文章编号:1004-2474(2018)03-0366-04

# 电极化对 FBAR 应力负载效应影响的分析

张大鹏[1],高 杨[2,3],王宇航[1,3],文数文[1,4]

(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. 核探测与核电子学国家重点实验室(中国科学院高能物理研究所),北京 100049;
4. 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**:基于薄膜体声波谐振器(FBAR)的力学传感器有很大的应用潜力,但其应力负载效应的敏感机理尚不明确。电极化效应可能是应力负载效应的敏感机理之一。为了研究电极化效应对谐振频率的影响,提出了电极化效应的解析模型。首先根据在理想 FBAR 中并联谐振频率与纵波声速的关系,推导出并联谐振频率关于压电层材料参数的表达式;然后根据直流电压主要对 FBAR 的弹性常数和厚度的影响,推导出并联谐振频率与直流电压的关系;最后利用压电效应,得到了力载荷与并联谐振频率的关系。代入数值计算得到并联谐振频率的相对偏移量为+1.003%@400 V,对比测试结果,并联谐振频率的相对偏移量为+0.90%@400 V,验证了模型的正确性。计算了力载荷为 1 mN 时,电极化效应导致谐振频率的偏移量约为 0.5 kHz。对比实验测得的应力负载效应对谐振频率的偏移量最低约为 262 kHz,证明了在应力负载效应中,电极化效应对谐振频率偏移的影响可忽略。

**关键词**:微机电系统;力学传感器;薄膜体声波谐振器;应力负载效应;电极化效应;解析模型

**中图分类号**:TN384;TP212.1;TB552 **文献标识码**:A **DOI**:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.03.015

# Analysis of Effect of Charge Polarization on Stress-load Effect of FBAR

**ZHANG Dapeng[1], GAO Yang[2,3], WANG Yuhang[1,3], WEN Shuwen[1,4]**

(1. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China; 3. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China; 4. National Key Laboratory of Fundamental Science of Micro/Nano-Device and System Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract**: The mechanical sensors based on the thin film acoustic resonator (FBAR) have great potential for application, but the sensitive mechanism of the stress-loading effect is not yet clear. The charge polarization effect may be one of the sensitive mechanisms of the stress-loading effect. An analytical model of the charge polarization effect is proposed to study the effect of the charge polarization effect on the resonant frequency shift. First, the expression of the anti-resonant frequency about the material parameters of the piezoelectric layer is derived according to the relationship between the anti-resonant frequency and the longitudinal wave acoustic velocity in the ideal FBAR. Then according to the influence of the DC voltage on the elastic constants and the thickness of FBAR, the relationship between the anti-resonant frequency and the DC voltage is deduced. Finally, the relationship between the loading force and the charge is obtained by the piezoelectric effect. The relative offset of parallel resonant frequency is +1.003%@400 V from the numerical calculation, and the correctness of model is verified by comparing this result with that of +0.90%@400 V from the experiment. The calculation shows that the offset of the resonant frequency caused by the charge polarization is 0.5 kHz at 1 mN of loading force. The minimum offset of the resonant frequency measured by the contrast experiment is about 262 kHz. It is proved that the effect of the charge polarization effect on the resonance frequency offset is negligible in the stress load effect.

**Key words**: MEMS; mechanical sensor; thin film bulk acoustic wave resonator; stress-loading effect; charge polarization effect; analytical model

**收稿日期**:2017-12-29

**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(61574131);核探测与核电子学国家重点实验室开放课题基金资助项目(2016KF-02);特殊环境机器人技术四川省重点实验室(西南科技大学)开放基金资助项目(14ZXTK01)

**作者简介**:张大鹏(1994-),男,湖北荆州人,硕士生,主要从事微电子机械系统的研究。E-mail:464815837@qq.com。通信作者:高杨(1972-),男,研究员,博士,主要从事微电子机械系统的研究。E-mail:gaoyang@caep.cn。

## 0　引言

随着移动通信技术的发展,基于薄膜体声波谐振器(FBAR)的射频器件(如滤波器、振荡器)的研究与开发越来越受到人们的关注,FBAR 技术也越来越成熟,从而推动了 FBAR 在传感器领域的研究。对 FBAR 传感器研究较多的是 FBAR 微质量传感器,根据 Sauerbrey 方程可知,FBAR 谐振频率的变化与其加载的微小质量呈线性关系[1]。此外,其他方面的 FBAR 传感器也有报道,如 FBAR 粘滞度传感器[2]、FBAR 紫外线传感器[3]、FBAR 温度传感器[4]、FBAR VOC 传感器[5]、FBAR 微加速度计[6]、FBAR 压力传感器[7]等,FBAR 传感器显示出巨大的应用潜力。其中,FBAR 微加速度计和 FBAR 压力传感器属于 FBAR 力学传感器一类,在已报道的 FBAR 力学传感器的研究中普遍存在一个问题——FBAR 的敏感机理尚不明确。2005 年,Weber 等[7]将 FBAR 谐振频率偏移的原因概括为 3 种机理:应力导致压电薄膜厚度的变化、应力导致压电薄膜密度的变化和应力导致压电薄膜的弹性常数的变化。2007 年,Campanella 等[6]提出 FBAR 谐振频率偏移的原因为电极化现象——由于压电效应,FBAR 受到应力时,压电层会产生电荷位移,相当于在 FBAR 上增加了额外的直流偏置,从而导致谐振频率偏移。Campanella 等只提出了电极化效应,但并没有深入分析,也并未建立预测模型。2017 年,赵俊武[8]提出了 FBAR 力学传感器的敏感机理为应力负载效应,即当 FBAR 受到应力(应变)时,FBAR 的谐振频率会发生偏移,但并没有研究应力负载效应中电极化效应对 FBAR 谐振频率的影响。

本文针对 AlN 薄膜的 FBAR,建立了直流电压与并联谐振频率的相对偏移量的关系,进一步得到了力载荷与并联谐振频率的关系,并对比相关文献的测试结果,验证了模型的正确性,讨论了电极化效应对谐振频率偏移的影响。

## 1　原理

FBAR 属于压电器件,当 FBAR 受到外力作用时,由于压电效应,FBAR 中的压电材料(也就是压电层)内部的电偶极距会因为外部施加的力发生变化,从而产生极化,进而导致压电材料的两个表面出现符号相反的束缚电荷,且其电荷密度与外力成正比(见图 1(b)),相当于在 FBAR 的上下电极上施加了额外的直流电压(见图 1(c)),使得 FBAR 的谐振频率发生偏移。这种因外力导致 FBAR 电荷极化,从而使得谐振频率发生偏移的效应称为电极化效应。电极化效应属于应力负载效应的其中一种机理。电极化效应主要是通过压电层的弹性常数和厚度变化来改变谐振频率[9],其中压电层弹性常数是主要的影响因素。

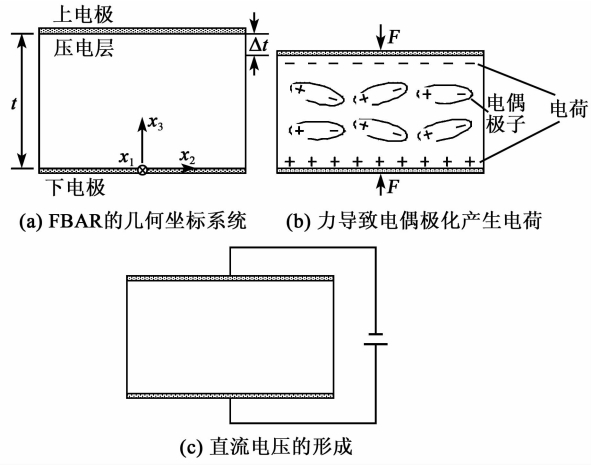



图 1　电极化效应示意图

## 2　方法

本文研究的理想 FBAR 是一层压电薄膜夹于两层极薄的完纯导体电极之间的三明治状结构,采用 $c$ 轴取向的 AlN 作为压电薄膜,电极的厚度、质量和刚度均可忽略。完美的 $c$ 轴取向保证了 AlN 的极化方向为厚度方向,且压电层的厚度远小于其长度和宽度,因此可作为厚度方向的一维问题处理。模型的建立并没有考虑损耗,包括压电薄膜的介质损耗和机械损耗等。

在 AlN 作为压电层的理想 FBAR 中,沿晶轴 $c$(即 $x_3$ 方向)传播的纵波声速 $v$ 为

$$v=\sqrt{\frac{c_{33}+e_{z3}^2/\varepsilon_{33}}{\rho}} \tag{1}$$

式中:$c_{33}$ 为压电层的弹性常数分量;$e_{z3}$ 为压电层的压电应力常数分量;$\varepsilon_{33}$ 为压电层的介电常数分量;$\rho$ 为压电层的密度。

FBAR 的并联谐振频率(基频)$f_{\mathrm{p}}$ 为

$$f_{\mathrm{p}}=\frac{v}{2t}=\frac{\sqrt{(c_{33}+e_{z3}^2/\varepsilon_{33})/\rho}}{2t} \tag{2}$$

式中 $t$ 为 AlN 压电层的厚度。当直流偏置作用于 AlN 薄膜的 FBAR 时,AlN 压电层的弹性常数是导

致 FBAR 谐振频率偏移的主要因素，其次是厚度和密度。$\frac{e_{z3}^2}{\varepsilon_{33}}$ 项的变化量远小于的 $c_{33}$ 变化量，可以忽略[10]。因此，式(2)可简化为

$$f_p = \frac{\sqrt{\frac{c_{33}}{\rho}}}{2t} = \frac{\sqrt{\frac{c_{33} \cdot At}{m}}}{2t} = \sqrt{\frac{c_{33}A}{4mt}} \tag{3}$$

式中：$m$ 为 AlN 压电层的质量；$A$ 为 AlN 压电层的面积。由式(3)可以发现，密度的变化实际上是由于厚度的变化而产生的。

对式(3)两边进行微分，得到

$$\frac{\mathrm{d}f_p}{f_p} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mathrm{d}c_{33}}{c_{33}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\mathrm{d}t}{t} \tag{4}$$

式中：$\mathrm{d}f_p/f_p$ 为并联谐振频率的相对偏移量；$\mathrm{d}c_{33}/c_{33}$ 为弹性常数的相对变化量；$\mathrm{d}t/t$ 为厚度的相对变化量。

弹性常数的相对变化量可以利用 Helmholtz 自由能求得[9]。Helmholtz 自由能 $F_{AlN}$ 的自变量为电位移 $D$ 和应变 $S$，可以写为 $F_{AlN}(D,S)$。由于忽略了剪切效应，面内应变 $S_1$ 和 $S_2$ 均为 0，只有面外应变 $S_3$ 不为 0。求得压电层的弹性常数 $c$ 与点位移的关系为

$$c = c_0 + 2\left(N + \frac{Rh_0}{c_0}\right)D_{dc} \tag{5}$$

式中：$c_0$ 为没有直流偏置时初始状态下的弹性常数；$h_0$ 为压电系数；$N$ 为电致伸缩系数；$R$ 代表了刚度的非线性变化；$D_{dc}$ 为直流偏移导致的电位移。通过对 AlN 薄膜的 FBAR 测试，并在 Mason 模型中拟合 FBAR 的串、并联谐振点[9]，得到 $a = N + \frac{Rh_0}{c_0} = 1.38 \times 10^{11}\ \mathrm{N/C}$。只考虑厚度方向，将 $D_{dc} = \varepsilon_{33} \cdot E_{dc} = \frac{\varepsilon_{33}U_{dc}}{t}$ 代入式(5)并微分，得到弹性常数的相对变化量

$$\frac{\mathrm{d}c_{33}}{c_{33}} = 2a\frac{\varepsilon U_{dc}}{c_{33}t} \tag{6}$$

因压电效应导致面外应变，有

$$\frac{\mathrm{d}t}{t} = d_{33}E_{dc} = d_{33}\frac{U_{dc}}{t} \tag{7}$$

式中：$d_{33}$ 为压电层的压电应变常数分量；$U_{dc}$ 为直流偏置电压；$E_{dc}$ 为直流偏置下的电场强度。将式(6)、(7)代入式(4)中，得到

$$\frac{\mathrm{d}f_p}{f_p} = \frac{U_{dc}}{t}\left(\frac{a\varepsilon_{33}}{c_{33}} - \frac{d_{33}}{2}\right) \tag{8}$$

由式(7)可以发现，当 FBAR 上施加正向直流偏移时，AlN 的厚度会增加，使得谐振频率向下偏移。弹性常数对谐振频率的影响大于厚度对谐振频率的影响。因此，当施加正向直流偏置时，FBAR 的谐振频率会向上偏移，厚度会抵消一部分弹性常数对谐振频率的影响。

根据压电效应，电荷 $Q = d_{33}F$，得到电压 $U_{dc}$ 与力载荷 $F$ 之间的关系：

$$U_{dc} = \frac{Q}{C} = \frac{d_{33}t}{\varepsilon_{33}A} \cdot F \tag{9}$$

式中 $C$ 为电容。

将式(9)代入式(8)中，得到力载荷 $F$ 与 $\mathrm{d}f_p/f_p$ 的关系：

$$\frac{\mathrm{d}f_p}{f_p} = \left(\frac{a}{c_{33}} - \frac{d_{33}}{2\varepsilon_{33}}\right)\frac{d_{33}}{A} \cdot F \tag{10}$$

## 3 结果与讨论

压电层 AlN 的材料常数 $a = 1.38 \times 10^{11}\ \mathrm{N/C}$，$\varepsilon_{33} = 9.5 \times 10^{-11}\ \mathrm{F/m}$，$c_{33} = 3.9 \times 10^{11}\ \mathrm{N/m^2}$，$d_{33} = 4.53 \times 10^{-12}\ \mathrm{m/V}$[11]。

### 3.1 模型验证

在文献[9]中，FBAR 的厚度为 1.25 μm。根据式(8)可以得到直流电压与并联谐振频率相对偏移量的曲线图，如图 2 中的实线部分。图 2 中的虚线部分为根据文献[9]报道的测试结果得到的直流电压与并联谐振频率相对偏移量的曲线图。当给 FBAR 施加的直流电压从 −200 V 变化到 +200 V 时，并联谐振频率的相对偏移量为 +1.003%@400 V，接近于报道的测试结果 +0.90%@400 V，验证了式(8)的正确性。

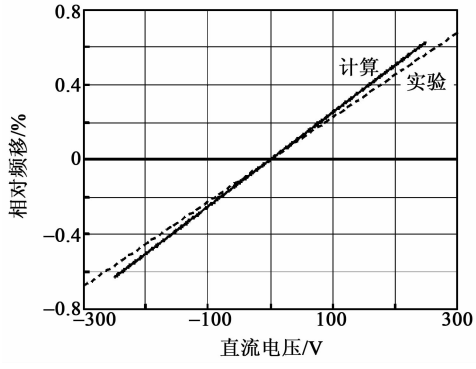



图 2 谐振频率的相对偏移量与直流电压的关系

### 3.2 电极化效应对应力负载效应的贡献

由式(10)可以发现，在电极化效应中，谐振频率的偏移与压电层的厚度无关，与压电层的面积成反

比。在文献[12]中,AlN 压电层的面积约为 $3\times10^{-9}$ $m^2$,未施加力载荷时,FBAR 的并联谐振频率约为 2 GHz。根据式(10)可得力载荷与谐振频率偏移量的曲线,如图 3 所示。实线为通过模型计算后的曲线,虚线为文献[12]中的测试结果。当施加 1 mN的力载荷时,计算得到电极化效应对 FBAR 并联谐振频率的偏移量约为 0.5 kHz。对比测试结果,由于应力负载效应,1 mN 的力载荷引起的并联谐振频率偏移量约为 262 kHz,此结果远大于电极化效应产生的频率偏移量。由此可以证明,在应力负载效应中,电极化效应对谐振频率偏移的影响很小,即电极化效应对应力负载效应的贡献很小,可忽略。

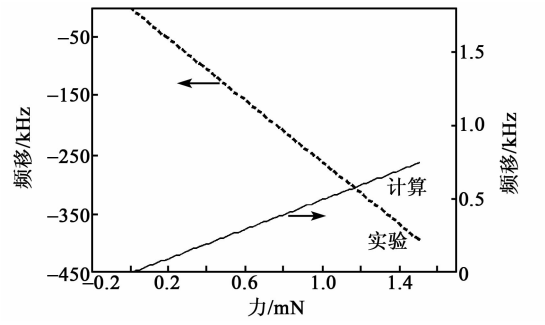



图 3　谐振频率的偏移量与力载荷的关系

## 4　结束语

本文研究了在应力负载效应中可能存在的电极化效应,建立了电极化效应的解析模型,讨论了直流电压、力载荷与并联谐振频率的关系。在电极化效应中,并联谐振频率的偏移与压电层的厚度无关,与压电层的面积成反比。通过与测试结果的对比,验证了提出的解析模型的正确性,并且证明了在应力负载效应中,电极化效应对谐振频率偏移的影响很小。

**参考文献:**

[1] ZHANG H,PANG W,KIM E S. Micromachined SU-8 probe integrated with film-bulk-acoustic resonant mass sensor[C]//Istanbul: IEEE International Conference on MICRO Electro Mechanical Systems, IEEE, 2006: 82-85.

[2] WEBER J,LINK M,PRIMIG R,et al. High frequency viscosity sensing with FBARs[C]//Miami: International Frequency Control Symposium and Exposition, IEEE,2006:117-122.

[3] QIU X, ZHU J, OILER J, et al. Film bulk acoustic-wave resonator based ultraviolet sensor[J]. App Phys Lett,2009,94(15):44.

[4] ALEKSEEV S G, MANSFELD G D, KOTELANSKII I M, et al. BAW microwave temperature sensor[C]// European: Frequency and Time Forum,2004:569-569.

[5] GUO H,GUO A,GAO Y,et al. Optimization of a VOC sensor with a bilayered diaphragm using FBAR as strain sensing elements[J]. Sensors, 2017, 17(8): 1764.

[6] CAMPANELLA H, PLAZA J A, MONTSERRAT J, et al. 12E-1 accelerometer based on thin-film bulk acoustic wave resonators[C]//New York: Ultrasonics Symposium, IEEE Xplore, 2007:1148-1151.

[7] WEBER J, LINK M, PRIMIG R, et al. Sensor for ambient pressure and material strains using a thin film bulk acoustic resonator[C]//Rotterdam: Ultrasonics Symposium, IEEE, 2005:1258-1261.

[8] 赵俊武. FBAR 的应力负载效应研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2017.

[9] DEFAY E, BEN H N, EMERY P, et al. Tunability of aluminum nitride acoustic resonators: a phenomenological approach[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2011, 58(12):2516.

[10] YOKOYAMA T, IWAZAKI Y, NISHIHARA T, et al. Analysis on electromechanical coupling coefficients in AlN-based bulk acoustic wave resonators based on first-principle calculations[C]//Dresden: Ultrasonics Symposium, IEEE, 2012:551-554.

[11] BU G, CIPLYS D, SHUR M, et al. Electromechanical coupling coefficient for surface acoustic waves in single-crystal bulk aluminum nitride[J]. Appl Phys Lett, 2004,84(23):4611-4613.

[12] CAMPANELLA H, CAMARGO C J, ESTEVE J, et al. Sensitivity of thin-film bulk acoustic resonators (FBAR) to localized mechanical forces[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2013, 23(6): 065024.