

薄膜体声波谐振器的研究与仿真

陈鹏光,王 瑞,马 琨,陈剑鸣

(昆明理工大学 理学院,云南 昆明 650504)

摘 要:随着 5G 通信技术的发展,射频前端器件趋向于集成化、微型化,使得薄膜体声波谐振器(FBAR)技术成为通信领域的研究热点之一。该文对 FBAR 谐振单元选择不同阶数的梯形级联方式,通过射频仿真软件 ADS 建立 MBVD 等效电路模型,实验仿真其性能参数输出曲线,设计出频带区间在工信部规划的 5G 通信频段(4.8~5.0 GHz)标准内的高频窄带滤波器。实验仿真结果表明,所设计的 FBAR 频带在 4.849~4.987 GHz,增加 FBAR 单元的级联阶数可以提高带外抑制,其插入损耗很小,满足 5G 通信系统对滤波器的性能参数要求。

关键词:5G 通信;薄膜体声波谐振器;高频窄带滤波器;设计;仿真

中图分类号:TN384 **文献标识码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2019.03.014

Study and Simulation of Film Bulk Acoustic Resonator

CHEN Pengguang, WANG Rui, MA Kun, CHEN Jianming

(College of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

Abstract: With the development of 5G communication technology, RF front-end devices tend to be integrated and miniaturized, making the film bulk acoustic resonator (FBAR) technology one of the research hotspots in the field of communication. In this article, the trapezoidal cascade method is selected for different order number of FBAR resonant unit, and the MBVD equivalent circuit model is established by using the RF simulation software ADS. The performance parameter output curve of FBAR is simulated by experiment, and a high frequency narrow-band filter within the 5G frequency band (4.8~5.0 GHz) standard planned by the Ministry of Industry and Information Technology is designed. The experimental results show that the designed FBAR frequency band is at the range of 4.849~4.987 GHz. It is found that the increase of cascade order of FBAR unit can significantly improve the out-of-band rejection and the insertion loss is low, which satisfies the performance parameters requirements of the 5G communication system for the filter.

Key words: 5G communication; film bulk acoustic resonator(FBAR); high frequency narrowband filter; design; simulation

0 引言

近年来,个人通信、卫星通信以及其他形式的无线通信系统的高速发展,特别是即将到来的第五代移动通信系统(简称“5G 系统”),其工作频率不断向中高频扩展,频率选择控制成为射频前端的关键问题^[1]。薄膜体声波谐振器(FBAR)在射频前端器件市场中具有广阔的应用前景。

传统介质滤波器的体积较大,且不能与信号处理电路集成,因而成为其系统微型化发展的瓶颈。声表面波(SAW)滤波器只能用在低频段,在更高频率遇

到了困难^[2]。FBAR 滤波器可工作在 500 MHz~20 GHz,甚至更高频段内,且具有品质因数(Q)值高,尺寸小,加工工艺与 CMOS 工艺兼容等优点,是实现无线通信系统微型化的一个重要途径^[3-4]。该文从 FBAR 的基本理论、结构设计、材料的选择、建模及仿真实验进行研究,由 FBAR 谐振单元构建 FBAR 滤波器,分析其性能参数指标是否满足 5G 通信对射频前端滤波器的要求。

1 FBAR 的基本原理和结构

FBAR 是基于体声波理论,利用压电薄膜的逆

收稿日期:2018-07-05

基金项目:国家自然科学基金面上基金资助项目(KKGA201607014)

作者简介:陈鹏光(1993-),男,湖北黄冈人,硕士,主要从事 FBAR、MEMS 传感器的研究。通信作者:陈剑鸣(1962-),男,云南昆明人,副研究员,硕士生导师,主要从事 FBAR、MEMS 传感器的研究。

压电效应进行电能量与声波之间的转换,从而形成谐振。通过电极间的压电薄膜在垂直方向上的谐振进行选频,实现高 Q 值及小体积谐振器^[5]。FBAR常用的结构有背刻蚀型、空腔型和布喇格反射层型3种形式。本文以应用最为广泛的空腔型结构FBAR进行研究,空腔型结构FBAR主要由下电极-压电层-上电极支撑层及衬底组成(见图1),其工作频率 f 与压电薄膜层的厚度成反比,即

$$f = \frac{v}{2d} \quad (1)$$

式中: v 为纵波声速; $2d$ 为压电薄膜层厚度。

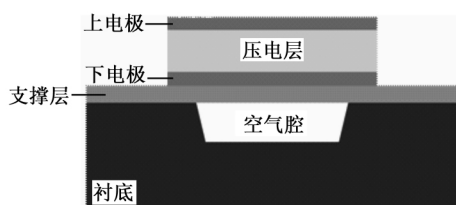


图1 空腔型 FBAR 结构

2 FBAR 的设计及建模

2.1 材料的选择

压电层材料是多晶薄膜,方向不一致的晶粒会严重降低有效机电耦合系数(k_{eff}^2)和 Q ,因此,理想情况是所有晶粒的 c 轴取向完全一致^[6]。电极材料影响FBAR的性能体现在材料的声速、声阻抗、密度、电阻率等^[7]。因此,选择合适的压电薄膜材料和电极材料对制备高性能FBAR极为关键。常见的FBAR压电薄膜材料有氮化铝(AIN)、氧化锌(ZnO)、锆钛酸铅(PZT),其性质参数^[8-9]如表1所示。

表1 常见压电薄膜材料的性质参数

材料	压电耦合系数 $k_t^2 / \%$	相对介电常数 $\epsilon_{zz}^s / 10^{-11}$	$v /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
AIN	6.50	9.50	10 400
ZnO	7.80	7.79	6 350
PZT	20.25	3.10	3 603
材料	密度 $\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	固有损耗	CMOS 兼容性
AIN	3 260	很低	可以
ZnO	5 600	低	不能
PZT	7 550	高	不兼容

2.1.1 压电耦合系数(k_t^2)

k_t^2 决定了电能和机械能之间的转换比例,也决

定了FBAR滤波器的带宽。 k_t^2 越大,其器件的谐振性能越好。由表1可见,PZT最好,AIN和ZnO相对较差。

2.1.2 相对介电常数(ϵ_{zz}^s)

FBAR的电学阻抗值由相对介电常数、谐振器的尺寸和压电薄膜的厚度共同决定,较高的相对介电常数可减小FBAR的整体尺寸。由表1可见,AIN优势明显。

2.1.3 纵波声速(v)

根据 $v = \lambda \times f$ (其中 λ, f 分别为波长和频率),在 f 一定时, v 越大,对FBAR要求的厚度和尺寸范围越大,工艺难度相应地会降低。由表1可见,AIN最大。

2.1.4 材料固有损耗

材料的固有损耗越小,则FBAR组建的滤波器的插入损耗越小^[10]。由表1可见,AIN的材料损耗最小。

综合各参数考虑,AIN是最合适的压电薄膜材料,特别是对集成到CMOS工艺中的FBAR器件。对于电极材料的选择,在器件结构相同的情况下,Mo作为电极时谐振器的谐振频率高, Q 值最高^[11],并且Mo和AIN薄膜之间不会形成如Al和AIN薄膜之间的无定形层。综合考虑,Mo是最理想的电极材料。

2.2 等效电路模型

为了FBAR的仿真研究,需要为FBAR器件建立相应的电学模型。常见的一维电学模型有BVD模型和MBVD模型。然而,FBAR在实际制备过程中,不仅需要考虑机械损耗,压电薄膜的介电损耗和电极损耗的影响也同样不能忽略,而BVD模型仅考虑了FBAR的机械损耗,因此,仿真得到的 S 参数准确度不够。为了更精确地描述FBAR的电学性能,发展出了一种改进的MBVD模型^[12],如图2所示。与BVD等效电路模型相比,MBVD增加了压电薄膜的介电损耗 R_0 和电极损耗 R_s 。

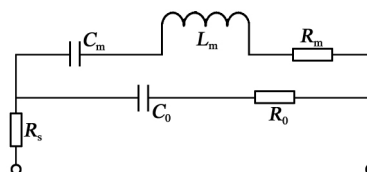


图2 MBVD模型

MBVD 模型的 FBAR 的阻抗为

$$Z = R_s + \frac{\left(R_0 + \frac{1}{j\omega C_0}\right) \times \left(R_m + j\omega L_m + \frac{1}{j\omega C_m}\right)}{\left(R_0 + \frac{1}{j\omega C_0}\right) + \left(R_m + j\omega L_m + \frac{1}{j\omega C_m}\right)} \quad (2)$$

式中: C_0 为谐振器的静态电容; C_m 和 L_m 分别为机械相关的动态电容和动态电感; R_m 为 FBAR 的机械损耗。其中,

$$C_0 = \frac{\epsilon_{zz}^s A}{2d} \quad (3)$$

$$C_m = \frac{8}{\pi^2} k_t^2 C_0 \quad (4)$$

$$L_m = \frac{d^2}{2 k_t^2 C_0 v^2} \quad (5)$$

$$R_m = \frac{\pi^2 \eta}{8 C_0 k_t^2 \rho v^2} \quad (6)$$

本文研究的 FBAR 采用空腔型结构, 上、下电极材料为 Mo, 压电层材料为 AlN, 设置上、下电极厚度均为 $0.1 \mu\text{m}$, 谐振面积均为 $154 \mu\text{m} \times 154 \mu\text{m}$, 压电层厚度分别为 $2.0 \mu\text{m}$, $2.1 \mu\text{m}$, $2.2 \mu\text{m}$, $2.3 \mu\text{m}$, $2.4 \mu\text{m}$, $2.5 \mu\text{m}$ 的 6 组模型参数进行仿真, 探究压电层厚度与谐振频率之间的关系。不同压电层厚度下仿真阻抗 (Z)-频率曲线如图 3 所示。

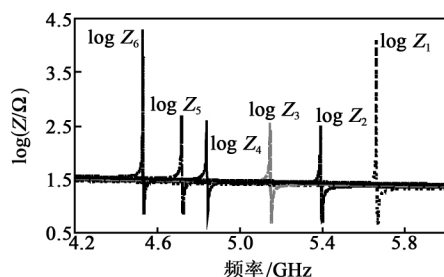


图 3 Z -频率曲线

由图 3 可见, 压电层的厚度越大, 其谐振频率越小。 $\log Z_4$ 的谐振频率为 $4.8 \sim 5.0 \text{ GHz}$, 符合本文设计要求, 谐振频率在 5 G 通信选频范围。因此, 采用压电层厚为 $2.3 \mu\text{m}$ 进行后续仿真实验研究。

2.3 FBAR 的性能指标

2.3.1 有效机电耦合系数 (k_{eff}^2)

k_{eff}^2 是 FBAR 性能分析的一个重要参数。 k_{eff}^2 越大, 插入损耗越小, 带宽则越大, k_{eff}^2 值过低会抑制 FBAR 在窄带滤波器中的应用, 定义^[13]

$$k_{\text{eff}}^2 = \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{f_p - f_s}{f_p} \right) \quad (7)$$

式中: f_s 为串联谐振频率, 对应最小阻抗点的频率;

f_p 为并联谐振频率, 对应最大阻抗点的频率。 k_{eff}^2 值不仅取决于压电薄膜材料的压电耦合系数, 还与其厚度和制造工艺等有关。

2.3.2 品质因数 (Q) 值

Q 值是衡量谐振器损耗的参数。它决定了共振峰的锐度和通带曲线的陡度。给出的 Q 值定义与谐振器的阻抗相位斜率有关, 称为阻抗相位微分法^[14], 即

$$Q_{s,p} = \frac{f}{2} \left| \frac{d\angle Z}{df} \right|_{f=f_s, f_p} \quad (8)$$

谐振器单元的 Q 值越高, 所构成的滤波器的插入损耗越小, 滚降曲线 (传输系数曲线从通频带边沿到邻近零点的下滑水平, 越陡越好) 陡峭性越好。

在射频仿真软件 ADS 的 “Trace Expression” 中输入 “abs(diff(phasorad(50 * ((1+S(1,1)) * (1+S(2,2)) - S(1,2) * S(2,1)) / (2 * S(2,1))))”, 可得 FBAR 阻抗相位频率微分的绝对值。将分别得到的 f_s 和 f_p 值代入式 (8) 即可得到 Q_s 、 Q_p 值^[15]。

3 实验

3.1 FBAR 的实验仿真

基于射频仿真软件 ADS 建立 FBAR 的库文件, 利用该库文件便于组合出各种可能结构的复合, ADS 能够便捷地设计和调节 FBAR 的单元器件。

等效电路搭建过程: 在一个 “cell” 文件夹下新建 “Schematic” 电路模型界面, 在 ADS 的元器件栏 “Lumped-Components” 元件面板中选择电阻、电容和电感等元器件。给 MBVD 模型定义两个端口 (P1、P2), 便于对等效电路模型进行封装, 定义其 6 个参数 R_s 、 R_0 、 R_m 、 C_0 、 C_m 、 L_m 的值按照式 (3) ~ (6) 进行参数值提取, $R_m = 0.56 \Omega$, $C_0 = 0.98 \text{ pF}$, $C_m = 56.4 \text{ fF}$, $L_m = 19.1 \text{ nH}$ 。 R_0 、 R_s 取自文献 [11] 中 FBAR 的性能测试结果。图 4 为 MBVD 等效电路模型。在 “Schematic” 界面添加各元件的参数值并进行封装, 对 MBVD 等效电路的实验仿真。图 5 为封装后的 FBAR。

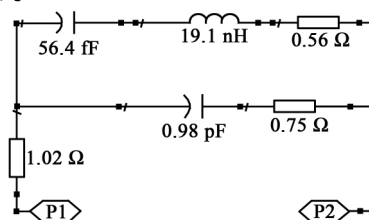


图 4 MBVD 等效电路模型

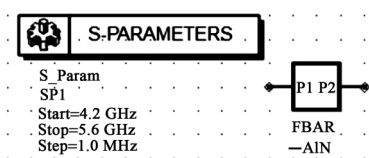
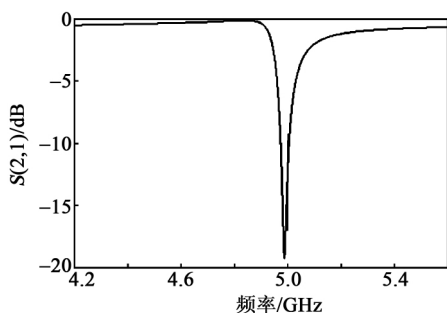


图5 封装后的 FBAR

在 ADS 仿真库文件里采用“S-Parameters”仿真仪对所设计的 FBAR 进行 S 参数仿真,设置仿真频率为 4.2~5.6 GHz,仿真步长为 1.0 MHz,如图 6 所示。 $S(2,1)$ 参数曲线是描述谐振器以及滤波器性能指数中最常用的频率响应特性曲线,对于本文的 FBAR 同样适用。 $S(2,1)$ 代表端口 1 到端口 2 的正向传输系数,表示有多少能量被传输到目的端,这个值越大,传输的效率就越高,一般建议 $S_{21} > -3$ dB。

图6 $S(2,1)$ 参数曲线

对 ADS 仿真得到的初步数据进行处理,可得到双端口 FBAR 器件的 Z 与其 S 参数的关系:

$$Z = Z_0 \times \frac{(1 + S_{11}) \times (1 + S_{22}) - S_{12} \times S_{12}}{2 \times S_{21}} \quad (9)$$

式中: $Z_0 = 50 \Omega$ 为仿真 S 参数时所用特征阻抗; S_{ij} ($i, j = 1, 2$) 是 4 个 S 参数。

在 ADS 软件的仿真界面,输入仿真参数方程式: “ $Z = 50 * ((1 + S(1,1)) * (1 + S(2,2)) - S(1,2) * S(2,1)) / (2 * S(2,1))$ ”,得到 FBAR 的阻抗-频率仿真曲线如图 7 所示。

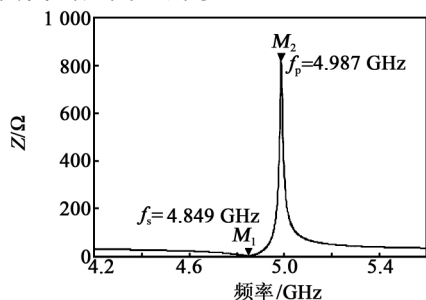


图7 阻抗-频率仿真曲线

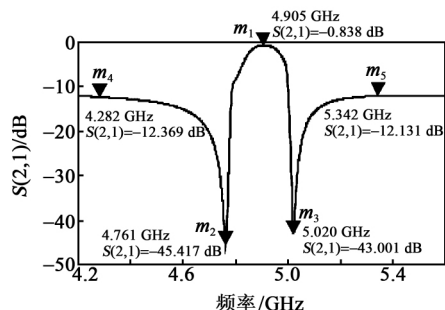
由图 6 可知,除了谐振区间外,曲线接近 0, FBAR 的插入损耗非常小。由图 7 可见,串、并联谐振频率间的带宽约为 138 MHz, FBAR 的谐振区间为 4.8~5.0 GHz。将 f_s 和 f_p 代入式(7)、(8),计算可得 FBAR 的性能参数,如表 2 所示。

表2 FBAR 性能参数

f_s /GHz	f_p /GHz	k_{eff}^2 /%	Q_s	Q_p
4.849	4.987	6.8	369.0	457.6

3.2 FBAR 滤波器的实验仿真

在 FBAR 滤波器的设计中,并联 FBAR 单元的谐振频率略高于串联 FBAR 单元的谐振频率^[16]。通过对比实验发现,并联谐振器 MBVD 模型的 $L_m = 19.8$ nH 较合适。由上述封装后 FBAR 谐振单元通过梯型级联方式搭建滤波器结构,其他元器件的参数值仍按照上面提取的参数值进行实验仿真,其仿真结果是一个典型的高频窄带滤波器的频率响应曲线,如图 8 所示。

图8 FBAR 滤波器的 $S(2,1)$ 参数曲线

由图 8 可见,该滤波器通频带内插入损耗仅为 -0.888 dB。其滚降曲线较陡峭,但其带外衰减非常小,左边阻带为 -12.369 dB,右边阻带为 -12.131 dB,不能满足滤波器对带外信号衰减的性能要求,因此需要增加 FBAR 的级联阶数进行实验仿真。

通过增加 FBAR 的级联阶数得到 2 串 2 并、3 串 3 并、4 串 4 并的体声波滤波器的频率响应特性曲线,如图 9 所示。由图可见,随着梯形滤波器的级联阶数的递增,带外衰减明显,左边带的带外衰减为 $-20.870 \sim -37.962$ dB,每增加一个级联阶数,就增加约 8.5 dB 的衰减,右边带的带外衰减也有同样的规律。其通频带内中心插入损耗的变化很小 ($-1.271 \sim -2.134$ dB),插入损耗大于 -3 dB,符合 FBAR 滤波器的性能参数要求。

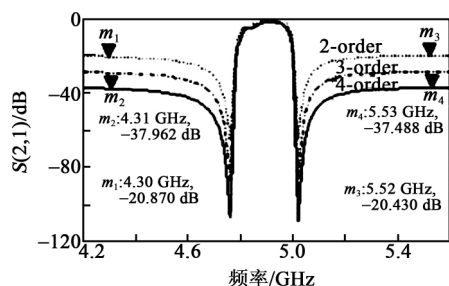


图9 不同阶数FBAR滤波器的 $S(2,1)$ 参数曲线

4 结束语

FBAR技术是贯穿MEMS技术、通信学、材料学、信号处理和COMS工艺等多学科的研究领域,FBAR滤波器的性能指数远超过传统的介质滤波器和声表面波滤波器。本文实验仿真出FBAR的频带为4.849~4.987 GHz,滤波器的带外抑制为-37.962 dB,插入损耗大于-3 dB,满足工信部划分的5G通信频段以及当下主流滤波器的性能参数要求。在实验仿真过程中得出增加FABR谐振单元的级联阶数,可以有效地改善滤波器的带外抑制。在生产制造中,通过增加FBAR的级联阶数可制造性能参数较好的FBAR滤波器。

参考文献:

- [1] 莫绍孟. 薄膜体声波谐振器的分析与设计[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
- [2] RUBY R C, BRADLEY P, OSHMYANSKY Y, et al. Thin film bulk wave acoustic resonators (FBAR) for wireless applications[J]. Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 2001, 1: 813-821.
- [3] GIRAUD S, BILA S, CHATRAS M, et al. Bulk acoustic wave filter synthesis and optimization for UMTS applications[J]. Freq Contr Symp, 2009, 157(4): 890-893.
- [4] ZHANG X, XU W C, CHAE J S. Temperature effects on a high Q FBAR in liquid[J]. Sens Actuators A: Phys, 2009, 158(5): 466-469.
- [5] 徐学良, 陆玉姣, 杨柳, 等. 薄膜体声波谐振器的发展现状[J]. 压电与声光, 2017, 39(2): 163-166.
- [6] 蒋松涛, 吴孟强, 吴勇, 等. 薄膜体声波滤波器的材料、设计及应用[J]. 材料导报, 2006, 20(11): 22-23.
- [7] 卞晓磊. 新型电调薄膜体声波谐振器(FBAR)研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [8] 陈国豪. 新型FBAR及传感技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [9] AIGNER R. RF-MEMS filters manufactured on silicon: Key facts about BAW technology[C]// Grainau, Germany: Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, IEEE, 2003.
- [10] 宁金叶. FBAR用AlN薄膜的MOCVD制备[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [11] FELMETSGER V V, LAPTEV P N, TANNER S M. Crystal orientation and stress in AC reactively sputtered AlN films on Mo electrodes for electro-acoustic devices[C]// Beijing, China: IEEE Ultrasonics Symposium Proceeding, 2008: 2146-2149.
- [12] LARSON J, BRADLEY P, WARTENBERG S, et al. Modified Butworth-Van Dyke circuit for FBAR resonators and automated measurement system[J]. Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 2001, 1: 863-868.
- [13] 赵坤丽. S波段窄带带通BAW滤波器设计[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.
- [14] LAKIN K M, KLINE G R, MCCARRON K T. High-Q microwave acoustic resonators and filters[J]. Microwave Theory and Techniques, 1993, 41(12): 2139-2146.
- [15] 蔡洵, 高阳, 黄振华, 等. 薄膜体声波谐振器的测试与表征[J]. 微纳电子技术, 2015, 52(10): 661-664.
- [16] 夏熙, 许晓婷. 一种宽负载的LLC谐振变换器的优化控制方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017(6): 166-170.

XIA Xi, XU Xiaoting. An optimized control for LLC resonant converter with wide load range[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017(6): 166-170.