

# 初应力对考虑电极的压电薄膜体声波谐振器厚度 拉伸模态谐振特性的影响

罗昕逸, 黄德进, 张文亮, 王骥

(宁波大学机械工程与力学学院, 浙江宁波, 315211, huangdejin@nbu.edu.cn)

**摘 要:** 压电薄膜体声波谐振器是由上下两层电极中夹着一层压电薄膜构成的, 由于各层材料性质的不同, 在制作过程中, 势必会产生初应力, 对其振动过程产生影响。本文主要讨论了初应力对带有电极的压电薄膜体声波谐振器 (FBAR) 厚度拉伸振动模态谐振特性的影响。首先利用含初应力的压电材料的压电弹性基本方程, 推导出正弦电压作用下含初应力的压电薄膜体声波谐振器振动方程。结合具体算例, 给出了初应力作用下包含电极的理想压电薄膜体声波谐振器的阻抗特性, 以及初应力变化对其谐振频率、带宽及有效机电耦合系数的影响曲线。同时, 给出了电极厚度变化对不同初应力作用下的 FBAR 谐振频率的影响曲线。

**关键词:** 压电薄膜体声波谐振器 (FBAR); 谐振频率; 初应力

**中图分类号:** TB556

**文献标识码:** A

## Effects initial stresses on resonance properties of film bulk acoustic resonator with electrodes in thickness-extension mode

LUO Xin-yi, HUANG De-jin, ZHANG Wen-liang, WANG Ji

(School of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo, 315211, China;)

**Abstract:** The piezoelectric thin film bulk acoustic resonator (FBAR) is composed of the two layers electrodes sandwiching a layer of piezoelectric film constitute. Due to the different performance of each layer, initial stress will occur in FBAR to influence its vibration during the manufacturing process. This paper focuses on the effects of initial stresses on resonance properties of FBAR with electrodes in thickness-extension mode. Based on the basic piezoelectric equations of piezoelectric material under the action of initial stresses, the vibration equation of ideal FBAR under sines excitation voltage can be deduced. A Numerical examppe was presented to show the impedance characteristics of ideal FBAR with electrodes, as well as the effects about resonant frequency, bandwidth and effective electromechanical coupling coefficient caused by exert initial stress are obtained. The relationship between resonant frequency and thickness of electrodes was also presented.

**Key words:** Thin film bulk acoustic resonator (FBAR); initial stress; resonance frequency;

## 0 引言

无线通讯技术迅猛发展的当今时代, 射频器件 (RF) 已经成为当前的研究热点。微波介质滤波器和表面波技术在射频器件的设计及制造中较为常用。近十几年来, 科学家们又提出了薄膜体声波谐振器 (Thin Film Bulk Acoustic Resonators, FBAR) 构。FBAR 具有较高的品质因数、良好的温度稳定性以及其能够与集成电路良好兼容的性能, 并且其工作频率可以达到 GHz 计算<sup>[1-3]</sup>, 基于以上原因, 该技术广泛应用于带通滤波器、双工器、微博单片的概念。FBAR 是一种采用薄

膜和微纳加工技术制作的甚高频谐振器, 其构成形式为两层金属构成的电极, 中间加一层压电薄膜的类似于三明治的结集成电路、压控振荡器及半导体传感器等射频器件的制备过程中。薄膜体声波谐振器作为频率控制器件在无线宽频通信系统中被广泛应用<sup>[4]</sup>, 同时也成为近年来的研究热点。

由于 FBAR 的构成形式是包含电极层、压电层以及支撑层等的层合结构, 因此在器件的制作过程中, 由于多层结构中相邻层材料的力学和热学性能之间的差异, 结构中会不可避免的产生初应力; 此外, 对于脆性薄膜, 为了防止其脆性断裂, 要人为地使薄膜中存在预压应力。本文讨论了初应力对考虑电极的 FBAR 在厚度拉伸模态下谐振特性的影响, 对讨论了串联和并联谐振频率、带宽、机电耦

**收稿日期:** 2013-06-09; **修回日期:** 2013-06-15

**基金项目:** 浙江省重中之重学科开发基金(zj1007)。

**作者简介:** 罗昕逸(1988 年 8 月), 女, 陕西, 汉族 研究生, 研究方向为磁电体弹性力学。

**通讯作者:** 黄德进, 副教授, huangdejin@nbu.edu.cn。

合系数等重要参数与初应力之间的关系。并给出了数值算例。

## 1 基本方程

本文主要讨论如图 1 所示考虑电极的三层压电薄膜体声波谐振器, 在初应力作用下的厚度拉伸模态的谐振特性。

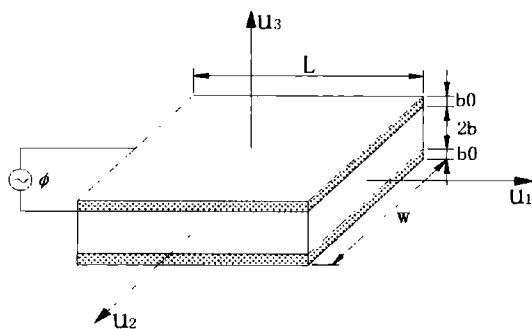


图 1 带电极的 FBAR 模型

Fig1. The model of FBAR with electrodes

初应力作用下的压电弹性体三维运动方程、电荷方程、本构方程分别为,

$$T_{ij,j} + (u_{i,k} T_{kj}^0)_{,j} = \rho \ddot{u}_i \quad (1)$$

$$D_{i,i} = 0 \quad (2)$$

$$T_i = c_{ij}^D S_j - h_{im} D_m, \quad E_n = -h_{nm} S_i + \beta_{nm}^s D_m \quad (3)$$

式中  $T_{ij}$ 、 $u_i$ 、 $D_i$ 、 $T_{kj}^0$ 、 $\rho$  分别为应力、位移、电位移、初应力及密度。应变与位移及电场强度与电势的关系分别为,

$$S_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (4)$$

$$E_i = -\phi_{,i} \quad (5)$$

本文讨论一维厚度拉伸问题, 在厚度拉伸情况下, 假设位移为下式形式:

$$u_1 = u_2 = 0, \quad u_3 = u(x_3) e^{i\omega t} \quad (6)$$

在厚度拉伸模态下, FBAR 基本方程简化为

$$T_{3,3} + u_{3,33} T_3^0 = \rho \ddot{u}_3, \quad (7)$$

$$D_{3,3} = 0. \quad (8)$$

$$T_3 = c_{33}^D S_3 - h_{33} D_3, \quad E_3 = -h_{33} S_3 + \beta_{33}^s D_3 \quad (9)$$

由上述方程可知, 含初应力的 FBAR 振动方程

为:

$$(c_{33}^D + T_3^0) u_{3,33} = \rho \ddot{u}_3 \quad (10)$$

通过式 (10) 可以看出, 在初应力的六个分量中, 式中只包含了拉伸应力分量  $T_3^0$ , 即只有  $T_3^0$  对厚度拉伸的振动产生影响。式 (10) 的通解为

$$u = A \sin(\xi x_3) + B \cos(\xi x_3) \quad (11)$$

其中  $\xi^2 = \frac{\rho \omega^2}{c_{33}^D + T_3^0}$ ,  $\xi$  为波数,  $A$ 、 $B$  为待定系数。

$T_3$  的表达式为:

$$T_3 = c_{33}^D \xi [A \cos(\xi x_3) - B \sin(\xi x_3)] e^{i\omega t} - h_{33} D \cdot e^{i\omega t} \quad (12)$$

在薄膜体声波谐振器的质心处,

$$x_3 = 0, \quad u = 0, \quad (13)$$

由式 (13) 和式 (11) 可得,  $B = 0$ 。在压电层上下表面处  $x_3 = \pm b$  的边界条件为,

$$T_3 = -\rho' \cdot b' \cdot \ddot{u}_3 \quad (14)$$

将式(11)代入(14), 可得

$$A = \frac{h_{33} D}{c_{33}^D \xi \left[ \cos(\xi b) - b' \cdot \xi \frac{\rho'}{\rho} \sin(\xi b) \right]} \quad (15)$$

将式 (15) 和  $B = 0$  代入式 (11) 可得位移, 由式 (5) 可得电场强度, 继而得电势

$$\phi = 2b\beta_{33}^s \left\{ 1 - \frac{k_t^2 \cdot \tan(\xi b)}{b\xi \left[ 1 - b' \cdot \xi \frac{\rho'}{\rho} \tan(\xi b) \right]} \right\} D \cdot e^{i\omega t} \quad (16)$$

电流为,

$$I = S \frac{\partial D_3}{\partial t} = i\omega S D e^{i\omega t} \quad (17)$$

式中  $S$  为电极的面积。这样 FBAR 厚度拉伸振动时的电阻抗可由电势和电流之比得到,

$$Z = \frac{1}{i\omega C_0} \left\{ 1 - \frac{k_t^2}{b\xi \left[ \cot(\xi b) - b' \cdot \xi \frac{\rho'}{\rho} \right]} \right\} \quad (18)$$

式中  $C_0$  为静态电容，

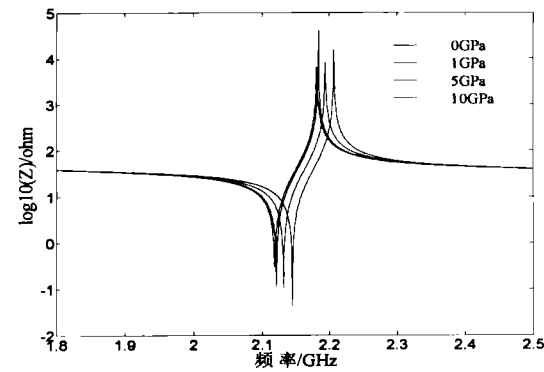
$$C_0=\frac{S_0}{2b\beta_{33}^s}。$$

当阻抗  $Z$  趋于无穷大时，谐振频率为并联谐振频率  $f_p$ ；当阻抗  $Z$  为零时，谐振频率为串联谐振频率  $f_s$ 。

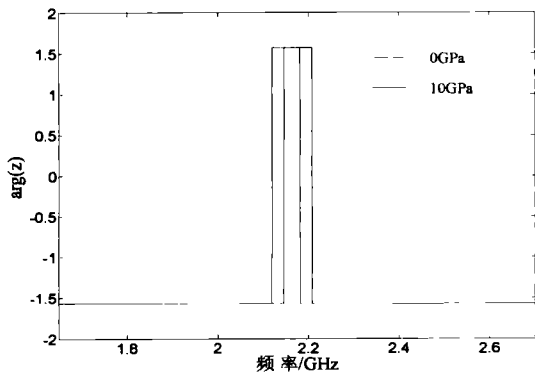
2 数值算例

本文推导结束后，通过计算实例来讨论该问题。在本文算例中，薄膜体声波谐振器的厚度  $b=1\mu\text{m}$ ，电极厚度为  $b'=0.1\mu\text{m}$ ，面积  $S=4\times10^{-8}\text{m}^2$ 。压电层材料选取 AlN，其材料常数 为： $\rho=3260\text{kg/m}^3$ ， $c_{33}^D=395\text{GPa}$ ， $\varepsilon_{33}^s=9.5\times10^{-11}\text{F/m}$ ， $\beta_{33}^s=1.05\times10^{10}\text{m/F}$ ， $h_{33}=16.32\times10^9\text{C/mF}$ 。电极材料则选用金属钼，其密度为  $\rho'=10280\text{kg/m}^3$ 。

图 2 是初应力作用下理想薄膜体声波谐振器的



(a) 阻抗幅值  
(a) Impedance amplitude



(b) 相位特性  
(b) Phase characteristic

图 2 不同初应力作用下理想 FBAR 的阻抗特性  
Fig2. The curves of impedance characteristics about ideal FBAR under different initial stress

阻抗特性。在图(a)中，可以看到初应力为零时，基波串的串联谐振频率为 2.12GHz，并联谐振频率为 2.18GHz，带宽为 60MHz。

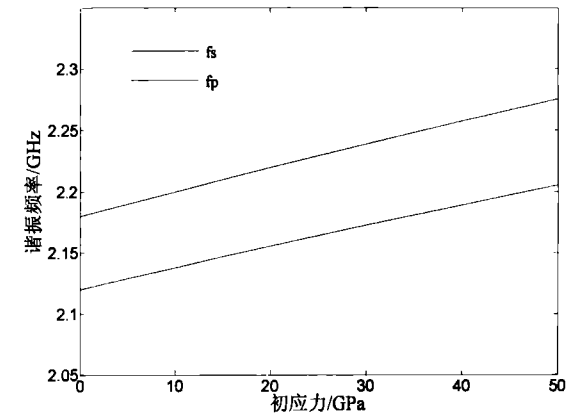


图 3 FBAR 谐振频率与初应力之间的关系  
Fig3. The relationship between resonant frequency and initial stress

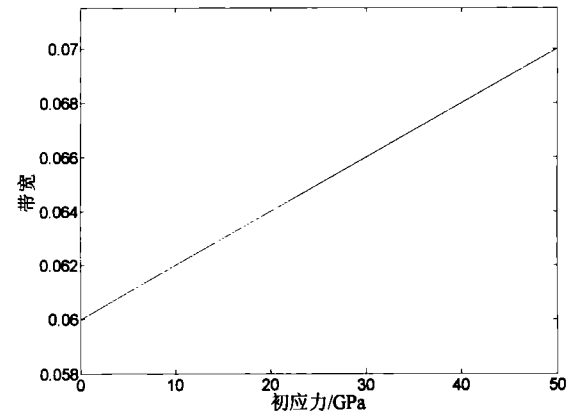


图 4 FBAR 带宽与初应力之间的关系  
Fig4. The relationship between bandwidth and initial stress

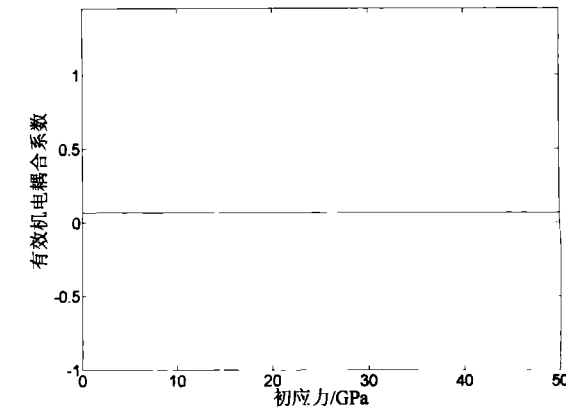


图 5 FBAR 机电耦合系数与初应力之间的关系  
Fig5. The relationship between electromechanical coupling coefficient and initial stress

通过图 3，可以看出，随着初应力的施加和增加，串并联谐振频率也是在增加的。带宽  $B=f_p-f_s$

得到的,通过图 4 可以看出随着初应力的增加,带宽在逐渐增加,但是增加范围不是很大。通过图 5 可以看出初应力对 FBAR 的机电耦合系数并没有影响。图 6 则表明随着电极厚度的增加,FBAR 的谐振频率逐渐减小,在电极厚度相同时,增加初应力会使谐振频率小幅增加。初应力的作用,并未改变谐振频率随电极厚度的变化趋势。

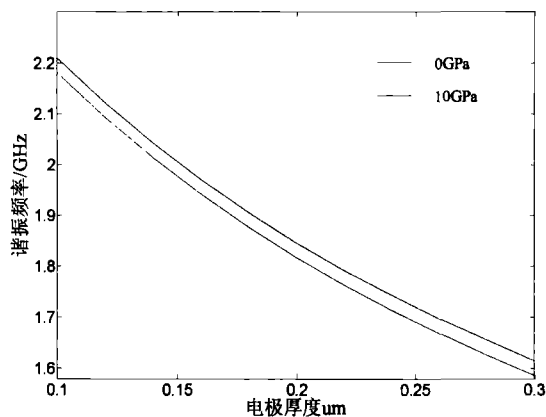


图 6 FBAR 谐振频率与电极厚度的关系

Fig6. The relationship between resonant frequency and the thickness of electrodes

### 3 结 论

本文主要讨论了初应力对带有电极的理想压电薄膜体声波谐振的振动的影响,推导出了阻抗的表达式,并讨论了串联谐振频率、并联谐振频率与初应力之间的关系,以及初应力变化对带宽的影响。在推导过程中,发现在初应力的六个分量 $T_i^0$  ( $i=1,2,\dots,6$ )中,只有拉伸应力分量 $T_3^0$ 会对 FBAR 厚度拉伸模态的谐振产生影响,其它分量并不起作用。初应力会提高谐振频率和带宽,初应力和频率、带宽的关系可近似为线性关系。对机电耦合系数基本没有影响。随着电极厚度的增加,FBAR 的谐振频率会减小。

### 参考文献

- [1] K. M. Lakin. A review of thin-film resonator technology[J]. IEEE Microwave Magazine, 4(4), 2003,61-67.
- [2] M. Ueda, T. Nishihara, J. Tsutsumi, S. Taniguchi, T. Yokoyama, S. Inoue, T. Miyashita, and Y. Satoh. High-Q resonators using FBAR/SAW technology and their applications[C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005: 209-212.
- [3] R. Ruby. Review and comparison of bulk acoustic wave FBAR/SMR technology[C]. Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 2007:1029-1040.
- [4] 张亚非 陈达等著. 薄膜体声波谐振器的原理、设计与应用[M], 上海交通大学出版社, 韩建民 2011,4-13
- [5] Yafei,Zhang、Da,chen .etc,The theory,design and application of thin film bulk Acoustic Wave Resonators[M]. Shanghai Jiaotong University Press,2011, 4-13
- [6] Huang, D.J., Wang, J., Du, J.K., The analysis of high frequency vibrations of layered anisotropic plates for FBAR application[C]. 2008 IEEE International Frequency Control Symposium, 2008. 204-208.
- [7] Ji Wang, Jiansong Liu, Jianke Du, and Dejin Huang: The Calculation of Electrical Parameters of Film Bulk Acoustic Wave Resonators from Vibrations of Layered Piezoelectric Structures[C], Proceedings of the 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium, Sept. 19-24, Rome, Italy.
- [8] Ji Wang, Jiansong Liu, Jianke Du, Dejin Huang, Weiqiu Chen: The Analysis of Film Acoustic Wave Resonators with the Consideration of Film Piezoelectric Properties[C], 2nd International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering, July 8-11, 2009, Weihai, Shandong, CHINA
- [9] Ji Wang, Jiansong Liu, Jianke Du, Dejin Huang: The Calculation of Quality Factor of Film Bulk Acoustic Resonators with the Consideration of Viscosity[C], Proceedings of the Joint Conference of the 2009 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications and China Symposium on Frequency Control Technology, Dec. 17-20, Wuhan, China.