

• 电子信息材料与器件 •

## 复合双压电层FBAR的建模与仿真

杨成韬<sup>1</sup>, 李健雄<sup>1</sup>, 许绍俊<sup>2</sup>, 王 锐<sup>1</sup>, 张树人<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室 成都 610054; 2. 四川石油管理局地质勘探开发研究院 成都 610051)

**【摘要】**在复合单压电层薄膜体声波谐振器(FBAR)的基础上,提出了一种新型的复合双压电层FBAR,它可以大大提高压电材料选择的灵活性。通过建模得到该结构的输入阻抗解析表达式,据此进行了仿真分析。仿真结果表明,基模谐振频率随双压电层结构中的较高声速压电膜的厚度所占比率的增加而加速增大,而相对带宽随较高机电耦合系数的压电膜的厚度与较低机电耦合系数的压电膜的厚度比的增加逐渐增加,并且复合双压电层FBAR出现了单压电层时所没有的模式。

**关键词** 解析解; 双压电层; 薄膜体声波谐振器; 输入阻抗; 谐振频率

**中图分类号** TN65

**文献标识码** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-0548.2009.02.34

## Modeling and Simulating of Complex Double Piezoelectric Layers' FBAR

YANG Cheng-tao<sup>1</sup>, LI Jian-xiong<sup>1</sup>, XU Shao-jun<sup>2</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>, and ZHANG Shu-ren<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Electronic Thin Film and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Center of Geological Exploration & Development Research Institute, SPA Chengdu 610051)

**Abstract** Based on complex single piezoelectric layer's film bulk acoustic resonator (FBAR), a new kind of complex double piezoelectric layers' FBAR is proposed. This structure can greatly improves the flexibility of the selection of piezoelectric materials for FBAR. The analytical expression of input impedance is derived and simulated. The results of simulation show that: 1) the resonant frequency of basic mode increases significantly with the thickness ratio of the piezoelectric layer with higher acoustic speed to the whole thickness of double piezoelectric layers, 2) the relative bandwidth increases with the thickness ratio of the piezoelectric layer with higher electromechanical coupling coefficient to that with lower electromechanical coupling coefficient, and 3) some modes can be found in double piezoelectric layers' FBAR but not in the single layer's FBAR.

**Key words** analytical solution; double piezoelectric layers; FBAR; input impedance; resonant frequency

薄膜体声波谐振器(FBAR)历经几十年的发展,已成功地应用于射频和微波通信领域。由于FBAR能提供比传统的压电单晶器件更高的频率,因而利用现有的压电薄膜材料工艺技术,可获得500 MHz~20 GHz的谐振器和滤波器<sup>[1]</sup>。FBAR使用的压电薄膜材料主要有ZnO、AlN和PZT。在FBAR中,声速与谐振频率成正比,机电耦合系数也与相对带宽近似成正比<sup>[2]</sup>。AlN具有高声速的特点,因而很适合高频应用;PZT由于具有大的机电耦合系数,因而主要用在大带宽领域<sup>[3]</sup>;而ZnO的机电耦合性能和声速介于AlN和PZT之间。

### 1 复合双压电层FBAR的建模和输入阻抗的求解

现有的FBAR主要有3种类型:硅反面刻蚀型、

空气隙型和固态装配型(SMR)。这3种主要压电材料的部分参数如表1所示。一直以来,人们对FBAR的研究仅限于单压电层结构,事实上,可以结合各种压电材料的特性,形成双压电层的结构,这种结构可通过控制两种压电膜的厚度比来调节相对带宽,因而可以给FBAR的设计带来方便,可以大大提高压电材料选择的灵活性,因此本文提出了一种全新的双压电层FBAR结构并对其进行分析。

表1 3种主要FBAR压电材料的比较<sup>[4]</sup>

材料	AlN	ZnO	PZT
声速/m·s <sup>-1</sup>	10 400	6 340	4 500
机电耦合系数/(%)	2.89	7.84	20.25

在忽略损耗的复合单压电层FBAR<sup>[5]</sup>的基础上,再考虑双压电层的情况。借用电磁场中的传输线理

收稿日期: 2008-02-12; 修回日期: 2008-12-29

基金项目: 部级预研基金

作者简介: 杨成韬(1965-), 男, 教授, 主要从事铁电、压电薄膜材料及集成器件方面的研究。

论, 复合双压电层FBAR 的结构可以简化为如图1所示。为方便书写, 本文记上层和下层压电材料中的体声波部分场量的通解为:

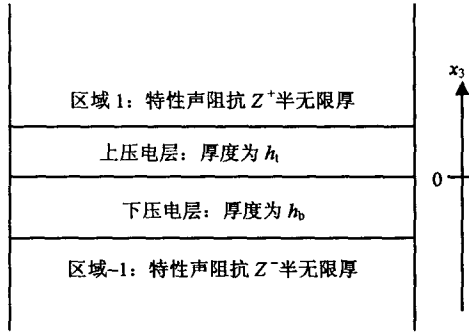


图1 复合双压电层FBAR的简化图

上压电层:

$$\begin{cases} v_t = i\omega \{ A_t^+ \exp[i(\omega t - q_t x_3)] + A_t^- \exp[i(\omega t + q_t x_3)] \} \\ T_t = iq_t c_t \{ A_t^- \exp[i(\omega t + q_t x_3)] - A_t^+ \exp[i(\omega t - q_t x_3)] \} + e_t a_t \exp(i\omega t) \\ \varphi_t = \frac{e_t}{\varepsilon_t} \{ A_t^+ \exp[i(\omega t - q_t x_3)] + A_t^- \exp[i(\omega t + q_t x_3)] \} + (a_t x_3 + b_t) \exp(i\omega t) \\ D_t = -\varepsilon_t a_t \exp(i\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

下压电层:

$$\begin{cases} v_b = i\omega \{ A_b^+ \exp[i(\omega t - q_b x_3)] + A_b^- \exp[i(\omega t + q_b x_3)] \} \\ T_b = iq_b c_b \{ A_b^- \exp[i(\omega t + q_b x_3)] - A_b^+ \exp[i(\omega t - q_b x_3)] \} + e_b a_b \exp(i\omega t) \\ \varphi_b = \frac{e_b}{\varepsilon_b} \{ A_b^+ \exp[i(\omega t - q_b x_3)] + A_b^- \exp[i(\omega t + q_b x_3)] \} + (a_b x_3 + b_b) \exp(i\omega t) \\ D_b = -\varepsilon_b a_b \exp(i\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

式中  $v$ 、 $I$ 、 $\varphi$ 、 $D$  分别表示粒子振动速度、应力、电势和电位移;  $\omega$  和  $q$  分别为角频率和波数;  $c$ 、 $e$ 、 $\varepsilon$  分别表示体声波传播方向的开路弹性刚度系数、压电应力常数和介电常数;  $A$ 、 $a$ 、 $b$  均为待定系数;  $h$  为压电层厚度; 脚标  $t$  和  $b$  分别表示上压电层和下压电层; 角标  $+$  和  $-$  分别表示正向波和反向波。另外, 从上下电极和压电材料的界面处向外看的声学输入阻抗分别记为  $Z^+$  和  $Z^-$ 。已知两压电材料界面处满足2个力学条件: 应力相等和粒子振动速度相等; 还满足2个电学条件: 电势相等和电位移相等。两压电材料与电极的界面处也存在4个条件: 2个电势边界条件(边界处电势分别为  $\varphi_0$  和  $-\varphi_0$ ) 和2个声学边界条件

(向压电材料看的声学输入阻抗分别为  $-Z^+$  和  $-Z^-$ )。因此总共有8个定解条件, 如图1所示, 将坐标零点定在两压电材料界面处, 这样8个定解条件具体表达如式(3)方程组所示。

注意到FBAR的电学输入阻抗只与待定系数  $a_t$  (或  $a_b$ ) 有关而与其他待定系数无关, 因此只需求出  $a_t$ 。在求解之前, 首先引入两种标记法则:

法则一:

$$F_{\pm 1, \pm 2} F_{\pm 2, \pm 1} = F_{\pm 1} F_{\pm 2}$$

$$F_{\pm 1} = [\pm 1 + \exp(i2q_t h_1)], \quad F_{\pm 2} = [\pm 1 + \exp(i2q_b h_2)]$$

法则二:

$$\begin{cases} f_{\pm 1} = [\pm 1 + \exp(iq_t h_1)], \quad f_{\pm 2} = [\pm 1 + \exp(iq_b h_2)] \\ iq_t c_t (A_t^- - A_t^+) + e_t a_t = iq_b c_b (A_b^- - A_b^+) + e_b a_b \\ i\omega (A_t^+ + A_t^-) = i\omega (A_b^+ + A_b^-) \\ \frac{e_t}{\varepsilon_t} (A_t^+ + A_t^-) + b_t = \frac{e_b}{\varepsilon_b} (A_b^+ + A_b^-) + b_b \\ \varepsilon_t a_t = \varepsilon_b a_b \\ \frac{e_t}{\varepsilon_t} [A_t^+ \exp(-iq_t h_1) + A_t^- \exp(iq_t h_1)] + (a_t h_1 + b_t) = \varphi_0 \\ \frac{e_b}{\varepsilon_b} [A_b^+ \exp(iq_b h_2) + A_b^- \exp(-iq_b h_2)] + (-a_b h_2 + b_b) = -\varphi_0 \\ iq_t c_t [A_t^+ \exp(-iq_t h_1) - A_t^- \exp(iq_t h_1)] - e_t a_t = i\omega Z^+ [A_t^+ \exp(-iq_t h_1) + A_t^- \exp(iq_t h_1)] \\ iq_b c_b [A_b^- \exp(-iq_b h_2) - A_b^+ \exp(iq_b h_2)] + e_b a_t = i\omega Z^- [A_b^+ \exp(iq_b h_2) + A_b^- \exp(-iq_b h_2)] \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)方程组可以解出:

$$a_t = \frac{2\varphi_0}{\left( h_1 + \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_b} h_2 \right) + i \frac{P}{\Omega}} \quad (4)$$

其中,

$$P = \sum_{n=1}^6 P_n$$

$$P_1 = F_{-1, -2} (c_t^2 q_t^2 \varepsilon_t^2 e_b^2 + c_b^2 q_b^2 \varepsilon_b^2 e_t^2)$$

$$P_2 = c_t c_b q_t q_b (\varepsilon_t^2 e_b^2 F_{+1} f_{-2}^2 + \varepsilon_b^2 e_t^2 F_{+2} f_{-1}^2)$$

$$P_3 = \omega (\varepsilon_t^2 e_b^2 c_t q_t Z^+ F_{+1, -2} + \varepsilon_b^2 e_t^2 c_b q_b Z^- F_{-1, +2})$$

$$P_4 = \omega (\varepsilon_t^2 e_b^2 c_b q_b Z^+ F_{-1} f_{-2}^2 + \varepsilon_b^2 e_t^2 c_t q_t Z^- F_{-2} f_{-1}^2)$$

$$P_5 = 2\omega \varepsilon_t \varepsilon_b e_t e_b [c_t q_t Z^- F_{-2} (f_{+1} - 1) + c_b q_b Z^+ F_{-1} (f_{+2} - 1)]$$

$$P_6 = 2c_t c_b q_t q_b e_t e_b \varepsilon_t \varepsilon_b \{ [1 + (f_{+1} - 1)(f_{+2} - 1)] \times (f_{+1} + f_{+2}) - 4(f_{+1} - 1)(f_{+2} - 1) \}$$

$$\Omega = \varepsilon_i \varepsilon_b^2 [c_i c_b q_i q_b (c_i q_i F_{-1,+2} + c_b q_b F_{+1,-2}) + \omega^2 Z^+ Z^- (c_i q_i F_{+1,-2} + c_b q_b F_{-1,+2}) + \omega F_{-1,-2} (c_i^2 q_i^2 Z^+ + c_b^2 q_b^2 Z^-) + \omega c_i c_b q_i q_b F_{+1,+2} (Z^+ + Z^-)]$$

复合双压电层FBAR的输入电流为:

$$I = -\frac{\partial D_i}{\partial t} A = i a_i \omega \varepsilon_i A \exp(i\omega t) \quad (5)$$

复合双压电层FBAR的电学输入阻抗为:

$$Z(\omega) = \frac{2q_0 \exp(i\omega t)}{I} \quad (6)$$

将式(4)和式(5)代入式(6), 得到复合双压电层FBAR的电学输入阻抗为:

$$Z(\omega) = \frac{1 + iR}{i\omega C_0} \quad (7)$$

式中  $R = \frac{P}{\Omega \left( h_i + \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_b} h_b \right)}$ ;  $C_0 = \frac{\varepsilon_i \varepsilon_b A}{h_i \varepsilon_b + h_b \varepsilon_i}$ ,  $C_0$  的

物理意义为双压电层的静态电容,  $A$  为电极有效面积。公式(7)包含了单压电层的特殊情况。

## 2 复合双压电层FBAR的输入阻抗特性仿真

现以夹在多晶Al电极之间的 $c$ 轴择优取向AlN和ZnO构成的复合双压电层FBAR为例, 并取上下铝电极厚度均为1  $\mu\text{m}$ , 面积为200  $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ , AlN和ZnO总厚度为2  $\mu\text{m}$ , 对具有不同厚度比的ZnO和AlN基模输入阻抗幅度进行仿真对比, 仿真过程中用到的参数如表2所示, 仿真结果如图2所示。

表2 复合双压电层FBAR仿真中用到的材料参数

材料	(短路)弹性 劲度常数 $C_{33}^E/\text{Pa}$	压电应 力常数 $e_{33}/\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$	夹持介电常数 $\varepsilon_{33}^S/\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$	密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
AlN <sup>[6]</sup>	$3.950 \times 10^{11}$	1.550	$9.500 0 \times 10^{-11}$	3 260
ZnO <sup>[7]</sup>	$2.109 \times 10^{11}$	1.321	$9.031 3 \times 10^{-11}$	5 680
多晶Al <sup>[8]</sup>	$1.110 \times 10^{11}$			2 695

从图2可以看出, 每条曲线都有一个串联谐振点( $f_s$ )和一个并联谐振点( $f_p$ ), 并且这两个谐振点比较接近, 且随着AlN厚度所占的比率的增加, 基模谐振频率增加逐渐加大。如果记AlN和ZnO的声速分别为 $V_{\text{AlN}}$ 和 $V_{\text{ZnO}}$ , 厚度分别为 $H_{\text{AlN}}$ 和 $H_{\text{ZnO}}$ , 总厚度为 $H$ , 则基模谐振频率可估算为:

$$f_p^1 \approx \frac{1}{2} \frac{1}{\frac{H_{\text{AlN}}}{V_{\text{AlN}}} + \frac{H_{\text{ZnO}}}{V_{\text{ZnO}}}} \quad (8)$$

记 $r = H_{\text{AlN}}/H$ , 此即AlN厚度所占的比率, 将其与已知关系 $H = H_{\text{AlN}} + H_{\text{ZnO}}$ 一起代入式(8), 得到:

$$f_p^1 \approx \frac{1}{2H} \frac{1}{\frac{r}{V_{\text{AlN}}} + \frac{1-r}{V_{\text{ZnO}}}} \quad (9)$$

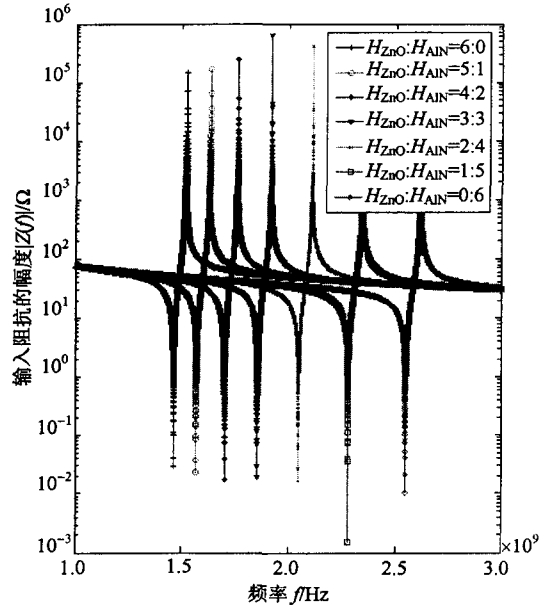


图2 不同ZnO与AlN厚度比的复合双压电层FBAR的基模输入阻抗的幅度特性比较

将式(9)对 $r$ 求一阶导数, 得到基模谐振频率增加的速度:

$$\frac{df_p^1}{dr} \approx \frac{V_{\text{AlN}} V_{\text{ZnO}} (V_{\text{AlN}} - V_{\text{ZnO}})}{2H[V_{\text{AlN}} - r(V_{\text{AlN}} - V_{\text{ZnO}})]^2} \quad (10)$$

观察式(10), 因为 $V_{\text{AlN}} > V_{\text{ZnO}}$ , 所以结果为正, 这说明随着AlN厚度所占比率的增加, 基模谐振频率逐渐增加。另外, 对式(10)进行微商, 得到:

$$d\left(\frac{df_p^1}{dr}\right) \approx \frac{V_{\text{AlN}} V_{\text{ZnO}} (V_{\text{AlN}} - V_{\text{ZnO}})^2}{H[V_{\text{AlN}} - r(V_{\text{AlN}} - V_{\text{ZnO}})]^3} dr \quad (11)$$

因式(11)右边 $dr$ 前面的因子为正, 所以随着AlN厚度所占比率的增加, 基模谐振频率增速逐渐加大, 该近似分析的结果和精确仿真的结果互为印证。

图3为相对带宽随ZnO和AlN的厚度变化规律的仿真结果。从图3中可以看出, 相对带宽随厚度比 $H_{\text{ZnO}}/H_{\text{AlN}}$ 的增加逐渐增加。因为ZnO的机电耦合系数比AlN的要大, 而机电耦合系数和相对带宽是近似成正比的, 所以 $H_{\text{ZnO}}/H_{\text{AlN}}$ 越大, ZnO所起的作用就越大, 导致相对带宽也越大。

为研究双压电层FBAR的电学输入阻抗的谐波特性, 选取了ZnO和AlN的厚度比为1:1的情况和AlN

单压电层情况以及ZnO单压电层情况进行了对比,其仿真结果如图4所示。

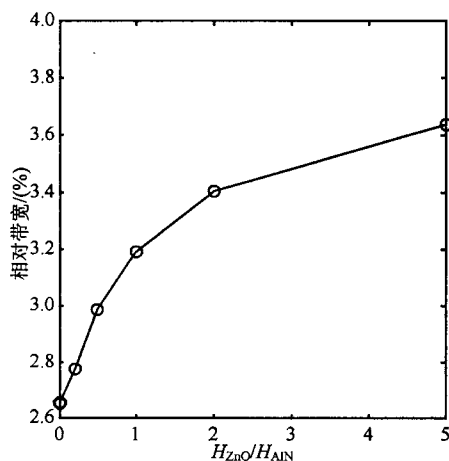


图3 复合双压电层FBAR的相对带宽随ZnO和AlN厚度比值的变化

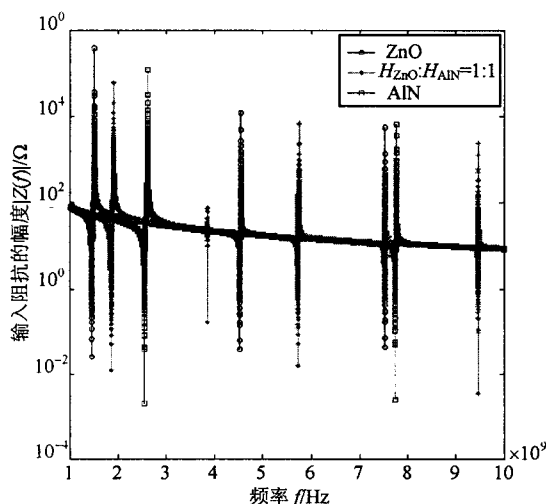


图4 复合双压电层FBAR与单压FBAR的电学输入阻抗幅度特性比较

从图4可以看出,复合双压电层FBAR的谐振特性与单压电层FBAR不同,它在奇数次谐波之间出现了相对较弱的谐波,并且这些谐波正好是偶次谐波。这些谐波的出现是由于在两压电层界面处的声波弱反射引起的。因为两压电界面处的声波反射,在总效果上相当于减少了一半的声路长度,从而产生相应的偶次谐波。另外,由表2可计算出AlN和ZnO的声学特性阻抗分别为 $Z_{AlN} \approx 3.7 \times 10^7 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 和 $Z_{ZnO} \approx 3.6 \times 10^7 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ,因而在这两种材料的界面处声学失配较小,故界面处的反射只能是一种弱反射,透射波是主要成分,表明它只能是弱谐振。

### 3 总 结

本文提出了一种新型的双压电层FBAR结构,推导出了其解析表达式,并以夹在Al电极之间的AlN和ZnO构成的双压电层为例进行了仿真。仿真结果表明,随着AlN厚度所占比率的增加,基模谐振频率增速逐渐加大;相对带宽随ZnO与AlN厚度比的增加而增加;复合双压电层FBAR的谐振特性与单压电层FBAR不同,它在奇数次谐波之间出现了相对较弱的偶次谐波。

### 参 考 文 献

- [1] LAKIN K. A review of thin-film resonator technology[J]. IEEE Microwave Magazine, 2003, 4(4): 61-67.
- [2] YLILAMMI M, ELLA J, PARTANEN M, et al. Thin film bulk acoustic wave filter[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2002, 49(4): 535-539.
- [3] CHAO M, HUANG Z, PAO S, et al. Modified BVD-equivalent circuit of FBAR by taking electrodes into account[C]//Proc IEEE Ultrason Symp. Munich, Germany: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2002: 973-976.
- [4] JAKKARAJU R, HENN G, SHEARER C, et al. Integrated approach to electrode and AlN depositions for bulk acoustic wave (BAW) devices[J]. Microelectronic Engineering, 2003, 70(2-4): 566-570.
- [5] LOBL H P, KLEE M, MILSOM R, DEKKER R, et al. Materials for bulk acoustic wave (BAW) resonators and filters[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2001, 21(15): 2633-2640.
- [6] KIRBY P, SU Q, KOMURO E, et al. PZT thin film bulk acoustic wave resonators and filters[C]//Frequency Control Symposium and PDA Exhibition. Eattle, WA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2001: 687-694.
- [7] KIRSHNAWARY S, ROSENBAUM J, HORWITZ S, et al. Film bulk acoustic wave resonator technology[C]//Proc IEEE Ultrason Symp. Honolulu, USA: IEEE, 1990: 529-536.
- [8] 金 浩. 薄膜体声波谐振器(FBAR)技术的若干问题研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2006.
- [9] JIN Hao. Study on some problems in thin film bulk acoustic wave resonator technology[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2006.
- [9] LUTSKY J. A sealed cavity thin-film acoustic resonator process for RF bandpass filters[D]. America: Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [10] PEREIRA D, ADLER E, MALOCHA D. Hypsaw sensitivity to film properties for ZnO/Diamond/Si structures[C]//Proc IEEE Ultrason Symp. San Juan: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2000: 283-286.
- [11] AULD B A. Acoustic fields and waves in solids[M]. New York: Wiley, 1973.