

初应力对 FBAR 厚度剪切模态谐振特性的影响

黄德进, 罗昕逸, 王 骥

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘 要:研究了含初应力压电薄膜体声波谐振器(FBAR)厚度剪切振动的谐振特性。利用含初应力压电材料的压电弹性基本方程,推导出理想 FBAR 在正弦激励电压作用下的振动方程。然后根据边界条件,求出问题的解,得到了串联和并联谐振频率,并讨论了初应力对谐振频率、带宽和有效机电耦合系数的影响。给出了具体的数值算例,所得结果对于提高和改善 FBAR 的性能有参考意义。

关键词:薄膜体声波谐振器;初应力;谐振频率;带宽;有效机电耦合系数

中图分类号:TN015;TN752

文献标识码:A

Effects of Initial Stresses on Resonance Properties of FBAR in Thickness-Shear Mode

HUANG Dejin, LUO Xinyi, WANG Ji

(The Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: This paper studied the resonance properties of Film Bulk Acoustic Resonator (FBAR) with initial stress in thickness-shear mode. Based on the fundamental piezoelectric equations of piezoelectric material with initial stresses, the vibration equation of ideal FBAR under sine excitation voltage is derived. The solution is then obtained by using the boundary conditions. The series and parallel resonance frequency are listed, and the effects of initial stresses on resonance frequency, bandwidth, and effective electromechanical coupling coefficient are discussed. A numerical example is presented to show the effects. These results are very useful for the improvement of FBAR performance.

Key words: FBAR; initial stress; resonance frequency; bandwidth; effective electromechanical coupling factor

0 引言

薄膜体声波谐振器(FBAR)是近十几年来发展起来一种新的频率器件。其基本结构是由电极层、压电薄膜层和支撑层等组成的层合结构。目前用于传感器、滤波器和双工器上 FBAR 的常用模态是厚度拉伸振动。但在 FBAR 作为液体中的传感器应用时,剪切模态可发挥其独特的优势。FBAR 厚度剪切模态振动时,传感器的形变方向垂直于厚度方向,减少了能量向液体的散布,能保持高的品质因数和分辨率^[1]。

由于 FBAR 多层结构中相邻层材料的力学和热学性能间的差异,结构中会不可避免地产生初应力;另外,对于某些脆性材料制作的薄膜谐振器,为了防止其脆性断裂常要人为地使薄膜中存在预压应力。目前在 FBAR 的设计和优化中,常采用 Mason 模型和 BVD 模型等效电路法来分析研究,也采

用解析法和数值解法^[2-5]。迄今为止,还未见 FBAR 厚度剪切模态谐振特性受初始应力影响的研究工作报告。本文研究了初应力对理想 FBAR 在厚度剪切模态下谐振特性的影响,讨论了串联和并联谐振频率、带宽、机电耦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 基本方程和问题的解

本文研究的理想 FBAR 由一层压电薄膜夹于两层极薄的导体之间。要使这样的 FBAR 激发出厚度剪切振动模态,压电薄膜材料需要特殊的薄膜生长技术使 c 轴倾斜生长。由于电极层极薄,导体的厚度、质量和刚度在本研究中忽略不计。FBAR 的厚度尺寸为 $2b$,远小于长度 l 和宽度 w ,因此可作为厚度方向的一维问题来处理。FBAR 的几何尺寸和坐标系如图 1 所示。

收稿日期:2012-11-11

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(10932004);浙江省重点科技创新团队基金资助项目(2011R09025-02);浙江省自然科学基金资助项目(LY12F01015);浙江省教育厅重点科研基金资助项目(Z201018143);宁波市自然科学基金资助项目(2011A610183)

作者简介:黄德进(1968-),男,浙江宁波人,副教授,博士,主要从事压电弹性体振动研究。

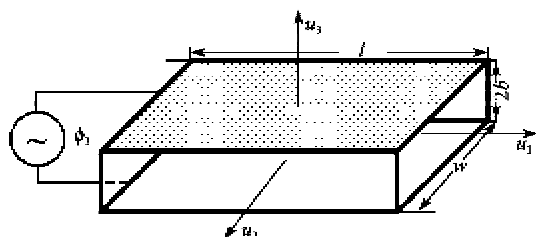


图1 FBAR 的几何尺寸和坐标系

含初应力的压电弹性体三维运动方程^[6]和电荷方程分别为

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

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

式中: T_{ij} 、 u_i 、 D_i 分别为应力、位移和电位移; T_{kj}^0 为初应力; ρ 为密度; u 为位移对时间 t 的二阶导数; $i, j, k=1, 2, 3$ 。应变 S_{ij} 与 u_i 关系及电场强度 E_i 与电势 ϕ 之间的关系分别为

$$S_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3)$$

$$E_i = -\phi_{,i} \quad (4)$$

压电材料的本构关系为

$$T_p = c_{pq} S_q + e_{kp} \phi_{,k} \quad (5)$$

$$D_i = e_{iq} S_q - \epsilon_{ik} \phi_{,k} \quad (6)$$

式中 c_{pq} 、 e_{kp} 和 ϵ_{ik} 分别为弹性常数、压电常数和介电常数, $p, q=1, 2, \dots, 6, i, k=1, 2, 3$ 。

在厚度剪切模态下, 假设位移和电势为

$$\begin{cases} u_1 = u(x_3) e^{i\omega t} \\ u_2 = u_3 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\phi = \phi(x_3) e^{i\omega t} \quad (8)$$

式中 $u(x_3)$ 和 $\phi(x_3)$ 为待定的表达式。

应变为

$$\begin{cases} S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = S_5 = 0 \\ S_6 = u_{1,3} \end{cases} \quad (9)$$

此时压电薄膜层的应力和电位移为

$$\begin{cases} T_1 = c_{15} u_{1,3} + e_{31} \phi_{,3} \\ T_2 = c_{25} u_{1,3} + e_{32} \phi_{,3} \\ T_3 = c_{35} u_{1,3} + e_{33} \phi_{,3} \\ T_4 = c_{45} u_{1,3} + e_{34} \phi_{,3} \\ T_5 = c_{55} u_{1,3} + e_{35} \phi_{,3} \\ T_6 = c_{65} u_{1,3} + e_{36} \phi_{,3} \\ D_1 = e_{15} u_{1,3} - \epsilon_{13} \phi_{,3} \\ D_2 = e_{25} u_{1,3} - \epsilon_{23} \phi_{,3} \\ D_3 = e_{35} u_{1,3} - \epsilon_{33} \phi_{,3} \end{cases} \quad (10)$$

将式(11)代入式(2)可得

$$\phi_{,33} = \frac{e_{35}}{\epsilon_{33}} u_{,33} \quad (12)$$

式(12)积分得

$$\phi = \frac{e_{35}}{\epsilon_{33}} \cdot u + C_1 x_3 + C_2 \quad (13)$$

式中 C_1 和 C_2 为积分常数。将式(10)、(13)代入式(1)可得在厚度剪切模态下压电层的运动方程:

$$(\bar{c}_{55} + T_3^0) u_{,33} = -\omega^2 \rho u \quad (14)$$

式中 $\bar{c}_{55} = c_{55} + e_{35}^2 / \epsilon_{33}$ 。由式(14)可发现, 在初应力分量 T_i^0 中, 只有 T_3^0 对厚度剪切振动产生影响。式(14)的通解为

$$u = A \sin(\xi x_3) + B \cos(\xi x_3) \quad (15)$$

式中: A 、 B 为待定常数; ξ 为波数。

$$\xi^2 = \frac{\rho \omega^2}{\bar{c}_{55} + T_3^0} \quad (16)$$

将式(15)代入式(13)得到

$$\phi = \frac{e_{35}}{\epsilon_{33}} \cdot [A \sin(\xi x_3) + B \cos(\xi x_3)] + C_1 x_3 + C_2 \quad (17)$$

上、下表面的电学边界条件为

$$\begin{cases} x_3 = \pm b \\ \phi = \pm V \end{cases} \quad (18)$$

由式(17)、(18)得到

$$\begin{cases} C_1 = \frac{V}{b} - A \frac{e_{35}}{b \epsilon_{33}} \sin(\xi b) \\ C_2 = -B \frac{e_{35}}{\epsilon_{33}} \cos(\xi b) \end{cases} \quad (19)$$

由式(10)、(17)和(19)可得

$$T_5 = A \left[\bar{c}_{55} \xi \cos(\xi x_3) - \frac{e_{35}^2}{\epsilon_{33}} \cdot \frac{1}{b} \sin(\xi b) \right] - B \xi \frac{e_{35}^2}{\epsilon_{33}} \sin(\xi x_3) + e_{35} \frac{V}{b} \quad (20)$$

FBAR 上、下表面为自由边界, 则

$$T_5(\pm b, t) = 0 \quad (21)$$

由式(20)、(21)可得

$$\begin{cases} A = \frac{\epsilon_{33} e_{35}}{e_{35}^2 \sin(\xi b) - \epsilon_{33} \bar{c}_{55} b \xi \cos(\xi b)} V \\ B = 0 \end{cases} \quad (22)$$

由式(11)、(13)和(15)可得

$$D_3 = \frac{\epsilon_{33}^2 \bar{c}_{55}}{e_{35}^2 \tan(\xi b) - \epsilon_{33} \bar{c}_{55} b \xi} V \xi \quad (23)$$

电极上的电荷为

$$Q = -S \cdot D_3|_{x_3=b} = -S \cdot \frac{\epsilon_{33}^2 \bar{c}_{55}}{e_{35}^2 \tan(\xi b) - \epsilon_{33} \bar{c}_{55} b \xi} V \xi \quad (24)$$

这样电流为

$$I = \dot{Q} = i\omega Q = -i\omega S \cdot$$

$$\frac{\epsilon_{33}^2 \bar{c}_{55}}{e_{35}^2 \tan(\xi b) - \epsilon_{33} \bar{c}_{55} b \xi} V \xi \quad (25)$$

阻抗为

$$Z = \frac{2V}{I} = \frac{1}{i\omega C_0} \left[1 - k^2 \frac{\tan(\xi b)}{\xi b} \right] \quad (26)$$

式中: $C_0 = \frac{\epsilon_{33} S}{2b}$ 为静态电容; $k^2 = \frac{e_{35}^2}{\epsilon_{33} \bar{c}_{55}}$ 为厚度剪切时的机电耦合系数。

当阻抗趋于无穷大时, 此时的谐振频率为并联谐振频率 f_p 。由式(26)可知, $\frac{\tan(\xi b)}{\xi b} \rightarrow \infty$, 即

$$\xi = (2n+1) \frac{\pi}{2b} \quad n=0, 1, 2, 3, \dots \quad (27)$$

再利用式(12)可得

$$f_p = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{(2n+1)}{4b} \sqrt{\frac{\bar{c}_{55} + T_3^0}{\rho}} \quad (28)$$

当阻抗为 0 时, 此时的谐振频率为串联谐振频率 f_s 。由式(26)可知,

$$\frac{\tan\left(2\pi f_s b \sqrt{\frac{\rho}{\bar{c}_{55} + T_3^0}}\right)}{2\pi f_s b \sqrt{\frac{\rho}{\bar{c}_{55} + T_3^0}}} = \frac{1}{k^2} \quad (29)$$

由式(29)可解得 f_s 。 f_s 与 f_p 之差为谐振器的带宽:

$$f_p - f_s = \frac{4}{\pi^2} k^2 f_p^2 \quad (30)$$

FBAR 的有效机电耦合系数^[7]为

$$k_{\text{eff}}^2 = \frac{\frac{\pi f_s}{2 f_p}}{\tan\left(\frac{\pi f_s}{2 f_p}\right)} \quad (31)$$

2 数值算例和讨论

数值算例中, FBAR 的厚度 $2b = 2 \mu\text{m}$, 面积 $S = 4 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ 。压电层材料为 AlN, c 轴旋转 32° , 其他材料常数: $\rho = 3260 \text{ kg/m}^3$, $\bar{c}_{55} = 144 \text{ GPa}$, $\epsilon_{33} = 7.6 \times 10^{-11} \text{ F/m}$, $e_{35} = 0.83 \text{ C/m}^2$ 。图 2 为理想 FBAR 的阻抗幅值、相位特性与初应力的关系图。由图可见, 无初始应力时, 其基波串联谐振频率为 1.671 GHz , 基波并联谐振频率为 1.714 GHz , 带宽为 42.5 MHz , 有效机电耦合系数为 0.0596 。随着初应力的增加, 串联谐振频率和并联谐振频率也会提高。谐振频率与初应力的关系如图 3 所示。由式(28)可知, 并联谐振-初应力曲线为抛物线, 但曲线弧度不大, 可用直线近似代替:

$$f_p = f_{p0} + \frac{1}{8b \sqrt{\rho \bar{c}_{55}}} \cdot T_3^0 \quad (32)$$

式中 f_{p0} 为初应力为 0 时的并联谐振频率。带宽与初应力间的关系如图 4 所示。随着初应力的增加, 带宽越来越大, 近似线性关系。图 5 为有效机电耦合系数随初应力的变化。有效机电耦合系数基本保持一个常数, 与初应力的变化无关。

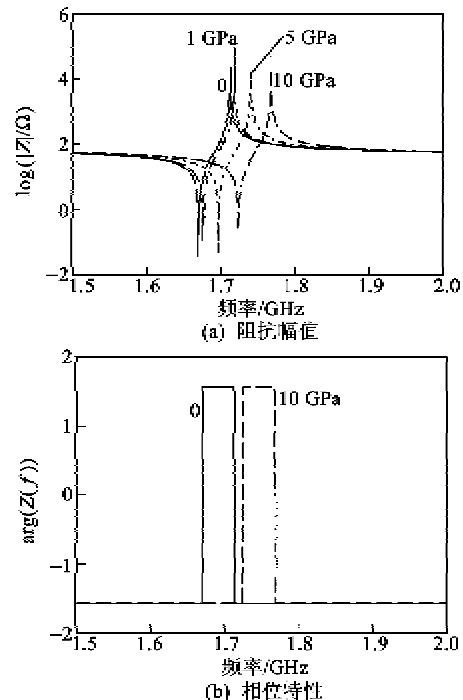


图 2 不同初应力下的理想 FBAR 的阻抗特性图

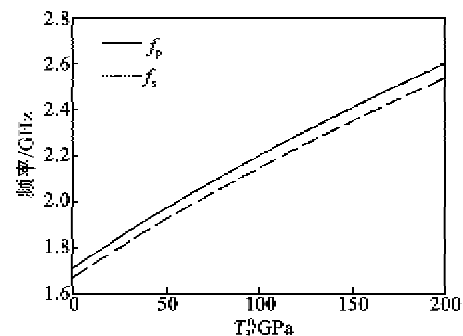


图 3 FBAR 谐振频率与初应力间的关系

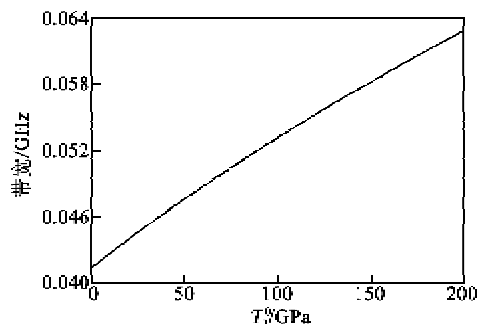
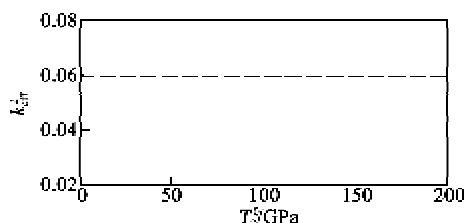


图 4 FBAR 带宽与初应力间的关系

图 5 k_{eff}^2 与初应力间的关系

3 结束语

本文研究了含初应力的理想压电薄膜体声波谐振器厚度剪切模态下的振动,给出了阻抗的表达式,讨论了串联谐振频率、并联谐振频率与初应力间的关系,也讨论了初应力对带宽和有效机电耦合系数影响。通过推导发现,在各初应力分量 T_i^0 ($i=1,2,\dots,6$) 中,只有剪切应力分量 T_3^0 会对 FBAR 厚度剪切模态的谐振产生影响,其他分量不起作用。给出的数值算例表明,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无影响。

参考文献:

- [1] ZHANG H, PANG W, KIM E S. High-frequency bulk acoustic resonant microbalances in liquid[C]// Vancouver, Canada: IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2005: 73-77.
- [2] 于小利, 罗中涌, 曹明, 等. 薄膜体声波谐振器的二维 FDTD 数值模拟[J]. 声学技术, 2011, 30(4): 354-355.

YU Xiaoli, LUO Zhongyong, CAO Ming, et al. Two-dimensional analysis of FBAR using FDTD method[J]. Technical Acoustics, 2011, 30(4): 354-355.

- [3] 张慧金, 董树荣, 金浩, 等. FBAR 建模及用于 MIMO 终端的滤波器设计[J]. 压电与声光, 2010, 32(4): 528-531.
- ZHANG Huijin, DONG Shurong, JIN Hao, et al. FBAR modeling and design of FBAR RF filters for MIMO[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(4): 528-531.
- [4] 张涛, 马宏伟, 郭长立, 等. 传输矩阵法研究薄膜体声波谐振器[J]. 西安科技大学学报, 2010, 2: 251-254.
- ZHANG Tao, MA Hongwei, GUO Changli, et al. Research of thin film bulk acoustic resonators (FBAR) using transmission matrix method[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 2: 251-254.
- [5] HUANG Dejin, WANG Ji, DU Jianke. The analysis of high frequency vibrations of layered anisotropic plates for FBAR application[C]//Hawaii, USA: IEEE International Frequency Control Symposium, 2008: 204-208.
- [6] BIOT M A. Mechanics of incremental deformations [M]. New York: John Wiley & Sons, 1964.
- [7] LAKIN K M, KLINE G R, MCCARRON K T. High-Q micro-microwave acoustic resonators and filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1993, 41: 2139-2146.

(上接第 787 页)

同带宽的滤波器。由于电容比 γ 的存在,声表面波谐振器取代椭圆 LC 滤波器中的谐振单元后,额外的零点和极点出现在通带两侧。引入模拟退火法对各个谐振器的静态电容进行优化,得到了窄带低损耗高矩形度的滤波器。相关的实验证明了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] IKATA O, MIYASHITA T, MATSUDA T, et al. Development of low-loss band-pass filters using SAW resonators for portable telephone [C]//Tucson, AZ, USA: Proc IEEE Ultrasonics Symp, 1992: 112-115.
- [2] HASHIMOTO K Y. 王景山, 刘天飞, 孙玮, 译. 声表面波器件模拟与仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 153-160.
- [3] OMORI T, MATSUDA K, YOKOYAMA N, et al. Suppression of transverse mode responses in ultra-

wideband SAW resonators fabricated on a Cu-grating/15°YX-LiNbO₃ structure[J]. IEEE Trans Ultrason, Ferroelec, and Freq Contr, 2007, 54(10): 1943-1948.

- [4] KOMATSU T, TANAKA Y, HASHIMOTO K, et al. Design of narrow bandwidth ladder-type filters with sharp transition bands using mutually connected resonator elements[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr, Freq Control, 2009, 56(7): 1451-1456.
- [5] Elliptic filter[OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Elliptic_filter
- [6] WANG H L, ZHONG H, SHI Y, et al. Design of narrow bandwidth elliptic type SAW/BAW filter[J]. Electronics Letters, 2012, 48(10): 539-540.
- [7] DYKE V K S. The piezo-electric resonator and its equivalent network[C]//Proc IRE, 1928, 16(6): 742-764.
- [8] WANG Hualei, CHEN Jing, ZHONG Hui, et al. Design of narrow bandwidth elliptic-type SAW/BAW filters[J]. IEEE Trans Ultrason, Ferroelec, and Freq Contr, 2012, 59(12): 2813-2817.