

低温漂薄膜体声波谐振器研究

蒋世义¹, 蒋平英¹, 刘 娅¹, 甄静怡¹, 徐 阳¹, 彭 霄¹, 唐中剑²

(1. 中国电子科技集团公司 第二十六研究所, 重庆 400060; 2. 重庆青年职业技术学院 人工智能学院, 重庆 400712)

摘 要: 该文介绍了一种基于空腔结构的温度补偿型薄膜体声波谐振器(TC-FBAR)。通过在压电层上方生长 SiO₂ 温度补偿层, 实现谐振器的低温漂。未采用温度补偿的薄膜体声波谐振器, 其频率温度系数约为 $-25 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。通过适当的膜层结构设计, 可使其频率温度系数在 $\pm 3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。结果表明, 由于温度补偿层的增加, 导致器件总体压电效应降低, 使谐振器的有效机电耦合系数降低。低温漂谐振器的实现, 为窄带低温漂滤波器的研制提供了有效的设计和工艺技术支持。

关键词: 薄膜体声波谐振器(FBAR); 频率温度系数; 低温漂; 温度补偿

中图分类号: TN65; TN713; TN75 **文献标志码:** A

Study on Thin Film Bulk Acoustic Resonator with Low Temperature Drift

JIANG Shiyi¹, JIANG Pingying¹, LIU Ya¹, ZHEN Jingyi¹, XU Yang¹, PENG Xiao¹, TANG Zhongjian²

(1. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. School of Artificial Intelligence, Chongqing Youth Vocational & Technical College, Chongqing 400712, China)

Abstract: A temperature compensated thin film bulk acoustic resonator(TC-FBAR) based on cavity structure is introduced in this paper. By growing a temperature compensation layer (SiO₂) above the piezoelectric layer, the low temperature drift of resonator has been realized. The temperature coefficient of frequency of thin film bulk acoustic resonator without temperature compensation is about $-25 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Through proper film structure design, the temperature coefficient of frequency can be controlled within $\pm 3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. It is found that the overall piezoelectric effect of the device is reduced by adding a temperature compensation layer, resulting in the reduction of the effective electromechanical coupling coefficient. The realization of the low temperature drift resonator can provide supports of effective design and process for developing the narrow band filter with low temperature drift.

Key words: film bulk acoustic resonator(FBAR); temperature coefficient of frequency; low temperature drift; temperature compensation

0 引言

谐振器是阻抗元结构微声滤波器的基本单元。由于常规的微声谐振器具有一定的频率温度系数, 会导致滤波器在高低温工作下通带漂移, 为保证全温范围内通带的低损耗, 滤波器带宽常会大于信号带宽。谐振器频率温度系数越大, 实际制作的滤波器带宽需求越宽, 设计的滤波器带宽相对于信号带宽增加的部分, 本文称之为保护带宽。随着保护带宽的增加, 将降低滤波器对近端带外的抑制, 导致进入接收机的干扰信号增多, 影响整机信噪比及灵敏度, 同时降低了频率资源利用率。

空腔结构的薄膜体声波谐振器(FBAR)^[1]具有体积小, 品质因数高, 功率容量大及抗静电冲击能力强的优点, 其主要材料包括电极材料 Mo 和压电材料 AlN, 这两种材料都具有负频率温度效应。因此, 常规的 Mo-AlN-Mo 结构的 FBAR 的频率温度系数(TCF)约为 $-25 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 而半导体常用材料中, SiO₂ 的频率温度系数约为 $+85 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 可作为 FBAR 滤波器的温度补偿材料。通过设计合适的膜系结构, 对常规结构的 FBAR 温度效应进行补偿, 可将其 TCF 控制在较低的范围。

本文介绍了一种在压电层上生长 SiO₂ 温度补偿层的 FBAR 结构, 通过设计合适的厚度, 实现了谐振

收稿日期: 2022-03-15

基金项目: 重庆市教委科学技术研究基金资助项目(KJQN201904106)

作者简介: 蒋世义(1981-), 男, 重庆市人, 硕士, 主要从事微声技术及相关器件研发、设计及应用的研究。

频率 2 558.6 MHz、反谐振频率 2 590.7 MHz、频率温度系数 $2.44 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的低温漂 FBAR。由于温补层的增加,导致器件总体压电效应降低,使得器件的有效机电耦合系数降低到 3.1%。该低温漂谐振器的实现,为窄带低温漂滤波器的研制提供了有效的设计和工艺技术支持。

1 低温漂 FBAR 设计

1.1 膜层结构设计

目前国际上低温漂 FBAR 采用的温度补偿结构主要有:

- 1) 在压电材料与电极间生长 SiO_2 薄膜^[2]。
- 2) 在电极内埋入 SiO_2 薄膜,使电极形成三明治结构^[3]。

采用第 1) 种结构方式,虽然可获得较好的温度补偿效果,但由于 SiO_2 与压电层相邻,将降低器件的压电效应,导致谐振器的有效机电耦合系数降低,从而使得制作的滤波器带宽较窄。采用第 2) 种结构方式,虽然温度补偿效果较差,但其可减小温补层对压电层的影响,降低有效机电耦合系数减小的幅度。因此,膜层结构的选择将根据需实现滤波器的带宽及频率温度系数进行综合。本文介绍的低温漂谐振器是针对极窄带的温度补偿型滤波器应用,因此采用第 1) 种膜层结构,如图 1 所示。

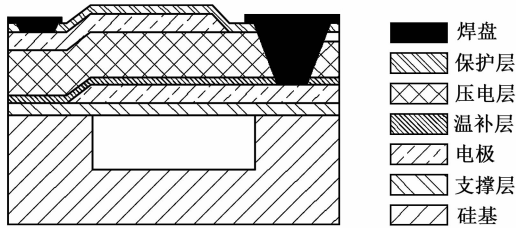


图 1 温度补偿型 FBAR 膜层结构示意图

1.2 设计模型优化

通常采用一维 Mason 模型^[4]或 MBVD 模型^[5]描述 FBAR 器件的特性。由于 MBVD 模型为电阻-电感-电容(R-L-C)等效模型,设计各膜层厚度不方便。因此,本文采用 Mason 模型进行谐振器的模拟计算。

图 2 为采用 Mason 模型建立的谐振器等效电路。种子层和保护层的边界均为空气界面,将声波能量限制在谐振器结构中。压电层有 2 个声学端口和 2 个电学端口,普通声学层具有 2 个声学端口,将压电层、普通声学层的等效电路级联,可得温度补偿型 FBAR 的 Mason 等效电路。

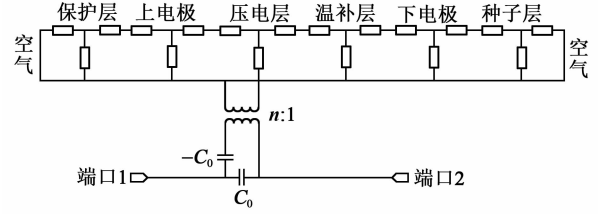


图 2 温度补偿型谐振器 Mason 模型

常规的 Mason 模型参数与温度无关,不能反映谐振器性能随温度的变化,所以需要对模型进行优化。

对于各向同性介质,弹性劲度常数^[6]为

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $c_{11} = c_{22} = c_{33}$ 。

在各向同性介质中,沿任意方向都可传播偏振方向相互垂直的 3 类平面波,包括 2 个横波(或称剪切波)和 1 个纵波。FBAR 利用的是纵波,其纵波声速 v_1 为

$$v_1 = \sqrt{c_{33}/\rho} \quad (2)$$

式中 ρ 为材料的密度。

FBAR 谐振器结构中,种子层、上下电极层、温度补偿层和保护层皆为各向同性介质。

AlN 压电薄膜为六方晶系,且在 FBAR 中声波传播方向沿晶轴 c 轴传播。在电场恒定时,AlN 压电薄膜的弹性劲度常数为

$$\mathbf{c}^E = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{12}^E & c_{22}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}^E & c_{13}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(c_{11}^E - c_{12}^E) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $c_{11}^E = c_{22}^E = c_{33}^E$ 。

压电应力常数为

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{x5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{x5} & 0 & 0 \\ e_{z1} & e_{z1} & e_{z3} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

夹持介电常数为

$$\boldsymbol{\epsilon}^S = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx}^S & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{xx}^S & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz}^S \end{bmatrix}$$

(5)

纵波声速为

$$v_1 = \sqrt{\frac{c_{33}^E + e_{z3}^2/\epsilon_{zz}^S}{\rho}}$$

(6)

将式(2)、(6)中的相关参数替换为与温度相关的参数,即可将常规的 Mason 模型优化为具备温度特性的模型,即 Mason_T 模型。

1.3 Mason 模型仿真

采用优化后的 Mason_T 模型对谐振器膜厚进行仿真计算,设置谐振器的谐振频率为 2 576 MHz,频率温度系数优于 $\pm 3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。综合频率和频率温度系数要求,设计的温度补偿型 FBAR 膜厚如表 1 所示。

表 1 温度补偿型 FBAR 膜厚

膜 层	膜层厚度/nm	膜 层	膜层厚度/nm
种子层	60	压电层	390
下电极	350	上电极	250
温补层	60	保护层	120

仿真计算的温度补偿型 FBAR 导纳值(Y 参数)如图 3 所示。图中, $Y_{1,1}$ 、 $Y_{2,2}$ 、 $Y_{3,3}$ 分别为 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时谐振器的导纳值。

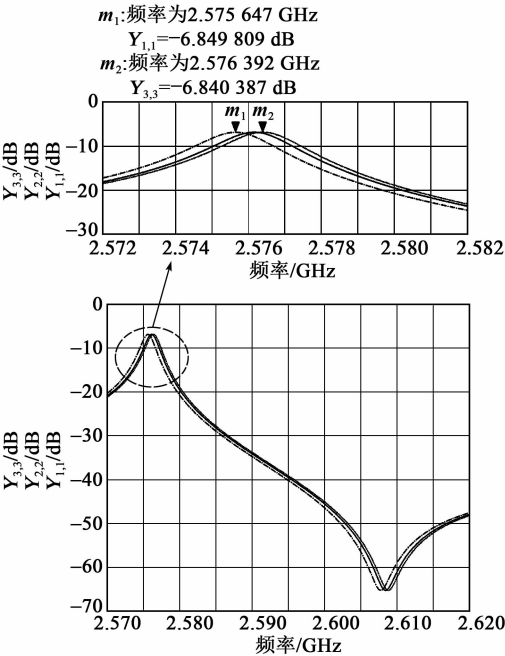


图 3 温补谐振器导纳仿真曲线

频率温度系数^[7]为

$$TCF = \frac{1}{f_{rT_0}} \times \frac{f_{rT_1} - f_{rT_0}}{T_1 - T_0}$$

(7)

式中: T_0 为最低工作温度; T_1 为最高工作温度; f_{rT_0} 为 T_0 时谐振器的谐振频率; f_{rT_1} 为 T_1 时谐振器的谐振频率。由式(7)可得此膜层结构下温度补偿型 FBAR 的 $TCF=2.07 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

2 低温漂 FBAR 制作

工艺上选用品质因数(Q)值较高的空腔结构,以实现更低的插损,具体工艺流程如图 4 所示^[8]。图 4(a)在 6 英寸(1 英寸=2.54 cm)高阻硅片上进行硅槽制备及氧化,并淀积牺牲层。图 4(d)采用等离子体增强化学气象沉积法(PECVD)生长温补层 SiO_2 ,采用磁控溅射生长压电层 AlN 。图 4(h)刻蚀释放孔并通过释放孔通道腐蚀牺牲层,最终形成空腔结构的温度补偿型 FBAR。

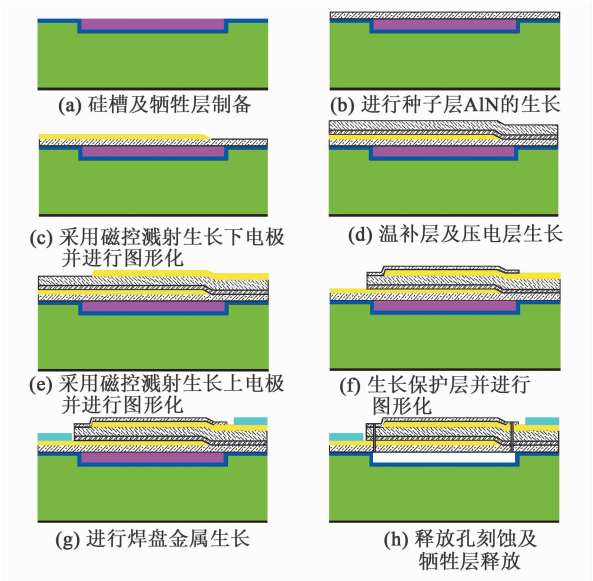


图 4 温度补偿型 FBAR 工艺流程图

在工艺过程中,通过分别控制各层薄膜应力及采用应力补偿方法,实现了复合薄膜的低应力制备,制作出结构完整的温度补偿型 FBAR。图 5 为温度补偿型谐振器芯片实物照片。图 6 为温度补偿型谐振器芯片剖面膜层结构。

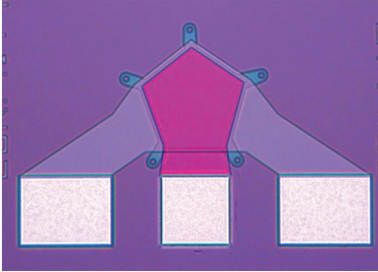


图 5 温度补偿型谐振器显微镜照片

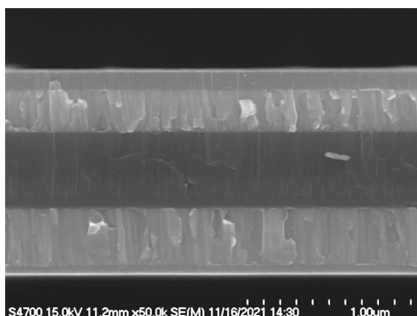


图6 温度补偿型谐振器剖面图

3 低温漂 FBAR 测试及分析

采用 GSG 探针及高低温探针台对谐振器进行了 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、室温(净化间温度约为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$)、 $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的电性能测试。3 种温度下导纳曲线实测图如图 7 所示。

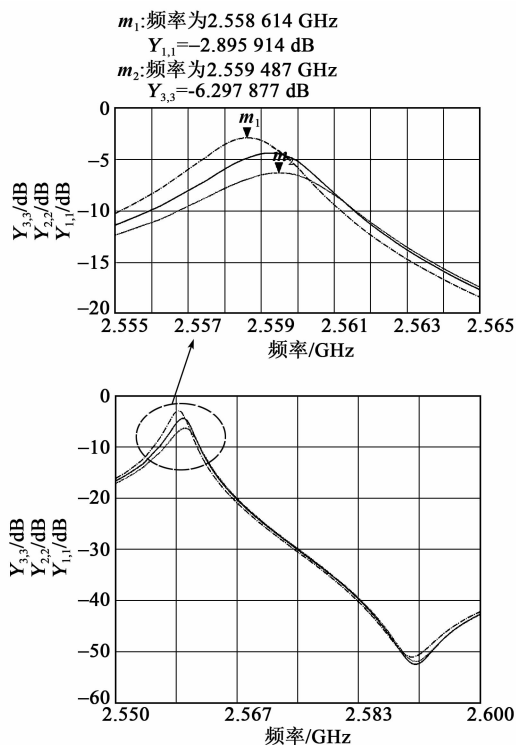


图7 温度补偿型谐振器3种温度下导纳测试图

根据式(7)计算可得, $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, 谐振器的频率温度系数为 $2.44 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 有效机电耦合系数为 3.1% 。

将图 7 与图 3 进行对比, 实测与仿真基本吻合。由于工艺过程中膜厚偏差, 导致了频率及频率温度系数与仿真值存在偏差。频率偏差可通过对保护层采用离子束调频进行修正, 频率温度系数的差异在可接受范围内。

4 结束语

本文介绍了一种温度补偿型 FBAR。谐振器采用优化的 Mason 模型进行温度特性仿真, 通过综合考虑频率和温度特性指标, 设计出满足要求的谐振器膜层及厚度, 并进行了器件的实际制作。通过测试及分析表明, 仿真结果与实测吻合较好。

采用本文所述的方法实现了低温漂 FBAR, 同时可准确衡量器件的频率温度特性。通过合理的设计, 可进一步实现低温漂的薄膜体声波滤波器。

参考文献:

- [1] ROSENBAUM J F. Bulk acoustic wave theory and devices[M]. Boston: Artech House, 1988.
- [2] ZOU Q, BI F, LAMERS T, et al. Temperature-compensated FBAR duplexer for band 13[C]// Czech Republic: Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium, 2013: 236-238.
- [3] ZHOU Bin, GAO Yang, HE Yi, et al. Simulation and analysis of the temperature-compensated FBAR[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 719/720: 490-495.
- [4] 金浩. 薄膜体声波谐振器(FBAR)技术的若干问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [5] III J D L, BRADLEY P D, WARTENBERG S, et al. Modified Butterworth-Van Dyke circuit for FBAR resonators and automated measurement system[C] // San Juan: Pro 2000 IEEE Ultrasonics Symposium, 2000: 863-868.
- [6] 张亚飞, 陈达. 薄膜体声波谐振器的原理、设计与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2010.
- [7] 中央军委装备发展部. GJB9889—2020 薄膜体声波器件通用规范[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2021.
- [8] 杜波. 空腔型体声波滤波器及其宽带化技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.