成技术相比,CMOS 微波集成技术具有工艺成熟,成本较低,易于系统集成等优点。CMOS 微波集成技术在微波频段的应用已扩展到 10 GHz 以上<sup>[33]</sup>,正好覆盖了 FBAR 的工作频率。

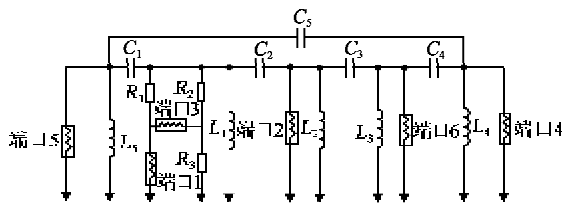
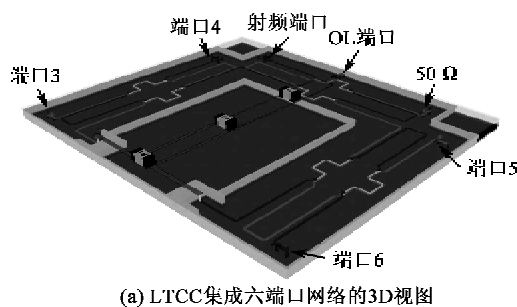
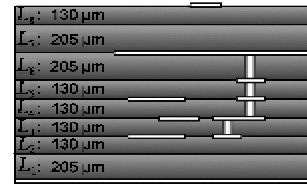


图 9 CMOS 微波集成 6 端口网络的电路结构

采用 8 层 DuPont-951 衬底(L<sub>1</sub>~L<sub>8</sub> 共 8 层)实现的 LTCC 集成 6 端口接收机如图 10 所示<sup>[29]</sup>,由



(a) LTCC 集成 6 端口网络的 3D 视图



(b) LTCC 分层结构示意图

图 10 6 端口网络的 LTCC 实例

90°混合耦合器、Wilkinson 功分器和六端口网络组成,工作频率在 1.5~6.5 GHz,尺寸仅为 25 mm×28 mm×1.27 mm<sup>[26]</sup>。

### 5 结束语

FBAR 的优点及其在电信工业滤波器中的成功应用,推动了 FBAR 技术持续 20 多年的发展和积累;在传感器/换能器中的应用,将赋予 FBAR 技术射频应用外更广阔的空间,有望开创一个全新的高性能传感器领域。

本文在文献综述的基础上,提出了以下观点:FBAR 是实现高灵敏度传感器和谐振式传感器的一种理想技术;不依赖网络分析仪、易与表头集成的射频信号读出电路实现,已成为 FBAR 传感器集成化、实用化的一个共性瓶颈问题;结构简洁、低成本、易于单片集成的六端口反射计能够满足 FBAR 传感器射频信号读出的要求。

本文提出了采用六端口反射计实现 FBAR 换能器的射频频率偏移信号读出、基于 MMIC 或 LTCC 工艺制备的六端口网络构建集成 FBAR 传感器的原创设想,对相关工作具有重要的指导意义。

### 参考文献:

- [1] LAKIN K M, WANG J S. Acoustic bulk wave composite resonators [J]. Applied Physics Letters, 1981, 38 (3): 125-127.
- [2] BRADLEY P, RUBY F, LARSON J D, et al. A film bulk acoustic resonator (FBAR) duplexer for USPCS handset applications [C]//S. I. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2001, 1: 367-370.
- [3] 张亚非, 陈达. 薄膜体声波谐振器的原理、设计和应用 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.
- [4] WINGQVIST G. AlN-based sputter-deposited shear mode thin film bulk acoustic resonator (FBAR) for biosensor applications—A review [J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205 (5): 1279-1286.
- [5] TANIGUCHI S, YOKOYAMA T, IWAKI M, et al. An air-gap type FBAR filter fabricated using a thin sacrificed layer on a flat substrate [C]//S. I. Proceedings of the 2007 IEEE Ultrasonics Symposium, 2007: 600-603.

- [6] 张亚非,陈达. 多层膜集成结构体声波谐振器 [M]. 上海:上海交通大学出版社,2012:125-149.
- [7] GABL R, FEUCHT H D, ZEININGER H, et al. First results on label-free detection of DNA and protein molecules using a novel integrated sensor technology based on gravimetric detection principles [J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2004; 19(6): 615-620.
- [8] GARCÍA-GANCEDO L, MILNE W I, LUO J K, et al. Sensors based on SAW and FBAR technologies [C]// S. I.; Proc SPIE 8793, Fourth International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering, 2013.
- [9] BENETTI M, CANNATA D, AMICO A D, et al. Thin film bulk acoustic wave resonator (TFBAR) gas sensor [C]//S. I.; Proceedings of the 2004 IEEE Ultrasonics Symposium, 2004; 1581-1584.
- [10] CAMPANELLA H, ESTEVE J, MONTSERRAT J, et al. Localized and distributed mass detectors with high sensitivity based on thin-film bulk acoustic resonators [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(3): 33507-33507.
- [11] ZHANG Hao. Micromachined bulk acoustic resonators for radio-frequency systems and biochem mass sensing [D]. University of Southern California, 2006.
- [12] JAN W, MATHIAS L, ROBERT P, et al. High frequency viscosity sensing with FBARs [C]//S. I.; Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2007; 117-122.
- [13] LIN Anderson, YU Hongyu, WATERS M S, et al. Explosive trace detection with FBAR-based sensor [C]//S. I.; Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2008; 208-211.
- [14] QIU X, ZHU J, OILER J, et al. Film bulk acoustic-wave resonator based ultraviolet sensor [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 94(15): 151917/1-3.
- [15] WANG Ziyu, QIU Xiaotun, JON Oiler, et al. Film Bulk Acoustic-wave Resonator (FBAR) based infrared sensor [C]//S. I.; Proceedings of the 2010 IEEE 5th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2010; 824-827.
- [16] JONATHON O, QIU Xiaotun, ZHU Jie, et al. Film bulk acoustic-wave resonator based radiation sensor [C]//S. I.; Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2010; 967-970.
- [17] OILER J, QIU X, ZHU J, et al. The sensitivity enhancement for the radiation sensor based on film bulk acoustic-wave resonator [C]//S. I.; Proceedings of the 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2011; 2058-2061.
- [18] 杨志周. 具有声能补偿功能的薄膜体声波生化传感器结构与加工工艺研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2010.
- [19] 陈剑鸣,吕启蒙,吴光敏,等. 分子印迹型薄膜体声波谐振毒品检测传感器 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(9): 2272-2278.  
CHEN Jianming, LV Qimeng, WU Guangmin, et al. Molecularly imprinted sensor integrated with thin-film bulk acoustic resonator for drug detection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(9): 2272-2278.
- [20] HE X L, GARCIA-GANCEDO L, JIN P C, et al. A single FBAR-based temperature and pressure sensors [J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 562/565: 188-191.
- [21] 吕启蒙,吴光敏,楚合群,等. 基于微流体技术的FBAR微质量传感器 [J]. *压电与声光*, 2013, 35(5): 686-689.  
LV Qimeng, WU Gangmin, CHU Hequn, et al. Film bulk acoustic resonator mass sensor based on microfluidics technology [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2013, 35(5): 686-689.
- [22] CAMPANELLA H, PLAZA J A, MONTSERRAT J, et al. High-frequency sensor technologies for inertial force detection based on thin-film bulk acoustic wave resonators (FBAR) [J]. *Microelectronic Engineering*, 2009, 86(4/6): 1254-1257.
- [23] TUKKINIEMI K, RANTALA A, NIRSCHL M, et al. Fully integrated FBAR sensor matrix for mass detection [J]. *Procedia Chemistry*, 2009, 1: 1051-1054.
- [24] 刘兴. 具有主动控制功能的薄膜体声波传感器扫频激励源研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2011.
- [25] 印显方. 基于FPGA的FBAR传感器信号检测与处理电路研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [26] ENGEN G, HOER C. Application of an arbitrary 6-port junction to power-measurement problems [C]//S. I.; *IEEE Trans Instrum Meas*, 1972, IM-21(4): 470-474.
- [27] ENGEN G. The six-port reflectometer; An alternative network analyzer [C]//S. I.; *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1977, 25(12): 1075-1080.
- [28] KOELPIN A, VINCI G, LAEMMLE B, et al. The six-port in modern society [J]. *Microwave Magazine*, IEEE, 2010, 11(7): 35-43.
- [29] MORENA-ALVAREZ-PALENCIA C de la, BURGOS-GARCIA M, GISMERO-MENOYO J. Contribution of LTCC technology to the miniaturization of six-port networks [C]//S. I.; Proceedings of the 41st European Microwave Conference, 2011; 659-662.

(下转第196页)