

薄膜体声波谐振器 Mason 模型参数的提取方法

张必壮,唐小龙,蒋平英,李华莉,廖书丹,刘 娅,刘 繁

(中国电子科技集团公司 第二十六研究所,重庆 400060)

摘 要:为了正确分析和设计薄膜体声波谐振器(FBAR)器件,需要对谐振器 Mason 模型中的仿真参数(如机电耦合系数、介电常数及粘滞系数等)进行准确提取。通过简谐近似,在 Mason 模型中引入了厚度方向位移的横向分量,提高了参数提取的准确性。使用谐振器开路和短路图形的散射参数,提取了探针及测试焊盘的等效电路参数,对谐振器进行去嵌。根据拟合得到的模型参数,仿真了中心频率为 5.43 GHz 的滤波器。结果表明,采用该方法提取的模型参数仿真结果和滤波器探针测试曲线的通带形状吻合较好。

关键词:薄膜体声波谐振器(FBAR);Mason 模型;参数提取;开路和短路去嵌

中图分类号:TN65 **文献标志码:**A

Extraction Method of Mason Model Parameters of Thin Film Bulk Acoustic Resonator

ZHANG Bizhuang, TANG Xiaolong, JIANG Pingying, LI Huali, LIAO Shudan, LIU Ya, LIU Fan

(The 26th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract:In order to correctly analyze and design thin film bulk acoustic wave resonator(FBAR), it is necessary to accurately extract the parameters(such as electromechanical coupling coefficient, dielectric parameters and viscosity coefficient etc.) of FBAR resonator in the Mason model. Through the simple harmonic approximation, the transverse component of the displacement in the thickness direction is introduced into the Mason model to improve the accuracy of the model. Using the scattering parameters of open and short graphics, the equivalent circuit parameters of probe and test pad are extracted to de-embed the resonator. The filter with center frequency of 5.43 GHz is simulated with the fitted model parameters. The results show that the simulation results of the mode parameters extracted by this method are in good agreement with the passband shape of the probe test curve of the filter.

Key words:thin film bulk acoustic wave resonator(FBAR);Mason model;parameter extraction;open and short de-embedding

0 引言

薄膜体声波谐振器(FBAR)滤波器具有工作频率高,功率承受强,矩形系数高和体积小等优点,被广泛应用于 4G/5G 移动通信射频前端。FBAR 滤波器的仿真设计精度主要取决于 FBAR 谐振器仿真模型及模型参数的准确性。FBAR 通常采用一维等效电路仿真模型(如 Mason 模型和 MBVD 模型)进行谐振器参数提取^[1-2]。MBVD 模型描述了一维谐振器在谐振频率处的电学性能,当电极厚度极小,只作为质量负载,且上、下电极厚度基本相同时,提取得到的模型参数才具有有效性^[3]。实际 FBAR 叠层除压电层、上电极和下电极外,还包括支撑层和调

频层等,且上、下电极厚度可不同。因而,采用 MBVD 等效电路模型难以获得准确的模型参数。一维 Mason 模型只关注厚度方向上的位移,可精确地描述一维无限多层结构谐振器的振动状态。FBAR 谐振器是面积有限的三维结构,具有长、宽及厚度 3 个方向的位移分量,且在不覆盖上、下电极的区域外,位移迅速衰减。为应用 Mason 模型提取真实谐振器的参数,Haopeng Wu 等^[2]和 Tiberiu Jamneal 等^[4-5]通过在一维 Mason 模型中增加基模与寄生模式间的耦合项以模拟谐振器中的寄生模态,并引入 MBVD 的集总元件用于谐振器性能参数提取。蔡洵等^[6]通过在一维 Mason 模型中引入有效机电耦

合系数(k_{eff}^2)、品质因数与谐振器形状因子的关系,以提升参数提取的准确性。

本文根据 FBAR 在受迫振动时的位移分布特征^[7],采用简谐近似的方式描述谐振器在长度和宽度方向上的位移分布对 Mason 模型进行改进。同时,运用开路、短路去嵌,提高改进后 Mason 模型参数提取的准确性。

1 一维 Mason 模型的改进

由于 FBAR 的能陷效应,谐振器中心电极区域和边缘无电极覆盖局域的位移分布特性不同,如图 1 所示。

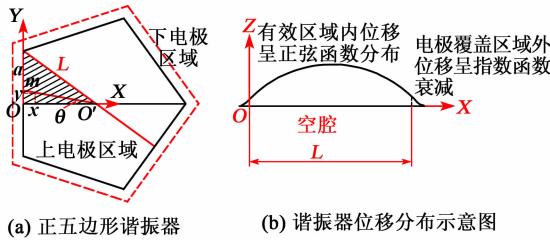


图 1 正五边形谐振器及其位移分布示意图

在正五边形谐振器有效区域内(上、下电极及空腔重叠区域),如图 1(a)所示,假设质点位移呈相同的正弦函数分布,区域外呈指数衰减。设 \$Z\$ 方向(厚度方向)上的位移分量为 \$u_z(z)\$, \$(X, Y)\$ 平面上的位移分量为 \$u(x, y)\$。假设 \$u(x, y)\$ 为简谐振动 \$u_x(x)\$ 绕谐振器边缘旋转后形成曲面,并且只考虑横波基模中参与耦合的部分,则任意 \$(X, Z)\$ 截面上,如图 1(b)所示,谐振器纵向位移在 \$X\$ 方向上的分布 \$u(x, z)\$^[8] 为

$$u(x, z) = u_x(x)u_z(z) = A \sin(\beta_x x') u_z(z) \quad (1)$$

式中: \$u\$ 为质点位移; \$u_x, u_z\$ 分别为 \$X\$ 和 \$Z\$ 方向上的位移分量; \$A\$ 为周期内质点振动的最大幅度; \$x'\$ 为考虑了有效区域外函数延伸部分的长度; \$\beta_x\$ (\$\beta_x > 0\$) 为横波传播的波数。

电极面的实际自由电荷 \$Q\$ 为

$$Q = \oint_S \mathbf{D}_z \cdot d\mathbf{S} = \int_S \left[\frac{\epsilon_{zz}^s V}{t} - \frac{e_{zz}^s}{t} (u_t + u_0) \sin(\beta_x x') \right] dS \quad (2)$$

式中: \$t\$ 为压电材料膜层厚度; \$S\$ 为谐振器的面积; \$\mathbf{D}_z, \epsilon_{zz}^s, e_{zz}^s\$ 分别为 \$Z\$ 方向上的电位移矢量、恒应变介电参数和恒应变压电应力常数; \$u_0, u_t\$ 分别为 \$z=0\$ 和 \$z=t\$ 端面垂直方向位移的最大幅度。

由压电方程和质点在 \$Z\$ 方向上的运动方程可

得,谐振器上、下电极两端的力学平衡条件为

$$\begin{cases} -F_0 = \int_S \left[c_{zz}^D \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)_{z=0} \right] \sin(\beta_x x') dS - \frac{e_{zz}^s}{\epsilon_{zz}^s} \int_S \mathbf{D}_z dS \\ -F_t = \int_S \left[c_{zz}^D \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)_{z=t} \right] \sin(\beta_x x') dS - \frac{e_{zz}^s}{\epsilon_{zz}^s} \int_S \mathbf{D}_z dS \end{cases} \quad (3)$$

式中: \$C_{zz}^D\$ 为 \$Z\$ 方向上的压电弹性刚度系数; \$F_0, F_t\$ 分别为谐振器 \$z=0, z=t\$ 端面上受到的合力。

由式(2)、(3)可看出,改进后的 Mason 模型多出一项对正弦函数的面积分:

$$\int_S \sin(\beta_x x') dS = 10 \int_0^a \int_0^{\tan 36^\circ} \sin \beta_x \left(m + \frac{\pi}{2\beta_x} - \frac{L}{2} \right) dx dy \quad (4)$$

其中:

$$y = \left(\frac{a}{\tan 36^\circ} - x \right) \tan \theta \quad (5)$$

$$m = \frac{x}{\cos \theta} = x \sqrt{\tan^2 \theta + 1} \quad (6)$$

式中: \$2a\$ 为正五边形谐振器的边长; \$L\$ 为有效区域长度。取通过图 1(a)中心 \$O'\$ 的直线,则有:

$$L = \frac{a}{\tan 36^\circ \cos \theta} + \frac{a}{\tan 36^\circ \cos(36^\circ - \theta)} \quad (7)$$

将式(5)~(7)代入式(4)化简可得:

$$\int_S \sin(\beta_x x') dS = 10 \int_0^{36^\circ} \left[\frac{a^2}{2B^2 \tan^2 36^\circ} \sin B \cdot \sin \left(\frac{B}{\cos 36^\circ + \sin 36^\circ \tan \theta} \right) \right] d\theta \quad (8)$$

其中:

$$B = \frac{a\beta_x \sqrt{\tan^2 \theta + 1}}{2 \tan 36^\circ} \quad (9)$$

假设声波在电极覆盖区域外的衰减系数为 0,有效区域外无位移,采用 \$x=0\$ 和 \$x=L\$ 处的位移连续边界条件,可得到谐振器的谐振条件^[8] 为

$$\beta_x \tan(\beta_x L) = 0 \quad (10)$$

由式(10)解得横向振动的波数 \$\beta_x = n\pi/L\$ (\$n=1, 2, \dots\$)。若只考虑谐振器的基模,式(8)的积分计算可得:

$$\int_S \sin(\beta_x x') dS \approx 0.817S \quad (11)$$

为提取不同膜层结构谐振器的损耗参数,通过在 Mason 模型中引入了材料参数(粘滞系数 \$\eta\$ 和复

介电参数 ϵ''_{∞})来表征谐振器的机械损耗和介电损耗。为了表示谐振器电极和连接线的电阻、电感,引入了电阻 R_s 和电感 L_s 。图2为改进后的压电层的一维 Mason 模型等效电路。

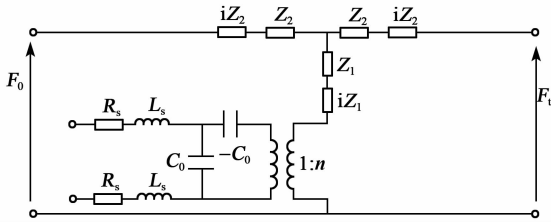
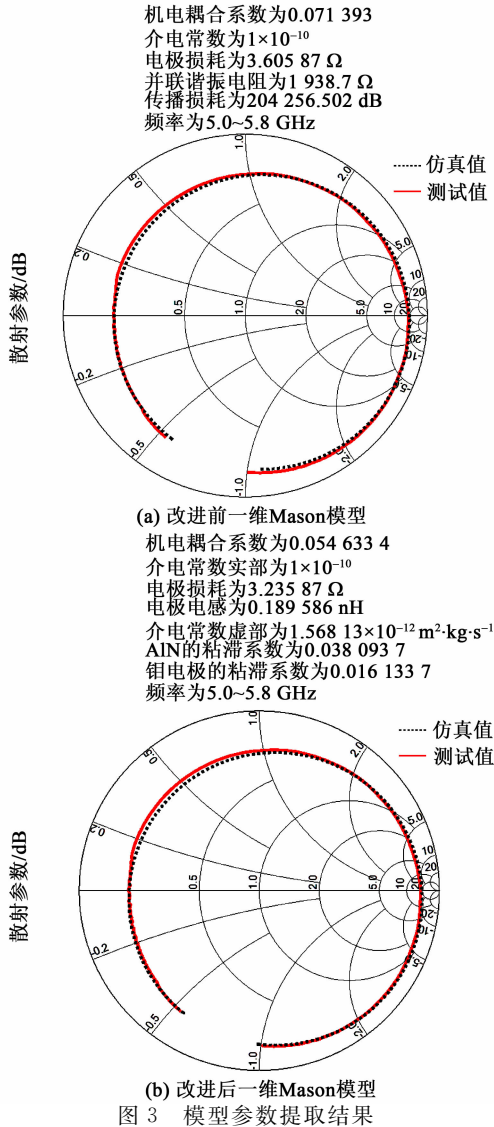


图2 改进后的一维 Mason 模型

2 模型参数提取

基于改进前后的 Mason 模型,对谐振频率为 5.273 GHz、面积为 $2\,500\,\mu\text{m}^2$ 谐振器的测试曲线进行了拟合。图3为改进前后一维 Mason 模型提取



得到的模型参数,拟合残差均小于 2×10^{-4} 。拟合结果表明,改进前一维 Mason 模型拟合得到的 AlN 薄膜机电耦合系数 $k_t^2 = 7.14\%$,改进后模型拟合得到的 $k_t^2 = 5.46\%$,介电常数约为 11.2。

将拟合得到的参数代入滤波器仿真模型中,其余模型参数保持不变,与中心频率为 5.43 GHz 的实测滤波器散射参数进行对比验证,如图4所示。由图可看出,2个模型提取参数的仿真结果与实测滤波器通带带宽及形貌偏差较大,因此需要对参数提取方法做进一步改进。

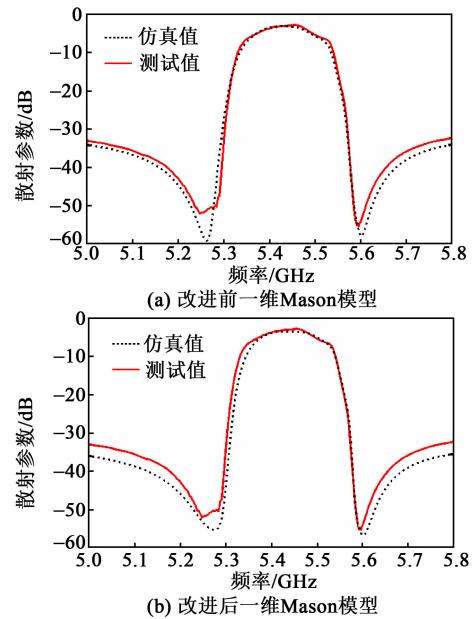


图4 滤波器仿真与实测散射参数对比

3 谐振器测试参数去嵌

GSG 共面探头信号(S)探头的电场终止于两侧的接地(G)探头,S和G之间的磁场取消,在探测不平衡负载时,测量误差较小,是 FBAR 器件测试的常用配置。

谐振器的 GSG 测试焊盘如图5(c)所示。在测试谐振器性能前,通常使用 SOLT 校准标准对测试系统进行校准,以消除电缆、网络分析仪、夹具及 GSG 探头至校准平面(GSG 探头尖端)产生的信号路径误差,但测试焊盘和连接线引入的寄生仍包含在谐振器的散射参数中。因此,为准确提取谐振器的参数,需要去除测试结果中寄生参数的影响。图5(a)、(b)分别为面积为 $2\,500\,\mu\text{m}^2$ 并联谐振器的开路 and 短路去嵌图形。在开路去嵌图形中,谐振器的上电极与下电极断开,不重叠;在短路去嵌图形中,采用铝电极连通上下电极。

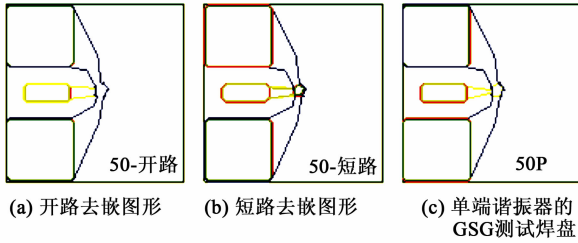
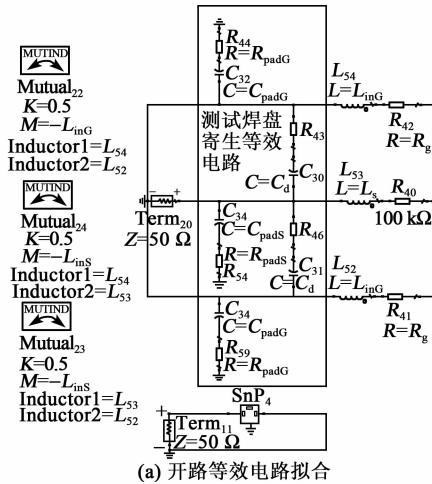
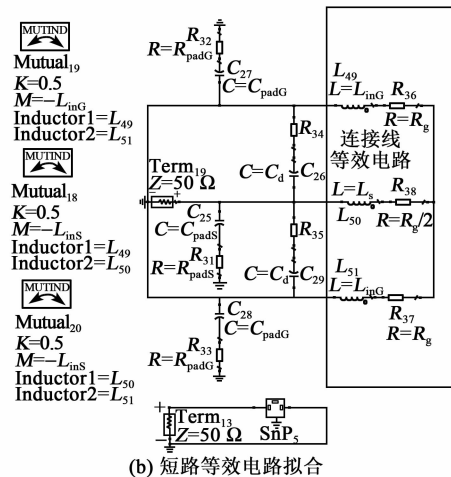


图5 开路、短路及谐振器版图

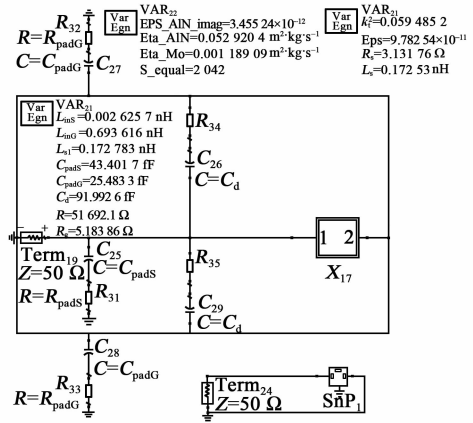
图6为开路、短路及谐振器测试图形的等效电路图^[9]。图6(a)中方框部分代表GSG测试焊盘的寄生参数,其中 R_{padS} 、 R_{padG} 、 C_{padS} 和 C_{padG} 分别为S或G焊盘到衬底的电阻和电容, R 、 C_d 分别为S和G焊盘之间的电阻和电容。图6(b)中方框部分代表电极电感的等效电路, L_{inG} 为输出电极的电感,其值与2个输出电极电感间的耦合电感相同^[10], L_s 为输入电极的电感, R_g 为输出电极的电阻, R_s 为输入电极电阻,且 $R_s = R_g/2$ 。通过对开路和短路图形S参数的拟合,可获得GSG焊盘寄生参数、连接电极的电感和电阻。图6(c)将GSG焊盘等效电路与谐振



(a) 开路等效电路拟合



(b) 短路等效电路拟合

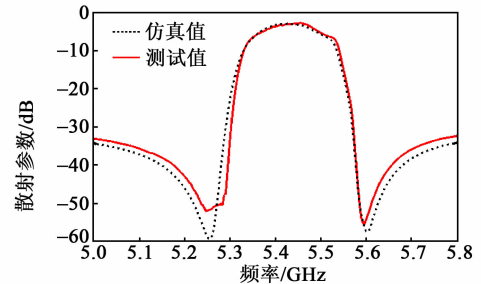


(c) 谐振器拟合去嵌

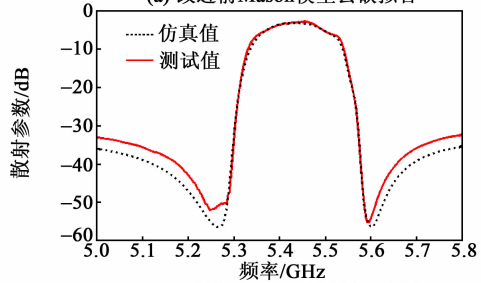
图6 拟合去嵌等效电路

器的 Mason 模型连接,对谐振器参数进行提取。拟合时,GSG 焊盘等效电路参数固定,将开路和短路拟合得到的 R_s 、 L_s 作为 Mason 模型的初值。拟合得到的模型参数为变量 V_{AR21} 和 V_{AR22} ,如图6(a)所示。由模型拟合得到厚360 nm AlN 薄膜的 $k_t^2 = 5.95\%$ (与 AlN 材料的理论值 6% ^[11]接近),介电常数为11.0,介电损耗为0.035,粘滞系数为0.053。Mo 电极的粘滞系数为 $0.0012 \text{ m}^2 \cdot (\text{kg/s})$ 。

图7为改进前后模型应用开路和短路去嵌提取的模型参数仿真结果与实测结果对比。



(a) 改进前Mason模型去嵌拟合



(b) 改进后Mason模型去嵌拟合

图7 去嵌后模型参数仿真结果与实测滤波器散射参数对比

比较图7(b)、4(b)可以看出,采用去嵌的方式提高了提取模型参数的准确性,仿真通带与实测数据更接近。但图7(b)中仿真的带外与实测值差距

较大,需进一步改进拟合模型。同时为了对比模型对模型参数提取的影响,同样采用改进前的 Mason 模型去嵌拟合了谐振器参数,如图 7(a)所示。对比图 7(a)、4(a)还可看出,仿真结果的通带与实测数据仍相差较大,且左边过渡带拟合相差更远,表明改进后的 Mason 模型和去嵌的拟合方式需要结合使用才能有效地提升了模型参数提取的准确性。

4 结束语

通过假设厚度方向位移在正五边形面积谐振器长度和宽度的位移为简谐运动,建立了 Mason 模型。采用改进后的模型拟合谐振器散射参数,并建立了开路 and 短路等效电路对谐振器参数进行去嵌,拟合可得到谐振频率为 5.273 GHz,面积为 $2\,500\,\mu\text{m}^2$ 谐振器的机电耦合系数、介电常数、介电损耗及粘滞系数等模型参数。利用改进后的 Mason 模型,并使用开路和短路去嵌方法提取得到的模型参数,仿真了中心频率为 5.43 GHz 的滤波器。结果表明,仿真曲线与探针测试散射参数吻合较好。

参考文献:

- [1] III J, OSHRNYANSKY Y. Measurement of effective k_t^2 , q , R_p , R_s vs. temperature for Mo/AlN FBAR resonators[J]. Ultrasonics Symposium, IEEE, 2002, 1: 939-943.
- [2] WU H, CAI X, WU Y, et al. An investigation on extraction of material parameters in longitudinal mode of FBAR[J]. Circuits and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions on, 2020, 67(6): 1024-1028.
- [3] CHAO M C, HUANG Z N, PAO S Y, et al. Modified BVD-equivalent circuit of FBAR by taking electrodes into account[J]. Ultrasonics Symposium, 2002, 1: 973-976.
- [4] JAMNEALA T, BRADLEY P, KOELLE UB, et al. Modified mason model for bulk acoustic wave resonators[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2008, 55(9): 2025-2029.
- [5] JAMNEALA T, KIRKENDALL C, IVIRA B, et al. The main lateral mode approximation of a film bulk acoustic resonator with perfect metal electrodes[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2018 (99): 1.
- [6] 蔡洵, 高杨, 黄振华. 薄膜体声波谐振器性能模型参数的提取方法[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 064133.
- [7] 杜波, 马晋毅, 蒋欣, 等. 薄膜体声波谐振器有限元仿真与设计[J]. 压电与声光, 2016, 38(4): 531-534.
DU Bo, MA Jinyi, JIANG Xin, et al. Finite element simulation and design of film bulk acoustic wave resonators[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(4): 531-534.
- [8] HASHIMOTO K Y. RF bulk acoustic wave filters for communications[J]. Microwave Journal, 2009, 52(11): 158.
- [9] WARTENBERG S A. Selected topics in RF coplanar probing[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2003, 51(4): 1413-1421.
- [10] JAMNEALA T, BRADLEY P D, FELD D A. Employing a ground model to accurately characterize electronic devices measured with GSG probes[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2004, 52(2): 640-645.
- [11] MANNA S, BRENNECKA G L, STEVANOVIĆ V B, et al. Tuning the piezoelectric and mechanical properties of the AlN system via alloying with YN and BN[J]. J Appl Phys, 2017, 122(10): 105101.