

# 薄膜体声波传感器的有限元仿真与分析

马晓鑫<sup>1,2</sup>, 苏淑靖<sup>1,2</sup>, 耿子惠<sup>3</sup>, 吴永盛<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室,

山西 太原 030051; 3. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:** 薄膜体声波滤波器(FBAR)传感器的性能受结构和材料特性的影响很大。该文利用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件, 建立了 FBAR 传感器的二维、三维有限元结构模型。用氮化铝和氧化锌材料作为压电薄膜对建立的模型做了固体力学和静电学仿真分析, 得到了 FBAR 传感器的谐振频率、导纳特性曲线和谐振频率处的位移分布情况。通过分析发现氮化铝压电薄膜阻抗特性曲线更平滑, 而氧化锌压电薄膜存在明显的寄生谐振峰的问题。针对氧化锌压电薄膜存在的寄生谐振峰进行了优化, 仿真分析了电极边长尺寸和电极厚度对寄生谐振的影响, 实现了对寄生谐振峰的有效抑制。

**关键词:** 薄膜体声波滤波器; 传感器; 有限元仿真; 谐振频率; COMSOL Multiphysics

中图分类号: TN384 文献标识码: A

## Finite Element Simulation and Analysis of Thin Film Bulk Acoustic Sensor

MA Xiaoxin<sup>1,2</sup>, SU Shujing<sup>1,2</sup>, GENG Zihui<sup>3</sup>, WU Yongsheng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Key Laboratory of

Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The performance of the thin film bulk acoustic (FBAR) sensor is greatly influenced by the structure and material properties. In this paper, the finite element simulation software of COMSOL Multiphysics is used to establish the 2D and 3D finite element model of FBAR sensor. The solid mechanics and electrostatics simulation analysis are carried out by using the aluminum nitride and Zinc Oxide piezoelectric thin film materials as the model, and the displacement distribution of the resonant frequency, the admittance curve and the resonant frequency of FBAR sensor. Through the analysis, it is found that the impedance characteristic curve of AlN thin film is smoother and the resonant frequency is higher, but there is a problem of parasitic resonance peak in the Zinc Oxide piezoelectric film. The parasitic resonance peak in the piezoelectric film of Zinc Oxide is optimized, the influence of electrode size and electrode thickness on parasitic resonance is analyzed, and the effective suppression of parasitic resonance peak is achieved. It provides a reliable theoretical basis for the application of thin film bulk acoustic sensor.

**Key words:** FBAR; sensor; FEM; resonant frequency; COMSOL Multiphysics

## 0 引言

随着薄膜与微纳制造技术的快速发展, 薄膜体声波滤波器(FBAR)在通信领域获得了广泛的商业应用。相对于传统的介质谐振器及声表面波(SAW)器件而言, FBAR 具有相对体积小, 插入损耗低, 工作频率高, 品质因数高等优点, 被认为是新一代无线通信系统和超微量生化检测领域内最具发展前景的器件之一<sup>[1]</sup>。

FBAR 传感器可得到很高的分辨率和灵敏度, 且通过测量 FBAR 传感器的谐振频率便可知待测物理量大小, 具有易于得到测量结果的优点。另外, FBAR 传感器能够兼容集成电路工艺, 可以在同一芯片中集成传感模块与读出电路模块, 从而能实现在恶劣环境中的传感测量或应用于无线传感网络系统中<sup>[2-3]</sup>。

目前, 国内外对 FBAR 传感器的研究日益增

收稿日期: 2017-02-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675493)

作者简介: 马晓鑫(1992-), 男, 山西太原人, 硕士生, 主要从事薄膜体声波传感器的研究。E-mail: bill\_bb\_hanks@hotmail.com。通信作者: 苏淑靖(1971-), 副教授, 博士, 主要从事测试系统集成、感知与探测的研究。E-mail: sushujing@nuc.edu.cn。

多。2008年,K. Tukkiemi 等研究了 FBAR 阵列的微质量传感器<sup>[4]</sup>;2009年,X. Qiu 研究了 FBAR 紫外线传感器<sup>[5]</sup>;2010年,Ziyu Wang 等报道了 FBAR 在红外传感器方面的研究成果<sup>[6]</sup>。相比于国外研究机构的研究成果,国内对 FBAR 传感器的研究仍处于起步阶段,很多研究工作主要集中在结构优化和材料选择上,指标与世界先进水平相比差距明显。

本文采用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件,对 FBAR 传感器的有限元模型进行了仿真分析。通过对比两种压电薄膜材料,分析了不同压电材料对 FBAR 性能的影响。最后,针对氧化锌(ZnO)压电薄膜存在的寄生谐振峰进行了优化,仿真分析了电极边长尺寸和电极厚度对寄生谐振的影响。

## 1 薄膜体声波传感器的基本原理

根据在 FBAR 中声波传播模式的不同,可将 FBAR 传感器分为纵波模式 FBAR 和剪切波模式 FBAR。理想的纵波模式 FBAR 传感器主要由上、下电极和中间的压电薄膜组成(见图1)。图中, $E$ 为交变电场, $C$ 为纵向声波。当上、下电极间加以交变电场时,压电薄膜内会激发起沿厚度方向极化的纵向声波,在压电薄膜内形成驻波振荡。压电薄膜通过压电效应和逆压电效应完成电信号与声信号之间的相互转变;上、下电极与 CMOS 读出电路模块连接完成电信号的输出<sup>[7]</sup>。

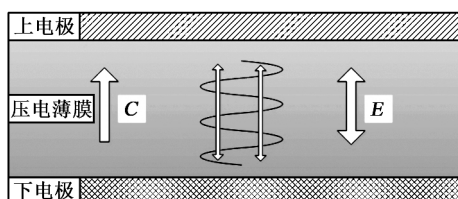


图1 纵波模式 FBAR 传感器振动模式

当 FBAR 传感器受到外界作用时,压电薄膜的弹性模量变化较密度更明显,导致体声波在压电薄膜中的传播速度发生变化,进而使 FBAR 传感器的谐振频率发生变化。根据 Sauerbrey 方程可知,FBAR 传感器的谐振频率变化与其加载的微小载荷呈线性关系<sup>[7]</sup>。因此,通过测量 FBAR 传感器谐振频率的变化便可计算出待测物理量的大小。

机电耦合系数和谐振频率可用来表征 FBAR 传感器的性能。等效机电耦合系数定义为

$$K_{\text{eff}}^2 = \frac{\pi^2}{4} \left( \frac{f_p - f_s}{f_p} \right) \quad (1)$$

式中: $f_s$ 为串联谐振频率; $f_p$ 为并联谐振频率。等

效机电耦合系数表示  $f_s$  与  $f_p$  的距离,即反应了带宽的大小<sup>[8]</sup>。

谐振频率与压电薄膜厚度的关系为

$$v_p = h \cdot f \quad (2)$$

式中: $v_p$ 为声波相速度; $h$ 为压电薄膜的厚度; $f$ 为谐振频率。在压电薄膜厚度相同的情况下, $v_p$ 越大, $f$ 也越高。

## 2 薄膜体声波传感器的仿真

### 2.1 有限元建模仿真

本文的 FBAR 传感器采用了空气隙型结构。此结构使用硅表面工艺在硅片的上表面形成一个空气间隙,以限制声波在压电振荡堆内。这种结构不但可以很好地将声波限制于压电层内,获得很高的品质因数(Q)值,且因采用了硅表面工艺,与硅片背面刻蚀型相比,机械牢固度相对更稳定<sup>[9-12]</sup>。空气隙型 FBAR 传感器的结构示意图如图2所示。该结构由上电极、压电薄膜、下电极、支撑层及硅衬底构成。其中,支撑层的设置可以有效地增强 FBAR 传感器的结构强度。

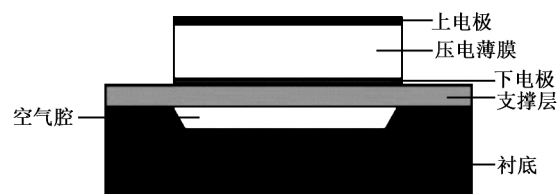


图2 空气隙型 FBAR 结构示意图

仿真 FBAR 传感器的步骤分为:

- 1) 建立 FBAR 传感器敏感单元的几何结构。
- 2) 设置材料及边界条件。
- 3) 划分网格。
- 4) 设置仿真扫频范围并进行仿真。

在 COMSOL Multiphysics 中绘制 FBAR 传感器敏感单元的几何结构。几何结构由上、下电极,压电层和支撑层构成。选择钼(Mo)作为上、下电极材料,氮化铝(AlN)作为压电层材料,氮化硅( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )作为支撑层材料。各膜层的材料及厚度如表1所示。

表1 传感器各膜层的材料及厚度

结构	顶电极	压电层	底电极	支撑层
材料	Mo	AlN	Mo	$\text{Si}_3\text{N}_4$
厚度/ $\mu\text{m}$	0.2	1.6	0.2	0.6

绘制完成 FBAR 传感器敏感单元的结构后,对各膜层设置材料并添加材料属性参数,如表2<sup>[13]</sup>所示。AlN 和 ZnO 压电薄膜的介电常数矩阵( $\epsilon^S$ )、压

电应力常数矩阵( $e$ )和弹性常数矩阵( $c^E$ )如表3<sup>[14-15]</sup>所示。在确定了尺寸和材料后,再对几何结构设置边界条件。边界条件的设定分为固体力学场和静电场两部分。固体力学场的边界条件为结构的左、右边的固定约束,使边界处的电压为0且无变形;静电场的边界条件为上电极施加1 V电压,下电极接地。

表3 两种压电薄膜的材料参数

材料	$\epsilon^S$	$e/(C \cdot m^{-2})$	$c^E/GPa$
AlN	$\begin{bmatrix} 9.21 & 0 & 0 \\ 0 & 9.21 & 0 \\ 0 & 0 & 10.26 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.58 \\ 0 & 0 & -0.58 \\ 0 & 0 & 1.55 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.48 & 0 \\ -0.48 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 397 & 143 & 112 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 397 & 143 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 372 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 116 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 116 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 125 \end{bmatrix}$
ZnO	$\begin{bmatrix} 8.33 & 0 & 0 \\ 0 & 8.33 & 0 \\ 0 & 0 & 8.81 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.62 \\ 0 & 0 & -0.62 \\ 0 & 0 & 0.96 \\ 0 & -0.37 & 0 \\ 0 & 0 & -0.37 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 207 & 117.7 & 106.1 & 0 & 0 & 0 \\ 106.1 & 207 & 106.1 & 0 & 0 & 0 \\ 106.1 & 106.1 & 209.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 44.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 44.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 44.6 \end{bmatrix}$

由于各膜层厚度与结构尺寸的差距较大,为了便于观察和计算,故对结构设置了完美匹配层(PML)。在利用 COMSOL Multiphysics 进行有限元模型仿真前,还需对结构进行映射网格剖分。网格剖分的疏密程度直接影响仿真的结果。因此,设置网格要兼顾计算量和精度。设置的网格值不影响仿真结果时即视为合适的网格大小。二维结构网格划分图如图3所示。三维结构网格划分图如图4所示。

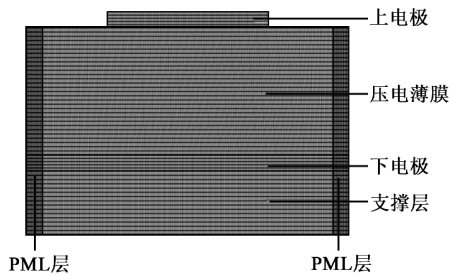


图3 二维结构网格划分图

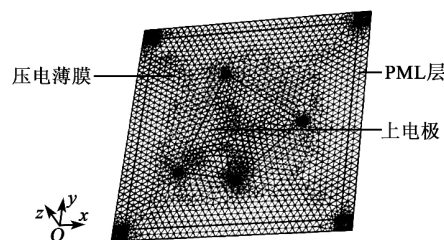


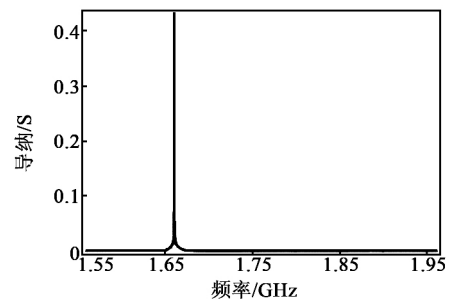
图4 三维结构网格划分图

完成结构网格划分后,在频域的研究中完成设置仿真扫频范围,然后进行有限元仿真计算分析。

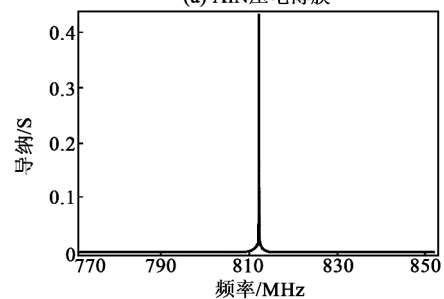
表2 材料属性

材料	密度/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	相对介电常数	纵波声速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	声学损耗/ ( $dB \cdot m^{-1}$ )
AlN	3 250	300	9.5	11 350	800
$Si_3N_4$	3 180	45	9.7	11 000	N/A
Si	2 330	185	11.9	N/A	N/A
ZnO	5 680	350	8.7	6 340	2 500
Mo	10 200	280	N/A	6 213	500

仿真过程中,为了得到更精确的结果,可以通过加大频域的搜索范围来获取特征频率值。经过仿真计算,可以得到该 FBAR 传感器的导纳特性曲线图,如图5所示。由图可见,AlN 薄膜、ZnO 薄膜 FBAR 传感器的特征频率分别为 1.661 GHz、812.5 MHz。



(a) AlN压电薄膜



(b) ZnO压电薄膜

图5 导纳特性曲线图

为了验证在特征频率下 FBAR 传感器结构的可行性,分别对两种 FBAR 传感器结构做形变位移

分析。在得到导纳特性曲线图及特征频率后,对特征频率研究进行仿真扫频范围设置,并进行有限元仿真计算。先使用较大步长间隔进行扫频,并在导纳特性曲线的极大值附近加密频率间隔,再次计算以得到更接近共振点的形变位移分布。通过计算可得 AlN 薄膜 FBAR 传感器在特征频率为 1.661 GHz 时,ZnO 薄膜 FBAR 传感器在特征频率为 812.5 MHz 时的形变位移分布图,如图 6 所示。

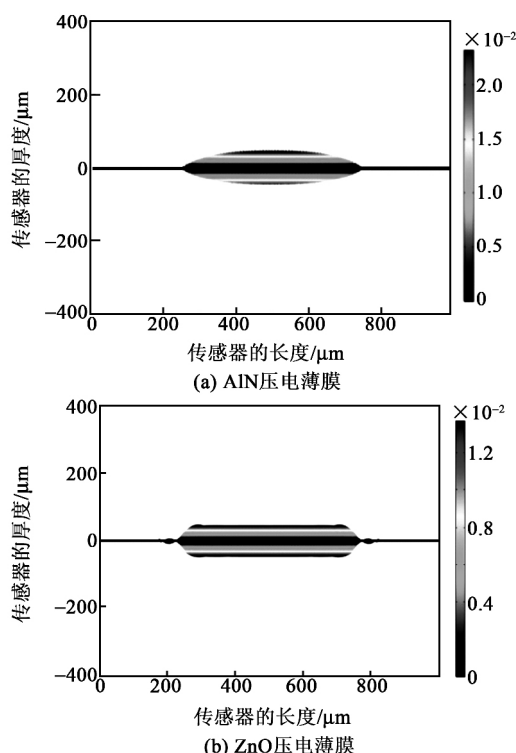


图 6 形变位移分布图

由图 6 可见,在 FBAR 传感器结构中,中心位置的形变位移量最大;由中心向两端延伸,形变位移量逐渐以指数形式递减;在上、下电极重叠部分以外的位置,形变位移量近似为 0。这表明 FBAR 传感器结构的形变位置由上、下电极重叠部分的位置决定。其中,AlN 薄膜、ZnO 薄膜 FBAR 传感器的中心位置最大形变位移分别为  $0.02 \mu\text{m}$ 、 $0.012 \mu\text{m}$ 。由此可见,AlN 薄膜、ZnO 薄膜 FBAR 传感器的最大形变位移量仍处在两种压电薄膜材料的应变范围内,证明了在其特征频率下该传感器结构的可行性。

## 2.2 两种压电薄膜材料 FBAR 的对比分析

对于给定结构和材料的 FBAR 传感器,阻抗特性曲线可以反映 FBAR 传感器的电学阻抗谐振特性。通过对 AlN 压电薄膜、ZnO 压电薄膜 FBAR 传感器进行有限元仿真,计算函数  $\log(\text{abs}(1/(es, Y_{11})))$  后可得到两种压电材料对应 FBAR 传感器的阻抗特性曲线,如图 7 所示。

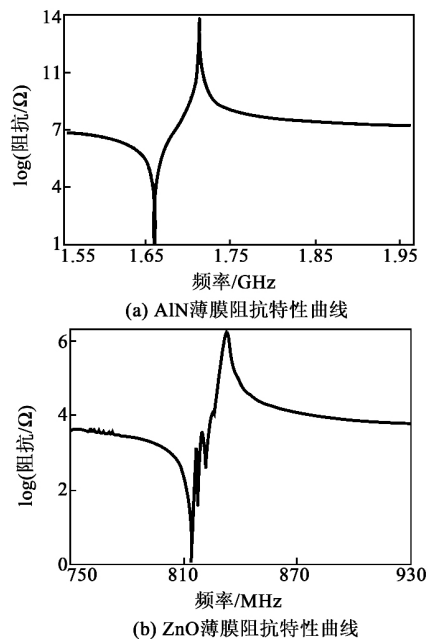


图 7 AlN 薄膜和 ZnO 薄膜仿真对比图

由图 7(a) 可看出,AlN 薄膜 FBAR 传感器的  $f_s = 1.661 \text{ GHz}$ ,  $f_p = 1.717 \text{ GHz}$ ;由图 7(b) 可看出,ZnO 薄膜 FBAR 传感器的  $f_s = 812.5 \text{ MHz}$ ,  $f_p = 833.2 \text{ MHz}$ 。将  $f_s$ 、 $f_p$  值代入式(1)中,计算得到 AlN 薄膜、ZnO 薄膜 FBAR 传感器的机电耦合系数分别为 8.0%、6.1%。由图 7 可见,AlN 薄膜 FBAR 传感器的阻抗特性曲线比 ZnO 压电薄膜的更平滑,寄生谐振峰更小。

根据式(2)可知,在压电薄膜厚度相同的情况下, $v_p$  越大, $f$  也越高。根据表 2 可见,AlN 压电薄膜的纵波声速大于 ZnO 压电薄膜。因此,在压电薄膜厚度相同的 FBAR 传感器结构下,AlN 压电薄膜 FBAR 传感器的谐振频率大于 ZnO 压电薄膜 FBAR 传感器的谐振频率。

针对 ZnO 压电薄膜 FBAR 传感器的阻抗特性曲线存在寄生谐振峰这一现象,进行了仿真实验。仿真分析了 FBAR 传感器的结构,发现 ZnO 薄膜 FBAR 传感器的电极边长尺寸和厚度对寄生谐振有一定的影响。

1) 对电极边长尺寸进行仿真对比实验。设定上电极厚度为  $0.2 \mu\text{m}$  不变,只改变 FBAR 传感器上电极的边长尺寸分别为  $500 \mu\text{m}$  和  $800 \mu\text{m}$ 。由图 8 可看出,随着电极边长尺寸的增大,阻抗特性曲线的寄生谐振峰变得越来越小,曲线也变得更平滑。当电极尺寸达到  $800 \mu\text{m}$ ,寄生谐振峰已逐渐消失,曲线形状变化也很微小。由此可得出结论:ZnO 压电薄膜 FBAR 传感器的电极边长尺寸对寄生谐振有着一定的影响。

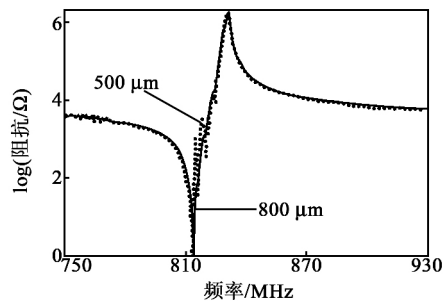


图 8 ZnO 薄膜 FBAR 传感器不同上电极面积仿真对比图

2) 对电极厚度进行仿真对比实验。设定上电极的边长尺寸为  $500\ \mu\text{m}$  不变,只改变 FBAR 传感器的上电极的厚度分别为  $0.15\ \mu\text{m}$  和  $0.2\ \mu\text{m}$ 。由图 9 可看出,随着电极厚度的减小,阻抗特性曲线的寄生谐振峰也变得越小,曲线变得更平滑。当上电极的厚度减小到  $0.15\ \mu\text{m}$ ,寄生谐振峰已基本消失,曲线形状变化很微小。由此可得出结论:ZnO 压电薄膜 FBAR 传感器的厚度对寄生谐振有一定的影响。

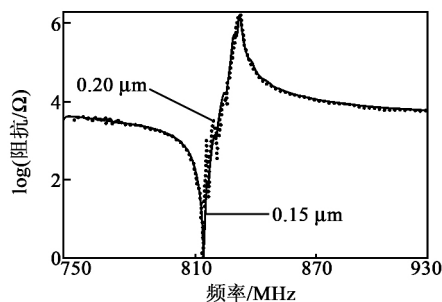


图 9 ZnO 薄膜 FBAR 传感器不同上电极厚度仿真对比图

综合所述,通过两组对比实验可看出在满足 MEMS 工艺要求和 FBAR 传感器结构要求的前提下,应尽可能地把电极设计的边长尺寸做大、电极厚度做薄来提高 FBAR 传感器的性能。

### 3 结束语

本文通过理论计算得到了 FBAR 传感器敏感结构的尺寸,并使用 COMSOL Multiphysics 仿真软件对 FBAR 传感器进行建模仿真分析。首先,通过仿真分析得到该传感器结构的导纳特性曲线及特征频率下 FBAR 传感器的形变位移分布图。形变位移在应变范围内,验证了在该特征频率下 FBAR 传感器的可用性。然后,对比了氮化铝和氧化锌两种材料作为压电薄膜时的阻抗特性曲线,发现氮化铝压电薄膜的阻抗特性曲线比氧化锌压电薄膜的更平滑,寄生谐振峰更小,并获得了更高的谐振频率。最后,针对氧化锌压电薄膜存在的寄生谐振峰进行了优化,仿真分析了电极边长尺寸和厚度对寄生谐振的影响。为下一步 FBAR 传感器的制作和应用研

究提供了可靠的理论基础。

### 参考文献:

- [1] 张亚非,陈达. 薄膜体声波谐振器的原理、设计与应用[M]. 上海:上海交通大学出版,2011.
- [2] 徐航. 基于 FBAR 的微质量传感器的设计及应用技术研究[D]. 中国:上海交通大学,2013.
- [3] 刘世洁. FBAR 温度传感器研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [4] TUKKINIEMI K, RANTALA A, NIRSCHL M, et al. Fully integrated FBAR sensor matrix for mass detection[J]. Procedia Chemistry, 2009;1051-1054.
- [5] QIU X, ZHU J, OILER J, et al. Film bulk acoustic-wave resonator(FBAR) based humidity sensor[C]//S. I.: IEEE International Conference on Nano/micro Engineered and Molecular Systems, IEEE, 2010;967-970.
- [6] WANG Z, QIU X, SHI J, et al. Room temperature ozone detection using ZnO based film bulk acoustic resonator(FBAR) [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2012, 159(1);J13.
- [7] 江敏洪. 薄膜体声波谐振器(FBAR)技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2014.
- [8] 丁扣宝,刘世洁,何兴理. 密封空气型 FBAR 温度传感器[J]. 压电与声光,2012,34(5):649-651.
- [9] 陈艳香,石云波,智丹,等. SiC 高温高量程 MEMS 加速度计传感器的仿真与分析[J]. 传感技术学报,2015, 28(10):1471-1475.
- [10] KIM H Y, KIM K B, CHO S H, et al. Analysis of resonance characteristics of Bragg reflector type film bulk acoustic resonator[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 211;143-147.
- [11] LEE J B, JUNG J P, LEE M H, et al. Effects of bottom electrodes on the orientation of AlN films and the frequency responses of resonators in AlN-based FBARs[J]. Thin Solid Films, 2004, 447/448;610-614.
- [12] LIN Y C, HONG C R, CHUANG H A. Fabrication and analysis of ZnO thin film bulk acoustic resonators [J]. Apply Surface Science, 2008, 254;3780-3786.
- [13] 李侃. FBAR 微质量传感器若干关键问题的研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.
- [14] 何婉婧. FBAR 微加速度计设计[D]. 成都:西南科技大学,2012.
- [15] 姚恒斌,胡芳仁,吴成玲. ZnO 单晶声表面波谐振器传播特性的研究[J]. 压电与声光,2015,37(4):550-553.
- YAO Hengbin, HU Fangren, WU Chengling. Study on propagation characteristics SAW resonator based on ZnO single crystal[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2015, 37(4):550-553.