

文章编号: 2095-4980(2015)02-0337-05

## 薄膜体声波谐振器微加速度计惯性力敏特性

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

(1.西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010; 2.中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999; 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:** 研究了由硅微质量块-悬臂梁惯性力敏结构和氮化铝(AIN)薄膜体声波谐振器(FBAR)检测元件集成的 FBAR 微加速度计表头的惯性力敏特性。采用有限元(FEA)静力学仿真, 得到惯性力载荷作用下硅微悬臂梁上的应力分布; 选取最大应力值作为载荷, 基于第一性原理计算纤锌矿 AIN 的弹性系数与应力的关系式, 预测惯性力载荷作用下 AIN 弹性系数的最大变化量; 采用谐响应分析, 预测 FBAR 微加速度计的加速度-谐振频率偏移特性。分析得到: 惯性力载荷作用下, FBAR 微加速度计的谐振频率向高频偏移, 灵敏度约为数 kHz/g; 其加速度增量-谐振频率偏移特性曲线具有良好的线性度。

**关键词:** 微电子机械系统; 薄膜体声波谐振器; 微加速度计; 力敏特性

**中图分类号:** TN102; TB934 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201502.0337

## Inertial force sensing characteristics of Film Bulk Acoustic wave Resonators micro-accelerometer

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

(1.School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China; 2.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China; 3.National Key Laboratory of Fundamental Science of Micro/Nano-Device and System Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The inertia force sensing characteristics of FBAR(Film Bulk Acoustic wave Resonators) micro-accelerometer sensor are studied, which integrates inertial force sensing structure of silicon micro mass-proof and cantilever beams with AlN(Aluminum Nitride) FBAR detecting elements. The stress distribution of silicon micro supporting beam under the inertia force loads are obtained by applying Finite-Element Analysis(FEA) static simulation. Then the maximum stress value is selected as load, the relationships between elastic coefficient and stress of wurtzite AlN are calculated according to the first principles. Therefore, the maximum variation of AlN elastic coefficient under the inertia force load can be predicted. Next, the micro-accelerometer frequency characteristics and the tendency of FBAR micro-accelerometer are predicated through the analysis of harmonic response. It is concluded that the resonance frequency of FBAR micro-accelerometer shifts to a higher one under an inertial load, with a sensitivity about kHz/g; and there exists a good linearity in the acceleration increment-frequency shift characteristic curve.

**Key words:** MEMS(Micro-Electro Mechanical Systems); Film Bulk Acoustic wave Resonators; micro-accelerometer; force sensing characteristics

薄膜体声波谐振器(FBAR)传感器是近十几年发展起来的一种新型的传感技术, 具有灵敏度高、准数字量输出、便于集成、工作频率高等特点。已有多种 FBAR 传感器见诸文献报道, 如质量<sup>[1]</sup>、紫外线<sup>[2]</sup>、汞离子<sup>[3]</sup>、气体<sup>[4]</sup>和生物<sup>[5]</sup>传感器。FBAR 传感器的基本工作原理是: FBAR 的谐振频率受待测物理量的影响而偏移, 由此可以检出待测物理量。虽然已有多种 FBAR 传感器或换能器见于文献报道, 但 FBAR 力敏特性研究的文献较少。

收稿日期: 2014-06-08; 修回日期: 2014-07-11

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(2012CJMZZ00009); 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(2013MS04); 中物院电子工程研究所科技创新基金(S20141203); 西南科技大学研究生创新基金(13YCJJ31、13YCJJ36)

\*通信作者: 高 杨 email:gaoyang@caep.cn

Campanella 等<sup>[6]</sup>报道了一种基于薄膜体声波谐振器用于惯性力检测的高频传感器(即 FBAR 微加速度计),但没有深入研究其惯性力敏特性。Weber<sup>[7]</sup>与 Chiu<sup>[8]</sup>简要分析了 FBAR 力敏传感器的工作原理,指出 FBAR 谐振频率偏移与纵波传播声速相关,但并没有针对力敏结构与 FBAR 器件集成后的力敏特性进行分析,难以指导 FBAR 力敏传感器的设计。本文以 FBAR 微加速度计的惯性力敏特性为例,提出了一种分析、预测惯性力作用下 FBAR 微加速度计谐振频率偏移特性的新方法。

## 1 FBAR 微加速度计的工作原理

如图 1 所示,FBAR 微加速度计主要由 2 部分组成。第一部分是作为惯性力敏结构的硅微质量块-悬臂梁。第二部分是作为检测元件的 FBAR,位于硅微悬臂梁的根部,作为电声谐振器,其谐振频率随硅微悬臂梁(或 FBAR 中的压电层)的应力变化而偏移,将 FBAR 嵌入悬臂梁中,质量块与悬臂梁的集成结构

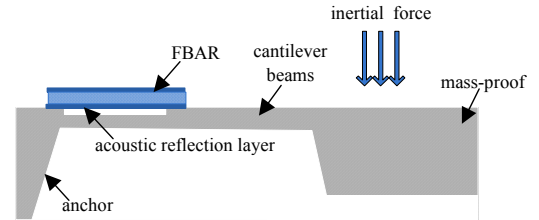


Fig.1 Schematic of FBAR micro-accelerometer  
图 1 FBAR 微加速度计工作原理

参考经典的硅压阻式加速度计,质量块将惯性加速度信号转换为作用于悬臂梁中的应变,再通过集成结构的机械耦合,转换为作用于 FBAR 叠层结构(下电极-压电薄膜-上电极)中压电薄膜的应力。本文所研究的 FBAR,由纤锌矿结构的氮化铝(AIN)作为压电薄膜,工作在纵波模式下。硅微质量块-悬臂梁的惯性检测原理已经很清楚<sup>[9]</sup>,因此,本文的重点是通过有限元谐响应仿真进行应力引起的 FBAR 谐振频率偏移的定量计算分析。

FBAR 的叠层结构由衬底、声学反射层、上下电极和夹在上下电极之间的压电层薄膜构成。FBAR 的基频谐振频率主要由压电薄膜的属性决定,忽略上下电极的影响,可以简单表示为:

$$f = \frac{V_z}{2d} \quad (1)$$

式中:  $V_z$  是声波的纵波传播速度;  $d$  是压电层的厚度。由式(1)可知,FBAR 的谐振频率与其纵波传播速度有关。而理想 FBAR 的纵波声速为<sup>[10]</sup>:

$$V_z = \sqrt{\frac{c_{33} + \frac{e_{z3}^2}{\epsilon_{zz}}}{\rho}} \quad (2)$$

式中:  $c_{33}$ ,  $e_{z3}$  和  $\epsilon_{zz}$  分别为压电薄膜的弹性系数、压电常数和介电常数;  $\rho$  为压电薄膜的密度。

由式(2)知,纵波声速与 FBAR 压电薄膜的材料特性相关。大多数衬底上外延生长的 AIN 具有稳定的纤锌矿结构。由第一性原理可知,应力  $P$  将改变纤锌矿 AIN 晶胞的晶格常数  $a$ 、 $c$  和晶胞内部参数  $\mu$ ,从而改变晶胞体积,导致晶胞总能量发生变化,引起 AIN 压电薄膜弹性系数的改变。

采用 Abinit 等第一性原理计算软件,已经能够以很高的精确度计算纤锌矿结构 AIN 的弹性系数与应力载荷的关系,得到应力作用下的弹性系数-应力特性,如表 1 所示<sup>[11-12]</sup>。

表 1 应力(0~30 GPa)作用下纤锌矿氮化铝弹性系数与应力的二阶拟合多项式

Table1 Second-order polynomial fitting of the numerically calculated pressure (0~30 GPa) dependent elastic constants for Wurtzite AlN

elastic constant/GPa	second-order polynomial fitted in [11]	second-order polynomial fitted in [12]
$c_{11}$	$415+4.16P-0.004P^2$	$397+3.78P-0.009P^2$
$c_{12}$	$128+3.26P+0.017P^2$	$143+2.78P+0.004P^2$
$c_{13}$	$91+3.26P-0.048P^2$	$112+3.34P-0.016P^2$
$c_{33}$	$386+2.06P-0.016P^2$	$372+3.65P-0.066P^2$
$c_{44}$	$96+0.92P-0.057P^2$	$116+0.75P-0.008P^2$

从表 1 可知:二次项系数远小于一次项系数;在一定的应力范围内,弹性系数随应力增大而增大。

根据文献[13-14],纤锌矿结构 AIN 的介电常数和压电常数随应力变化较小,本文只研究弹性系数  $c_{33}$  随应力变化导致的 FBAR 谐振频率偏移。用文献[12]的 AIN 弹性系数  $c_{33}$ -应力拟合式,计算应力作用下的  $c_{33}'$ ,替换式(2)中的  $c_{33}$ ,得到应力作用下的 FBAR 纵波声速  $V_z'$ ;  $V_z'$  代入式(1),得到 FBAR 谐振频率-应力的关系式:

$$f' = \frac{V_z'}{2d} = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{c_{33}' + \frac{e_{z3}^2}{\epsilon_{zz}}}{\rho}} = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{(372 + 3.65P - 0.066P^2) + \frac{e_{z3}^2}{\epsilon_{zz}}}{\rho}} \quad (3)$$

由式(3)可知:应力作用下,AIN 的弹性系数  $c_{33}$  增大为  $c_{33}'$ ,使得纵波声速  $V_z$  增大为  $V_z'$ ,从而导致了纵波模式、纤锌矿结构 AIN FBAR 的谐振频率向高频偏移。

## 2 惯性力敏特性有限元仿真分析

采用 ANSYS12.0 对空载和不同惯性力载荷作用下的 FBAR 微加速度计进行静力学和谐响应仿真分析。首先，对空载条件下 FBAR 微加速度计进行谐响应分析，得到谐振频率曲线；接着，对 FBAR 微加速度计施加惯性力载荷，分析不同惯性力载荷作用下的谐振频率和偏移特性，得出 FBAR 微加速度计的  $\Delta a - \Delta f$  特性曲线。

### 2.1 空载条件下谐振特性仿真

FBAR 谐振频率偏移主要由其压电薄膜的材料特性决定，因此，为简化模型，在 ANSYS 中建立 FBAR 微加速度计模型时忽略了 FBAR 的上、下电极。谐振特性的 FEA 仿真中，FBAR 微加速度计的初始结构参数，如表 2 所示，其中， $\rho$  为密度， $c_{33}$  为弹性系数， $L$ 、 $W$  和  $d$  分别代表长度、宽度和厚度。

表 2 FBAR 微加速度计的初始结构参数

parameter	mass-proof(Si)	cantilever beam(Si)	piezoelectric film(AIN)
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 332	2 332	3 260
$c_{33}/\text{GPa}$	160	160	-
Poisson's ratio	0.22	0.22	-
$L/\mu\text{m}$	1 000	1 000	500
$W/\mu\text{m}$	1 000	100	100
$d/\mu\text{m}$	300	10	2

压电薄膜 AIN 的弹性矩阵，采用文献[12]给出的未受应力作用时的常数值。在设计加速度计结构时，主要参考常用的硅压阻式加速度计的单悬臂梁结构，令 AIN 压电薄膜位于应力最大的悬臂梁根部。

谐响应分析求解前，需要对 FEA 模型施加边界条件和载荷。在压电薄膜的上表面施加 1 V 的耦合电压，下表面施加 0 V 的耦合电压(接地)，扫频范围为 0~3 GHz。谐响应分析后，得到空载条件下 FBAR 微加速度计的阻抗曲线，如图 2 所示。空载时，FBAR 的串联谐振频率约为 1.906 3 GHz，并联谐振频率约为 1.964 3 GHz。

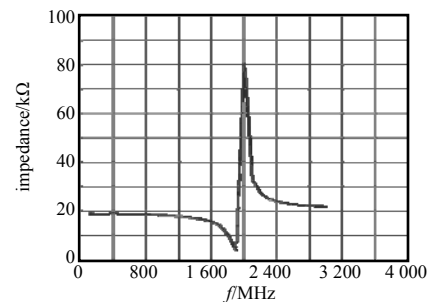


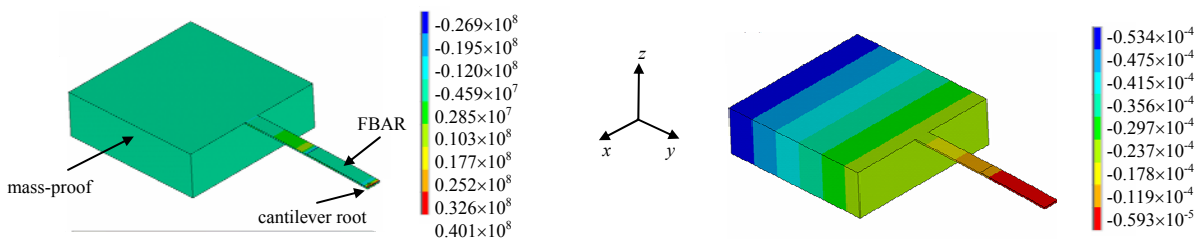
Fig.2 FBAR impedance characteristic curve without load

图 2 空载条件下 FBAR 阻抗特性曲线

### 2.2 惯性力载荷作用下谐振频率偏移特性仿真

当硅微质量块-悬臂梁受到惯性力载荷作用时，质量块运动，在悬臂梁上产生横向(长度或宽度方向)应变，使得集成在悬臂梁上、工作于纵波模式的 FBAR 压电薄膜被拉伸(或压缩)。

根据二次效应， $x$  轴或  $y$  轴方向的应变将导致压电薄膜的厚度改变，在薄膜内产生  $z$  轴方向的应力。根据硅微质量块-悬臂梁结构的 FEA 静力学仿真结果，100 g 惯性力载荷作用下，FBAR 微加速度计沿  $z$  轴方向的应力、应变分布见图 3，位于悬臂梁根部的压电薄膜所受应力最大。



(a) stress distribution at 100 g

(b) strain distribution at 100 g

Fig.3 Static simulation results of the silicon micro mass-cantilever structure

图 3 硅微质量块-悬臂梁结构静力学仿真结果

为了预测 FBAR 谐振频率的偏移量，选取悬臂梁上的最大应力作为整个 FBAR 叠层结构中 AIN 压电薄膜的应力载荷。在 0~400 g 的惯性加速度量程，进行 FBAR 微加速度计的静力学仿真；在 100 g、200 g、300 g 和 400 g 四个典型载荷条件下仿真得到的最大应力值和最大应变值，列于表 3 中。

表 3 惯性力载荷作用下 FBAR 微加速度计的最大应力和最大应变值

Table3 Maximum stress and maximum stain of FBAR under the action of inertial loads				
inertial load/g	100	200	300	400
maximum stress/MPa	40.1	79.4	119	158
maximum displacement/ $\mu\text{m}$	53.4	107	160	213

Si 材料的断裂强度为 0.6 GPa~1.2 GPa<sup>[15]</sup>, 由表 3 知, 惯性力载荷(0~400 g)条件下悬臂梁所受最大应力均远小于 0.6 GPa, 在安全范围内。将 FBAR 微加速度计在 100g 惯性力载荷作用下压电薄膜 AlN 沿  $z$  轴方向的最大应力值带入表 1 中文献[12]给出的弹性系数  $c_{33}$ -应力  $P$  拟合二项式, 得到惯性力载荷作用下 AlN 的弹性系数  $c_{33}'$ 。将 FBAR 微加速度计有限元模型中压电薄膜的弹性系数  $c_{33}$  替换为  $c_{33}'$ , 再次进行谐响应分析。由 2.1 节的分析可知, FBAR 微加速度计例的谐振频率范围为 1.9 GHz~2.0 GHz。为了改善谐振频率的计算精确度并减少计算时间, 设定扫频范围为 1.9 GHz~2.0 GHz, 扫频步数共 300 步, 使输出频率分辨力为 300 kHz 左右。代入不同惯性力载荷致最大应力值所对应的弹性系数  $c_{33}'$ , 得到不同惯性力载荷(100 g, 200 g, 300 g 和 400 g)作用下 FBAR 的阻抗特性曲线, 如图 4 所示。

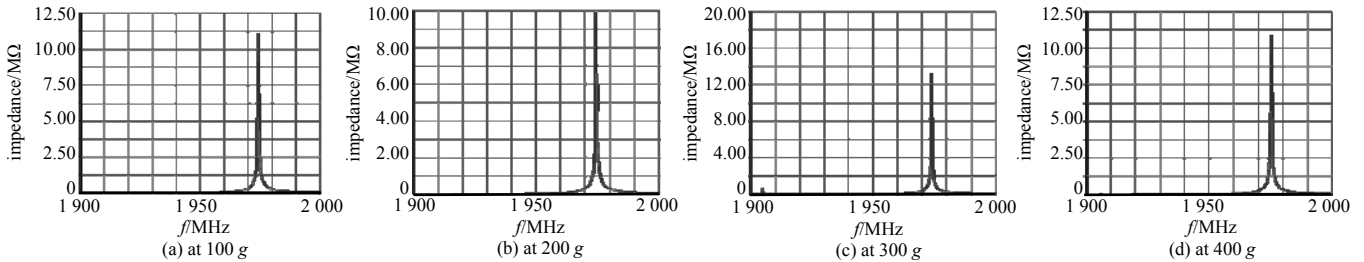


Fig.4 FBAR impedance characteristics curves under different inertial loads (0~400 g)

图 4 不同惯性力载荷(0~400 g)作用下 FBAR 的阻抗特性曲线

由图 4 可知, 不同惯性力作用下, 纵坐标所对应的阻抗最大值不同, 谐振频率发生了偏移。表 4 列出了 0~400 g 惯性力载荷作用下 FBAR 串/并联谐振频率的变化。

表 4 惯性力载荷作用下 FBAR 的谐振频率

inertial load/g	0	100	200	300	400
series resonant frequencies/GHz	1.906 3	1.906 7	1.907 0	1.907 3	1.907 7
parallel resonant frequencies/GHz	1.964 3	1.964 7	1.965 0	1.965 3	1.965 7

由表 4 可知: 惯性力每增加 100 g, FBAR 谐振频率向高频偏移约为 300 kHz~400 kHz; 即算例中的 FBAR 微加速度计的灵敏度约为 3 kHz/g~4 kHz/g。受计算精确度影响, 表 4 中仿真数据的不确定度在 100 kHz。

FBAR 谐振频率向高频偏移, 与节 1 中工作原理分析的结论相符。对不同惯性力载荷作用下的串联谐振频率偏移量进行数据拟合, 得到算例 FBAR 微加速度计的  $\Delta a - \Delta f$  (加速度增量-谐振频率偏移)特性曲线, 如图 5 所示, 具有良好的线性, 其线性拟合公式为:

$$\Delta f = 50 + 3.3\Delta a \quad (4)$$

式中:  $\Delta f$  (kHz)为谐振频率的偏移量;  $\Delta a$  (g)为加速度增量。

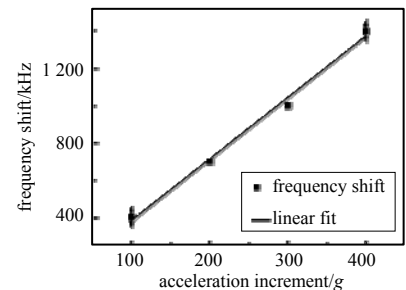


Fig.5 Acceleration increment-frequency shift characteristic curve of the FBAR micro-accelerometer example

图 5 FBAR 微加速度计  $\Delta a - \Delta f$  特性曲线

### 3 结论

本文分析了应力作用下纤锌矿 AlN 薄膜弹性系数改变对 FBAR 谐振频率的影响。仿真结果表明: 惯性力载荷作用下, FBAR 微加速度计的谐振频率向高频偏移, 约为数 kHz/g; 其  $\Delta a - \Delta f$  特性曲线具有良好的线性度。这是因为, 应力作用下, AlN 的弹性系数  $c_{33}$  增大为  $c_{33}'$ , 使纵波传播声速  $V_z$  增大为  $V_z'$ , 从而导致工作在纵波模式、纤锌矿结构 AlN FBAR 的谐振频率向高频偏移。

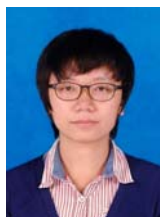
由于本文给出  $c_{33}'$  是根据硅微悬臂梁上应力分布的最大值计算得出, 必然导致 FBAR 微加速度计灵敏度的预测值偏高。另外, 本文算例 FBAR 微加速度计的灵敏度约为数 kHz/g, 比文献[8]的报道要低一个数量级, 其原因可能是因为没有对 FBAR 微加速度计的惯性力敏结构进行参数优化。

### 参考文献:

- [1] Jonhston M L, Kymissis I, Shepard K L. FBAR-COMS oscillator array for mass-sensing applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(6):1042-1047.
- [2] QIU X, ZHU J, Oiler J, et al. Film bulk acoustic-wave resonator based ultraviolet sensor[J]. Applied Physics Letters, 2009, 9(15): 1517-1519.

- [ 3 ] ZHANG Hao. Micromachined bulk acoustic resonators for radio-frequency systems and biochem mass sensing[D]. Los Angeles:University of Southern California, 2006.
- [ 4 ] Benetti M,Cannata D,DAmico A,et al. Thin Film Bulk Acoustic Wave Resonator (TFBAR) gas sensor[C]// 2004 IEEE Ultrasonics Symposium. Montréal,Canada:IEEE, 2004:1581-1584.
- [ 5 ] Gabl R,Feucht H D,Zeiningger 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 and Bioelectronics, 2004,19(6):615-620.
- [ 6 ] Humberto Campanella, José Antonio Plaza, Josep Montserrat, 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.
- [ 7 ] Weber J,Link M,Primig R,et al. Sensor for ambient pressure and material strains using a thin film bulk acoustic resonator[C]// 2005 IEEE Ultrasonics Symposium. Rotterdam,Dutch:IEEE, 2005:1258-1261.
- [ 8 ] Chiu K H,Chen H R,Huang S R S. High-performance film bulk acoustic wave pressure and temperature sensors[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007,46(4):1392-1397.
- [ 9 ] 贺学锋,印显方,杜志刚,等. 悬臂梁压电振动能量采集器的集总参数模型和实验验证[J]. 纳米技术与精密工程, 2012, 10(2):108-112. (HE Xuefeng,YIN Xianfang,DU Zhigang,et al. Lumped-parameter model and experimental verification for cantilevered piezoelectric vibration energy harvester[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2012,10(2):108-112.)
- [10] 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. (ZHANG Yafei,CHEN Da. Film Bulk Acoustic-wave Resonator (FBAR): Principle, Design and Applications[M]. Shanghai,China:Shanghai Jiaotong University Press, 2011.)
- [11] 王焕友. 二元化合物半导体的晶格动力学和热力学性质的第一性原理研究[D]. 长沙:中南大学, 2008. (WANG Huanyou. Lattice dynamics and thermodynamic properties of binary compound semiconductors from first principles study[D]. Changsha,China:Central South University, 2008.)
- [12] Lepkowski S P,Majewski J A,Jurczak G. Nonlinear elasticity in III-N compounds: Ab initio calculations[J]. Physical Review B (Condensed Matter and Materials Physics), 2005,72(24):245201-1-12.
- [13] Wagner J M,Bechstedt F. Pressure dependence of the dielectric and lattice-dynamical properties of GaN and AlN[J]. Physical Review B, 2000,62(7):4526-4534.
- [14] Tsuyoshi Yokoyama,YoshikiIwazaki,Tokihiro Nishihara,et al. Analysis on electromechanical coupling coefficients in AlN-based bulk acoustic wave resonators based on first-principle calculations[C]// Proceedings of the 2012 IEEE Ultrasonics Symposium. Dresden,Saxony,Germany:IEEE, 2012:551-554.
- [15] Yi Taechung,Li Lu, Kim Changjin. Microscale material testing of single crystalline silicon: process effects on surface morphology and tensile strength[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2000,83(1):172-178.

#### 作者简介:



何婉婧(1990-), 女, 四川省绵阳市人, 在读硕士研究生, 研究方向为微电子机械系统(MEMS)及应用.email:hewanjin415@163.com.

高 杨(1972-), 男, 四川省绵阳市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为微电子机械系统(MEMS)、机电引信.

李君儒(1986-), 男, 四川省绵阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微电子机械系统(MEMS)及其应用.

黄振华(1986-), 男, 湖南省娄底市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微电子机械系统(MEMS)及其应用.

蔡 洵(1990-), 男, 湖北省荆州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微电子机械系统(MEMS)及其应用.