

体声波谐振器质量负载等效电感的量化方法

尹汐漾¹, 高杨², 韩宾¹, 黄振华¹

(1. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010; 2. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要:体声波(BAW)谐振器受到质量负载时,谐振器的 Butterworth Van Dyke(BVD)电路模型中会增加 1 个质量负载等效电感,为得到该电感与负载质量的量化关系,以便对 BAW 传感器进行系统行为仿真,该文提出了 3D 多物理场—等效电路仿真对比建模的方法。通过对比 COMSOL Multiphysics 软件的 3D 多物理场仿真结果与 ADS 的等效电路仿真结果得到质量负载等效电感和负载质量的量化关系。以一个薄膜体声波谐振器(FBAR)为例,介绍了该方法的详细过程,并得到案例中的量化关系为:质量负载等效电感每增加 1 nH,负载质量增加 0.1 ng。最后将该量化关系应用于基于 Pierce 振荡器的 BAW 传感器检测电路的系统级行为仿真。仿真结果表明,质量负载等效电感每增加 1 nH,振荡频率减小 6 MHz,即振荡频率的变化情况与等效电路仿真结果相吻合,从而验证了该检测电路能用于 BAW 传感器的频率信号的检测。该量化方法同样适用于石英晶体微天平(QCM)。

关键词:体声波谐振器;体声波传感器;MBVD 模型;Pierce 振荡器;检测电路

中图分类号:TN65;TN751.2;TN752.5 **文献标识码:**A

Mass-loading Equivalent Inductor Quantification Method for BAW Resonator

YIN Xiyang¹, GAO Yang², HAN Bin¹, HUANG Zhenhua¹

(1. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: If bulk acoustic wave (BAW) resonator under mass loading, an mass loading equivalent inductor will be added in Butterworth Van Dyke (BVD) circuit model of the resonator. In order to get the quantitative relation between the inductor and the mass, so that we can carry on the system level behavior simulation of BAW sensor, the comparative modelling method between the 3D multiphysics simulation and the equivalent circuit simulation is proposed. The quantitative relation between mass loading equivalent inductor and the mass is got by comparing the results of the 3D multiphysics simulation in COMSOL Multiphysics software and results of the equivalent circuit simulation in the ADS software. Instanced with a film bulk acoustic resonator (FBAR) case, detailed application procedures of the method is introduced. Accordingly, quantitative relation in this case is that the effect of 1 nH added in mass loading equivalent inductance is equal to the effect of 0.1 ng added in mass. At last, the quantitative relation are used in BAW sensor detection circuit which based on Pierce oscillator for the system-level behavior simulation, the results show that the decrease of oscillation frequency is 6 MHz due to the increase of per 1 nH in mass loading equivalent inductance, i. e. the change of the oscillation frequency and the equivalent circuit simulation results are identical with each other. Accordingly, the results validated that the detection circuit can be used for BAW sensor frequency signal detection. The quantitative method is also applicable to quartz crystal microbalances (QCM).

Key words: BAW resonator; BAW sensor; MBVD model; Pierce oscillator; detection circuit

0 引言

薄膜体声波谐振器(FBAR)是一种电声谐振器,具有高灵敏度、高工作频率(吉赫兹)和低功耗等

优点^[1],其在传感器领域的应用正引起人们广泛关注。目前,基于 FBAR 的高性能换能器或传感器(如 DNA 和蛋白质检测器^[2]、气体传感器^[3]、微区

收稿日期:2016-03-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61574131);中国工程物理研究院超精密加工技术重点实验室重大基金资助项目(2014ZA001);西南科技大学特殊环境机器人技术四川省重点实验室开放基金资助项目(14zxtk01);重庆大学新型微纳器件与系统技术国防重点学科实验室访问学者基金资助项目(2013MS04);中国工程物理研究院电子工程研究所创新基金资助项目(S20141203);西南科技大学研究生创新基金资助项目(15ycx125,15ycx122,15ycx123)

作者简介:尹汐漾(1991-),男,四川达州人,硕士生,主要从事射频微电子机械系统的研究。E-mail:yin_xiyang@foxmail.com。通信作者:高杨(1972-),男,四川绵阳人,研究员,博士,主要从事微电子机械系统的研究。E-mail:gaoyang@caep.cn。

质量检测器^[4]及 FBAR 微加速度计^[5]等)已有报道,这些传感器可统称为体声波(BAW)传感器。石英晶体微天平(QCM)也属于 BAW 传感器,只是工作频率较低。BAW 传感器的工作原理为谐振器的谐振频率在待测物理量的作用下进行变化,通过检测谐振频率的变化得到待测物理量。文献[6]报道了一种 BAW 压力传感器,将 FBAR 和检测电路集成在 1 个芯片中,实现了单片集成,利用 Pierce 拓扑结构的检测电路对 BAW 传感器进行检测证明了其可行性。对于 1 个 BAW 质量传感器,也可采用这种拓扑结构的检测电路。在对该检测电路进行仿真时,由于电路中无直接表示负载质量的元件,振荡频率的改变无法确定是由多少质量的负载引起的。因此,如果要对 BAW 质量传感器进行系统级行为仿真,需要在电路中找到 1 个可等效负载质量的元件。文献[7]提出,在 BAW 谐振器中,由质量负载效应会引起 BVD 等效电路模型中增加 1 个电感(质量负载等效电感),该电感与负载质量有关系,并推导出了含有此关系的等式,但等式中增加了 1 个变量——谐振频率,电感、质量和谐振频率三者相互制约,所以就无法将该等式用于系统级行为仿真。因此,本文提出了 3D 多物理场-等效电路仿真对比建模的方法,得到了只包含质量负载等效电感和负载质量的量化关系。并设计了基于 Pierce 振荡器的 BAW 传感器检测电路,将该量化关系用于此检测电路进行了系统级行为仿真。

1 原理与方法

BAW 谐振器由于对很多物理量敏感,因此可作为不同的传感器。在以质量作为检测对象的 BAW 传感器中,常见的有 FBAR 质量传感器、FBAR 生化传感器及 QCM 传感器等,它们均是由顶、底电极及夹在二者之间的压电材料构成的一个结构类似于三明治的谐振器。QCM 的压电材料为石英,而 FBAR 的压电材料为其他频率更高的压电材料,且需在三明治结构的下方人为构造声波限制边界,图 1 为空腔型 FBAR。FBAR 有 3 种构造方

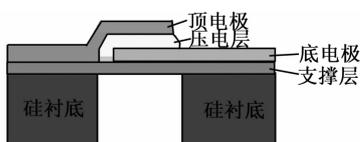


图 1 FBAR 的截面示意图

式,理论上对于任何一种构造方式的 FBAR 都能用于 BAW 质量传感器。

BAW 质量传感器检测电路的检测对象为 QCM 或 FBAR,它们常用电学模型有 Mason 模型和 MBVD 模型(QCM 常用 BVD 模型,为叙述方便,文中均用 MBVD 表示,若检测对象为 QCM 可自行将其替换为 BVD 模型即可)。虽然 Mason 模型可将器件的物理结构和电学仿真结合起来,实现质量和谐振频率的对应关系,但不能用于检测电路的瞬态仿真。瞬态仿真在时域中进行,而 Mason 模型在频域进行仿真。因此,只能采用 MBVD 模型进行等效电路仿真。由于 MBVD 模型电路无法直观表现出质量的大小,为对 BAW 质量传感器进行系统级行为仿真,只能通过电路元件的改变来代表质量的变化。根据文献[7]中的理论得知,体声波谐振器作为质量传感器时,当在谐振器上施加 1 个一定质量的负载时,其 BVD 模型中会增加 1 个由质量负载效应引起的电感 L_1 (本文称其为质量负载等效电感),如图 2 所示。虽然文献[7]推导出了 L_1 和负载质量的关系,但其电感、质量和频率三者互相制约,因此,无法判断所加负载的大小,即 L_1 的具体值不知道是由多少质量的负载引起的。为得到 L_1 与 m 的关系,以便对 BAW 质量传感器进行系统级行为仿真,本文提出了 3D 多物理场-等效电路仿真对比建模法。

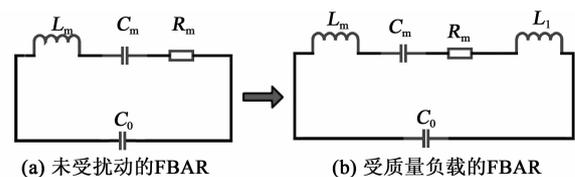


图 2 BVD 等效电路模型在质量负载条件下的变化

图 3 为 3D 多物理场-等效电路仿真对比建模法的流程图。其步骤为:

1) 在 COMSOL Multiphysics 软件中建立 BAW 谐振器的 3D 多物理场模型,并通过频域仿真得到谐振器的阻抗特性曲线。

2) 根据阻抗特性曲线提取 MBVD 模型参数。

3) 根据提取得到的 MBVD 模型参数在 ADS 软件中建立 MBVD 等效电路模型,通过 S 参数仿真得到谐振频率,并将此频率与 3D 模型仿真所得频率进行对比,若不吻合则证明模型参数的提取过程中出现了错误,则返回第 2) 步。

4) 在 3D 模型中构建质量负载层,通过增加质量负载层的厚度来达到增加负载质量的效果,仿真得到不同质量对应的串联谐振频率;同时在 MBVD 模型中新增 1 个质量负载等效电感,逐渐增加电感值,仿真得到不同电感对应的串联谐振频率。

5) 第 4) 步中的每个谐振频率均对应一组质量和电感,找出多个谐振频率对应的多组仿真实验数据进行拟合和分析,最终得到负载质量和质量负载等效电感的定量关系。

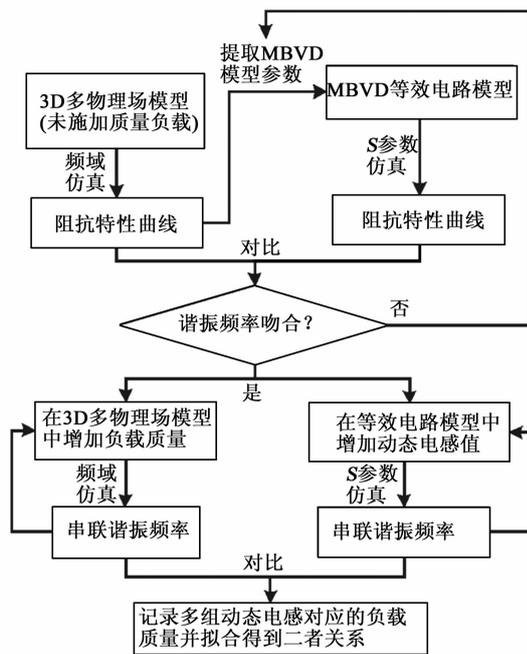


图 3 3D 多物理场-等效电路仿真对比建模方法的技术路线图

2 案例仿真与分析

在 3D 多物理场-等效电路仿真对比建模法中,3D 多物理场仿真采用 COMSOL Multiphysics 软件建模,等效电路仿真采用 ADS 软件建模。以 1 个 FBAR 为例,将其作为质量传感器,通过分别建立负载质量、质量负载等效电感与谐振频率的关系,最终拟合得到负载质量与质量负载等效电感的定量关系。

2.1 负载质量与谐振频率的关系

FBAR 的 Mason 电路模型直接把器件的物理结构和电学仿真联系起来,仿真时可调节 FBAR 的结构参数从而得到不同的阻抗特性^[8]。3D 多物理场模型建立前需确定 FBAR 的结构参数,具体操作可根据文献^[9]建立的初始 Mason 模型,通过调节

Mason 模型中各膜层的厚度,使其谐振频率满足设计的工作频率。本文设计的 FBAR 的工作频率约 2 GHz,仿真得到 FBAR 的结构参数如表 1 所示。根据表 1 的结构参数建立了 3D 多物理场模型,如图 4 所示。该模型适用于通孔型和气隙型 FBAR,固体装配型 FBAR 需要在其底部建立布喇格反射层。而通孔型和气隙型 FBAR 无需建立用于形成空腔的衬底,是因为 COMSOL Multiphysics 软件默认 FBAR 底部为空腔,因此,建立衬底与否都不会对仿真结果产生影响。

表 1 FBAR 的结构参数

材料	厚度/ μm	面积/ μm^2	密度/ (kg/m^3)
Al	0.599	100×100	2 700
AlN	1.000	150×150	3 300
Pt	0.122	150×150	21 450
Ti	0.020	150×150	4 506
Si_3N_4	0.200	150×150	3 100
SiO_2	0.300	150×150	2 200

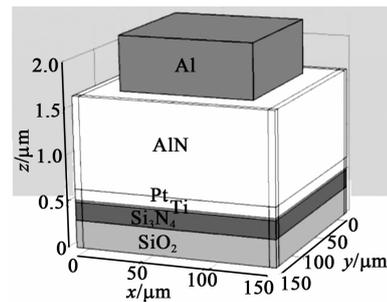


图 4 FBAR 的三维多物理场模型

3D 多物理场模型建立后,进行频域仿真得到 FBAR 的阻抗特性曲线,根据阻抗特性曲线提取 MBVD 模型参数(提取方法可参考文献^[10])。为验证提取得到的 MBVD 模型参数的正确性,根据提取得到 MBVD 模型参数,在 ADS 中建立 FBAR 的 MBVD 模型电路并进行 S 参数仿真,得到 FBAR 的串、并联谐振频率分别为 2 049 MHz、2 090 MHz,与 3D 多物理场仿真所得谐振频率吻合,从而验证了提取得到的 MBVD 模型参数的正确性。

为得到不同负载质量对应的谐振频率 f ,在 FBAR 顶电极上施加不同质量的负载,具体通过在 3D 多物理场模型顶电极上多构建一层金属钛,通过改变钛的厚度来控制其质量,厚度每变化一次进行一次仿真,得到一组串、并联谐振频率(f_s 、

f_p), 最后通过数据拟合得到质量与 f 的关系, 如图 5 所示。

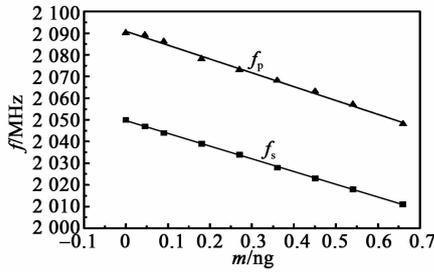


图 5 谐振频率随负载质量的变化

本文所设计的 FBAR 的工作频率约 2 GHz, 经典的 Sauerbrey 方程为

$$\frac{\Delta f}{f} \approx -\frac{\Delta m}{M} \quad (1)$$

式中: Δf 为谐振频率的变化量; Δm 为负载质量的变化量; M 为压电层的质量。

由式(1)可知, BAW 谐振器的谐振频率偏移量与负载质量的大小成线性关系, 负号表示负相关。但 Sauerbrey 方程成立有一个微扰动的前提, 若电极吸附的质量过大(超过 M 的 2%), 则认为谐振器过载, 方程不再适用。方程成立的条件是等式两边的比值均小于 2%, 由式(1)计算可得, 对于 1 个 2 GHz 的谐振器, 由质量负载引起的最大频偏约为 40 MHz, 且负载质量不超过 0.66 ng, 在仿真中需注意负载质量的范围。由图 5 可看出最大频偏约为 40 MHz, 最大负载质量变化约 0.66 ng。

在传感器的检测中, 研究者更倾向于检测 f_s , 因为 f_s 不易受谐振器外部电路元件的影响。而并联在 C_0 两端的寄生电容会影响 C_0 , 从而影响 f_p [7]。因此, 选择 m 与 f_s 的拟合直线:

$$f_s = -58.7833m + 2049.632 \quad m < 0.66 \quad (2)$$

2.2 质量负载等效电感 L_1 与 f 的关系

为得到由 L_1 与 f 的关系, 需在 MBVD 模型中增加质量负载等效电感, 考虑到仿真的方便性, 可将 L_m 的值设为变量, L_m 的变化量就代表 L_1 , 无需在电路中添加新的电感。如图 6 所示, 将 L_m 设为可调谐值, 调谐 L_m 的同时, 阻抗特性曲线会随着 L_m 的变化而变化, 即可直观得到不同的 L_m 对应不同的 f_s 。最终通过拟合得到 L_m 与 f_s 关系为线性, 如图 7 所示。

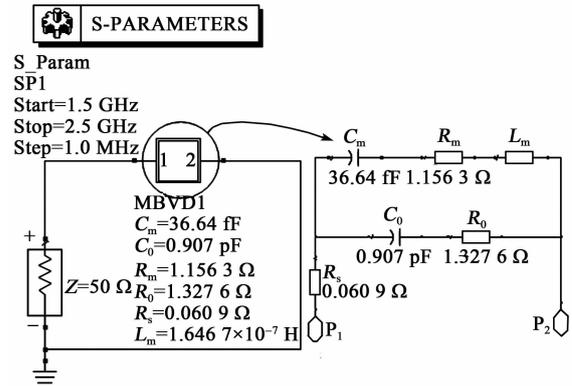


图 6 MBVD 二端口模块的 S 参数仿真

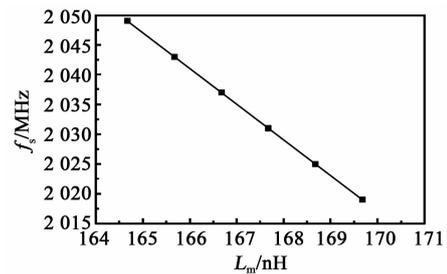


图 7 串联谐振频率随动态电感的变化

数据拟合得到 f_s 与 L_m 关系为

$$f_s = 3037 - 6L_m \quad (3)$$

即 L_1 每增加 1 nH, 谐振频率向下偏移 6 MHz。

联立式(2)、(3), 对比多个谐振频率对应的多组质量和电感值, 最终通过拟合得负载质量和动态电感的量化关系为

$$m = 0.1L_m - 16.797 \quad (4)$$

$$\frac{\Delta m}{\Delta L_m} = 0.1 \quad (5)$$

即负载质量每增加 0.1 ng, 相当于 MBVD 模型电路中增加了一个 1 nH 的质量负载等效电感。因此, 检测电路中传感器上的负载质量的变化可通过改变 L_m 来模拟。

3 应用

得到质量负载等效电感与负载质量的量化关系后, 可将其用于 BAW 质量传感器的系统级行为仿真。FBAR 的电学表现类似于石英晶体, 但 FBAR 的工作频率较高, 石英晶体可用于振荡器, 且振荡频率与晶体的谐振频率一致。因此, 根据此思想设计了一个 Pierce 结构的振荡器, 振荡器与 FBAR 的谐振频率一致, 即 FBAR 的谐振频率能直接反映到振荡器输出信号的频率上。通过检测振荡器的输出信号就能得到 FBAR 的谐振频率。图 8 为 FBAR 阻

抗特性曲线。由图可知,FBAR在 f_s 、 f_p 外呈容性,在 f_s 、 f_p 间呈感性。根据FBAR在 f_s 、 f_p 间呈感性的特点,将其与2个电容 C_1 、 C_2 构成了Pierce振荡器的基本电抗元件,满足回路总电抗为0的振荡条件。图9为BAW传感器检测电路的原理图。电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 为振荡器中的三极管提供工作所需直流偏置;电感 L_3 防止高频信号干扰电源,电感 L_2 防止高频信号到地;耦合电容 C_b 的作用是将反馈信号耦合到振荡器的输入端。

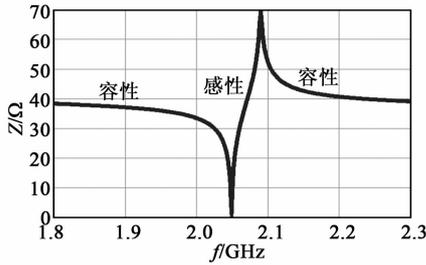


图8 FBAR阻抗特性曲线

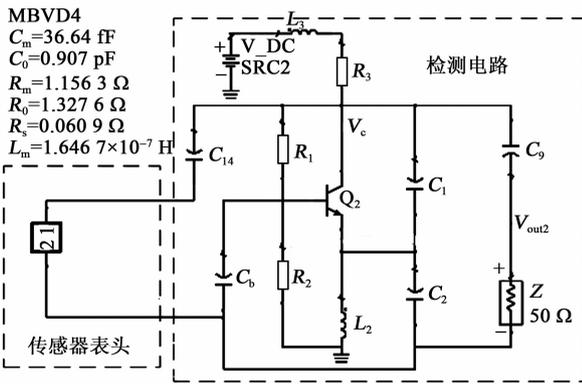


图9 检测电路原理图

对BAW传感器进行系统级行为仿真。通过调节 L_m 的值,每增加1 nH,相当于增加0.1 ng的负载质量,最后得到振荡器的输出频率随负载质量的变化情况,如图10所示。对原理图进行谐波平衡仿

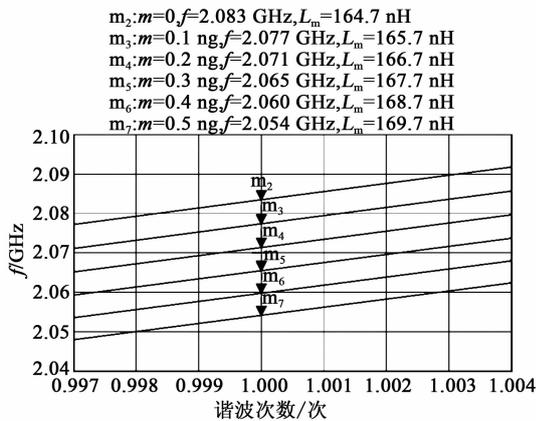


图10 谐波平衡仿真结果图

真得到振荡器的基波频率为2.083 GHz,对应 L_m 的值为164.67 nH,此时相当于负载质量为0。通过参数扫描法得到了在不同质量负载条件下的基波频率。由此可看出,质量负载等效电感每增加1 nH(即负载质量每增加0.1 ng),振荡频率减小6 MHz,这与等效电路模型的仿真结果相同。且振荡频率均处于FBAR的 f_s 、 f_p 间,证明FBAR呈感性,这与理论相符。从而验证了该检测电路可作为BAW传感器的检测电路,负载质量的量化关系能应用于BAW质量传感器的系统级行为仿真。

4 结束语

为得到质量负载等效电感与负载质量的量化关系,以便对BAW质量传感器进行系统级行为仿真,本文提出了3D多物理场-等效电路仿真对比建模的方法。首先进行场和路的对比建模,将多物理场仿真的结果用电路仿真的方式等效,最终实现了以路代场的系统级行为仿真。以1个FBAR作为质量传感器为具体案例,介绍了该方法的详细过程。并设计了基于Pierce振荡器的BAW传感器检测电路,将质量负载等效电感与负载质量的量化关系用于此检测电路进行了系统级行为仿真。仿真结果表明,振荡频率的变化情况与等效电路仿真结果相吻合,从而验证了该检测电路能够用于BAW传感器的频率信号的检测以及该量化关系可用于BAW质量传感器的系统级行为仿真。该检测电路不仅适用于BAW质量传感器,同样适用于检测其他物理量的BAW传感器,且该量化方法同样适用于QCM。

参考文献:

[1] 高杨,何婉婧,李君儒,等. 薄膜体声波传感器及其读出电路进展[J]. 压电与声光, 2015, 37(2):187-192.
GAO Yang, HE Wanjing, LI Junru, et al. FBAR sensors and their read-out circuits -a review of status[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(2):187-192.

[2] GABL R, FEUCHT H D, ZEININGER H, et al. First results on label-free detection of DNA and protein molecules using a novel integrated sensor technology based on gravimetric detection principles[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2004, 19(6):615-620.

[3] BENETTI M, CANNATA D, AMICO A, et al. Thin film bulk acoustic wave resonator (TFBAR) gas sensor[J]. Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 2004, 3(3):1581-1584.