

薄膜体声波谐振器电极效应研究

张 涛,解 忱,刘 婷,周胜男

(西安科技大学 理学院,陕西 西安 710054)

摘 要: 运用传输线路法推导了薄膜体声波谐振器(Thin Film Bulk Acoustic Resonator, FBAR)的输入阻抗公式. 利用输入阻抗公式,研究了不同材料 FBAR 构成中电极材料和厚度对 FBAR 有效机电耦合系数的影响,FBAR 最大有效机电耦合系数优化理论. 由结论可知,FBAR 的有效机电耦合系数随电极的厚度和密度变化明显,在低密度电极材料时,电极厚度增大明显降低了 FBAR 的有效机电耦合系数;同时,在电极厚度较厚时,电极密度越大越有利于获取高的有效机电耦合系数. 所得结论,可应用于 FBAR 设计与优化中.

关键词: 薄膜体声波谐振器;电极效应;有效机电耦合系数

中图分类号: TB52;O42

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)10-0206-03

Research on Electrode Effects of Thin Film Bulk Acoustic Resonator

ZHANG Tao, XIE You, LIU Ting, ZHOU Sheng-nan

(College of Science, Xi an University of Science and Technology, Xi an 710054,China)

Abstract: The transmission line method is used to deduce the input impedance equation of thin film bulk acoustic resonator(FBAR) in this paper. The different combinations of FBAR are studied on by the equation, and the material and the thickness of electrode effects on FBAR are obtained, which includes the maximum effective electromechanical coupling factor theory. The results show that the effective electromechanical coupling factor verifies with the electrode and the density of the electrodes, and the electromechanical coupling factor descends with the thickness of electrodes, which is obvious if the density of electrode is small. On the other hand, the effective electromechanical coupling factor ascends with the density of electrodes, which is obvious if the thickness is large. These results can be applied in the design and the optimization of FBARs.

Key words: thin film bulk acoustic resonator;electrode effect; effective electromechanical coupling factor

1 引言

谐振器作为一种频率器件,以其谐振功能而被广泛应用于电子、通信、计算机、自动控制以及传感器等行业. 薄膜体声波谐振器 FBAR(Thin Film Bulk Acoustic Resonator)利用压电薄膜产生体声波,体声波在薄膜中传播形成振. 由于薄膜很薄,因而谐振频率可以达到吉赫兹,甚至几十吉赫兹,在高频段应用有突出优点,广泛用于谐振器、双工器、滤波器和传感器等众多领域,尤其是高频通信行

业^[1-2].

在上世纪 60 年代,就出现了体声波谐振器的概念,1965 年,Newell 制成了第一个布拉格反射层式的体声波谐振器^[3]. 1967 年 Slicker 和 Roberts 利用 CdS 薄膜制成了薄膜谐振器^[4]. 1980 年 Lakin 和 Wang 首次制成了基频为 435 MHz 的薄膜谐振器^[5]. 1990 年 Krishnaswamy 和 Rosenbaum 首次将 BAW 结构的滤波器扩展到吉赫兹范围^[6]. 而到了 1999 年,Agilent 公司的 Ruby 等人成功研发出应用于美国 PCS 1 900 MHz 频段的 FBAR 双工器^[1],

收稿日期: 2012-01-16; 修回日期: 2012-03-22

基金项目: 教育部博士点基金(20106121120001);中国博士后基金面上资助(20100471624);陕西省自然科学基金青年人才项目(2009JQ1005);陕西省教育厅产业化专项基金(2011JG10);西安市科技局工业攻关计划项目(CXY1125(8))

并于2001年正式批量生产.2005年Avago公司接手了Angilent公司的半导体事业部,截止到2006年1月,其FBAR生产量高达2亿余只,主要面向手机和数据卡市场,其最新的ACMD-7402双工器仅为 $3.8\text{ mm} \times 3.8\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$.

作为高频、高精度器件,设计并优化性能是FBAR理论研究的重点^[7-8].本文采用传输线法,推导出FBAR输入阻抗公式,研究电极效应对FBAR性能的影响规律.

2 传输线理论

薄膜体声波谐振器典型结构如图1所示.

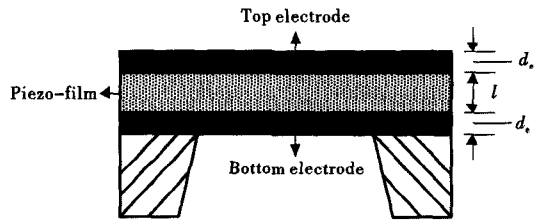


图1 横隔膜结构FBAR

利用传递矩阵原理,FBAR的阻抗传递矩阵如图2所示.

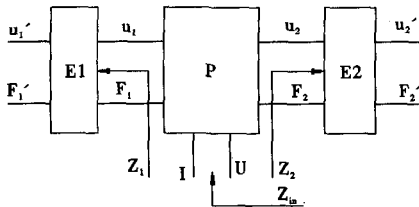


图2 阻抗传递矩阵图

P表示压电薄膜层,E1和E2分别表示顶电极和底电极.

利用传输线理论^[8],可推导出该结构FBAR的输入阻抗公式为

$$Z_{in} = \frac{U}{I} = \frac{1}{j\omega C_0} \cdot$$

$$\left[1 - \frac{k_{eff}^2}{\gamma} \cdot \frac{(z_1 + z_2) \cdot \sin\gamma + j \cdot 2 \cdot (1 - \cos\gamma)}{(z_1 + z_2) \cdot \cos\gamma + j \cdot (1 + z_1 \cdot z_2) \cdot \sin\gamma} \right], \quad (1)$$

式中, $z_1 = Z_1/Z_0$, $z_2 = Z_2/Z_0$.由输入阻抗公式(1)可计算FBAR的谐振频率和有效机电耦合系数等关键参量^[8].

3 理论仿真

利用所得阻抗公式研究PZT、ZnO和AlN压电薄膜与不同电极(Mo, Au, Al和Ag)组合下的

FBAR的有效机电耦合系数与电极的弹性参量之间的关系.

首先研究了电极的面密度($\rho_e d_e$)对有效机电耦合系数的影响.为使结果更有实际性,取电极与压电薄膜的面密度比率($m' = \rho_e d_e / \rho l$)为变量,取FBAR考虑电极效应时的有效机电耦合系数与忽略电极效应时($d_e = 0$)的有效机电耦合系数比率(k_{eff}^2 / k_{eff0}^2)为参量进行研究,十二种不同组合下的面密度影响曲线如图3所示.由图3可以看出,当电极的面密度远小于压电薄膜的面密度时,即($m' = \rho_e d_e / \rho l < 0.05$),不同电极材料对有效机电耦合系数的影响呈现相似的线性增长规律;随着面密度比率增大,不同组合下的有效机电耦合系数变化出现差异,但所有组合都呈现单峰值,即不同材料电极的面密度对有效机电耦合系数来说存在一个最优值 v .取以下三个参量来研究曲线的变化规律:(1)各曲线最大值 $k_{eff}^2 (m')$; (2)对应曲线极大值的面密度比率 $m'_c = (\rho_e d_e / \rho l)_c$; (3)曲线极值下降0.1 dB的带宽 $(\rho_e d_e / \rho l)_{-0.1\text{dB}}$.不同组合FBAR的三个研究参量如表1所示.

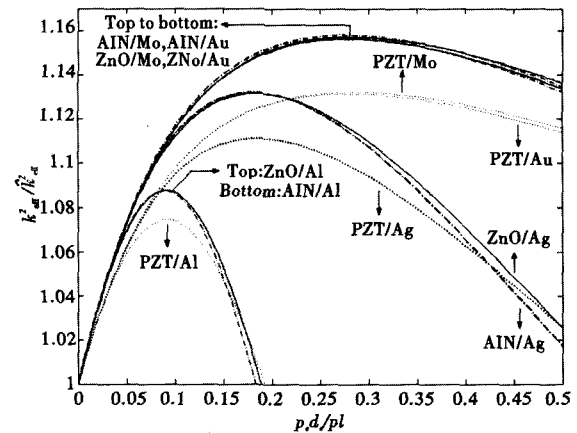


图3 不同组合下电极面密度对有效机电耦合系数的影响

表1 不同组合FBAR面密度影响曲线的特性参数

Piezo-film/ Electrode	$\frac{p_e v_e}{p v}$	$\left(\frac{k_{eff}^2}{k_{eff0}^2} \right)_{\max}$	$\left(\frac{p_e d_e}{p l} \right)_c$	$\frac{d_e}{l}$	$\left(\frac{p_e d_e}{p l} \right)_{-0.1\text{dB}}$
PZT/Al	0.49	1.07	0.09	0.26	0.06-0.13
ZnO/Al	0.49	1.09	0.09	0.19	0.06-0.12
AlN/Al	0.47	1.09	0.09	0.11	0.06-0.12
PZT/Au	1.83	1.13	0.28	0.11	0.16-0.45
ZnO/Au	1.80	1.16	0.28	0.08	0.17-0.43
AlN/Au	1.76	1.16	0.28	0.05	0.17-0.41
PZT/Mo	1.79	1.13	0.28	0.22	0.17-0.46
ZnO/Mo	1.77	1.16	0.28	0.16	0.17-0.43
AlN/Mo	1.73	1.16	0.27	0.09	0.17-0.42
PZT/Ag	1.09	1.11	0.18	0.13	0.11-0.27
ZnO/Ag	1.07	1.13	0.19	0.10	0.12-0.26
AlN/Ag	1.05	1.13	0.18	0.06	0.12-0.26

由图 3 和表 1 可看出,电极与压电薄膜的阻抗比率决定了不同组合下的面密度影响曲线的变化规律,其中也包括各曲线的极大值和极大值的位置,因为 PZT、ZnO 和 AlN 具有相近的声阻抗,因而电极的声阻抗就成为影响曲线的主要因素. 由电极的声阻抗大小可分为三组,从大到小依次为: (1) Au 和 Mo 电极; (2) Ag 电极; (3) Al 电极. 由图 3 可见,曲线的变化规律、极值大小、极值对应的位置和 -0.1 dB 带宽也按此规律变化,并且电极阻抗越大,相同面密度下有效机电耦合系数的增量就越大,极值对应的面密度越大,而 -0.1 dB 带宽越宽.

利用这些结果,可以对 FBAR 进行优化以获取最大的有效机电耦合系数. 例如一个由 AlN 压电薄膜和 Mo 电极构成的 FBAR,其谐振频率为 $f_p = 1.9$ GHz,则可利用式(2)来确定最大有效机电耦合系数时 Mo 电极的厚度.

$$f_p \cong \frac{V}{2l} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\rho_e d_e}{\rho l}\right)^{-1} \quad (2)$$

由表 1 可知,对应极大值时 $\rho_e d_e / \rho l = 0.27$,则由式(2)知,压电薄膜的厚度应为 $l = 1.89 \mu\text{m}$,则可知,电极厚度 $d_e = 0.17 \mu\text{m}$ 时,该 FBAR 有效机电耦合系数最大.

随着微加工工艺的发展,工艺上很容易制备 $1\sim 5 \mu\text{m}$ 厚的压电薄膜,也有成熟的技术对电极厚度进行修饰,精度可以高达纳米,因而该结论可应用于实际 FBAR 的设计与优化中.

研究与设计 FBAR,除了要考虑获取最大有效机电耦合系数外,还需要兼顾其他方面的指标,例如另一重要参数谐振频率. 利用所得的结论可通过在有效机电耦合系数峰值 $(\rho_e d_e / \rho l)_{-0.1\text{dB}}$ 带宽内适当改变压电薄膜或/和电极材料和厚度,较大范围地调整 FBAR 的谐振频率以兼顾较高的有效机电耦合系数和特定的谐振频率的要求. 仍以前面用的 1.9 GHz 的 FBAR 为例,其 -0.1 dB 带宽为 $(\rho_e d_e / \rho l)_{-0.1\text{dB}} = 0.17 \sim 0.42$,在这个范围取值可以保证有效机电耦合系数只下降 0.1dB ,则由式(2)可得,取下限 $(\rho_e d_e / \rho l)_{-0.1\text{dB}} = 0.17$ 时,AlN 压电薄膜的厚度应为 $l = 2.17 \mu\text{m}$,电极厚度应为 $d_e = 0.12 \mu\text{m}$;取上限 $(\rho_e d_e / \rho l)_{-0.1\text{dB}} = 0.42$ 时,AlN 压电薄膜的厚度 $l = 1.58 \mu\text{m}$,电极厚度应为 $d_e = 0.22 \mu\text{m}$,在这个范围内对压电薄膜和电极厚度进行修饰,可以有效地兼顾高有效机电耦合系数和特定的谐振频率.

4 结束语

本文利用传输线路法推导了 FBAR 的输入阻

抗公式,研究了电极效应对 FBAR 谐振频率及有效机电耦合系数的影响.

研究了电极面密度,电极厚度和密度对 FBAR 有效机电耦合系数的影响. 结论表明,当电极与压电膜面密度比率达到一定值时,FBAR 的有效机电耦合系数存在极大值,而该极大值相对理想情况(忽略电极效应)的有效机电耦合系数的增加值,以及该极大值所对应的面密度比率值,取决于电极对压电薄膜的阻抗比率;该结论以及电极厚度和密度对有效机电耦合系数影响的三维曲线可应用于实际 FBAR 的设计、制作和性能优化中.

参考文献:

- [1] Ruby R, Bradley P, Larson J D III, et al. PCS 1 900 MHz Duplexer using thin film bulk acoustic resonators (FBARs)[J]. Electronics Letters, 1999, 35(10): 794-795.
- [2] Zhang T, Zhang H, Wang Z, et al. Effects of electrodes on performance figures of thin film bulk acoustic resonators[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2007, 122: 1646-1651.
- [3] Newell W E. Face-mounted piezoelectric resonators[J]. Proceedings of the IEEE, 1965, 53(6): 575-581.
- [4] Sliker T R, Roberts D A. A Thin-film cdS-Quartz composite resonator[J]. Journal of Applied Physics, 1967, 38(5): 2350-2358.
- [5] Lakin K M, Wang J S. Acoustic bulk wave composite resonators[J]. Appl. Phys. Lett., 1981, 39(3): 125-127.
- [6] Krishnaswamy S V, Horwitz R J S, S. Horwitz. Film Bulk Acoustic Wave Resonator Technology[J]. IEEE Ultrason. Symp., 1990, 1(1): 529-536.
- [7] 王佩生,权海洋,张富强,等. 应用于 MEMS 陀螺中的 $\Sigma\Delta$ 高通级联型调制器设计[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(12): 47-50.
- [8] 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:自然科学版, 2010, 30(2): 251-254.

作者简介:

张涛男, (1977-), 博士后, 博士, 副教授, 硕士研究生导师. 研究方向为微型器件与技术.