

温补型体声波滤波器设计与制备

张智欣,陈晓阳,陈长娥,闫鑫,林树超

(北京无限电测量研究所,北京 100854)

摘要:基于薄膜体声波谐振器(FBAR)技术的滤波器频率温度系数为 $(-30 \sim -25) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,其电学性能受环境温度影响较大,将降低滤波器在全温工作的性能,限制其应用环境,尤其是对滤波器通带插损与矩形系数要求高的应用场合。该文在常规 FBAR 滤波器中引入正温度系数的 SiO_2 材料层,通过对滤波器的层叠位置设计及加工工艺等技术的研究,研制出 S 波段温补型 FBAR 滤波器器件,其工作频率为 3.1 GHz,插入损耗为 2.0 dB,带外抑制不小于 30 dB,频率温度系数为 $-0.02 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

关键词:薄膜体声波谐振器(FBAR);滤波器;温补层; SiO_2 ;频率温度系数。

中图分类号:TN384 **文献标志码:**A

Design and Fabrication of the Temperature Compensated FBAR Filter

ZHANG Zhixin, CHEN Xiaoyang, CHEN Chang'e, YAN Xin, LIN Shuchao

(Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

Abstract: The temperature coefficient of the conventional thin film bulk acoustic wave resonator(FBAR) filters is around $(-30 \sim -25) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, and the electrical performance varies with the environment temperature. This property degrades the electrical performance of the filter which works in a broad temperature range, and further confines the applications, especially the applications with stringent requirements in insertion loss in the pass band and roll-off in the transitional band. In this paper, a silicon oxide(SiO_2) layer with positive temperature coefficient is introduced in the conventional FBAR filters. Filter stack position technique and filter fabrication technique are researched, and a S-band temperature compensated FBAR filter device is developed, whose operation frequency is 3.1 GHz, the insertion loss is 2.0 dB, out of band rejection is better than 30 dB, and the temperature coefficient of frequency is $-0.02 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Key words: thin film bulk acoustic wave resonator(FBAR); filter; temperature compensation layer; SiO_2 ; temperature coefficient of frequency

0 引言

通信设备正向高频化、小型化方向发展,薄膜体声波(FBAR)滤波器由于具有体积小,插损低及频率高等优势,已广泛应用于通信领域^[1-3]。传统薄膜体声波(FBAR)滤波器的频率温度系数为 $(-30 \sim -25) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,其电学性能受环境温度变化较大,降低了滤波器在全温(即温度环境变化范围较大的工作环境温度,如 $-55 \sim 85^{\circ}\text{C}$ 的工作温度范围)环境温度下工作的性能,限制了其应用环境,尤其是对滤波器的通带插损与矩形系数有严苛要求的应用场景。

由于体声波滤波器的主要材料为 AlN 和 MoO_3 ,此两种材料的频率温度系数均为负,故需要在滤波

器中加入具有正温度系数的 SiO_2 材料层以补偿温度特性,从而实现高温度稳定性的滤波器。

本文通过对温补型 FBAR(TC-FBAR)滤波器的层叠结构设计、电路结构设计及加工工艺等技术进行研究,研制出 TC-FBAR 滤波器的频率温度系数为 $-0.02 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,工作频率为 3.1 GHz,插入损耗为 2.0 dB,带外抑制不小于 30 dB。

1 滤波器设计

1.1 TC-FBAR 滤波器层叠结构设计

在设计层叠结构时,可将 SiO_2 材料添加在 FBAR 谐振主体(即由底电极(BE)、压电层(Pz)与顶电极(TE)组成的“三明治”结构)外,还可添加在谐振主体内^[4],如图 1 所示。相同厚度的 SiO_2 材料

层置于 FBAR 层叠结构中不同位置,由其带来的温补效果不同。

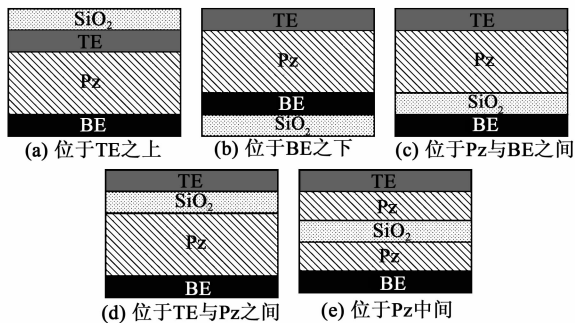


图1 SiO_2 温补层在谐振器层叠结构中位置

由于谐振器内应力分布为中间最大并向两侧逐渐递减,故 SiO_2 材料层越靠近谐振器中间位置,其温补效果越好。如图 1(a)、(b)所示, SiO_2 位于谐振主体外,其温补效果较弱。若要实现良好的频率温度特性,则需温补层厚度较大。温补层过大将增加谐振器的声损耗,从而降低品质因数(Q 值)。

如图 1(e)所示,若将 SiO_2 置于压电层中间,则其温补效果很好,但 SiO_2 与 AlN 的晶格匹配较差,导致在 SiO_2 上沉积的 AlN 压电薄膜晶向欠佳,从而影响谐振器的电学特性。

由图 1(d)可知, SiO_2 层处于谐振主体内,其温补效果较佳,且不影响压电层的薄膜淀积质量。但此种结构 SiO_2 材料侧壁暴露在外,加工中腐蚀牺牲层的腐蚀液会从侧壁腐蚀 SiO_2 ,破坏温补层结构(见图 2),导致温补效果与设计产生偏差,且引起谐振器主模能量衰减,降低品质因数。同时,添加的 SiO_2 层会引入额外电容,从而降低谐振器的有效机电耦合系数(k_{eff}^2)。

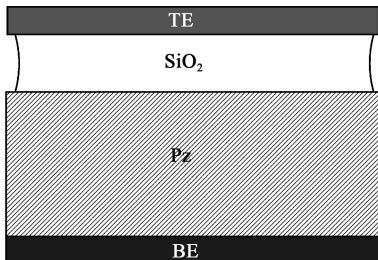


图2 SiO_2 材料侧壁被腐蚀液腐蚀后的谐振器结构示意图

本文将 SiO_2 材料层置于顶电极层内,如图 3 所示。由于 SiO_2 材料被顶电极材料包裹,在释放空腔的加工工序中,可保护其不被腐蚀液腐蚀,保证层叠结构的完整。同时,其上下表面的顶电极材料是电连接在一起的,这样可减小上下表面的电势差,进而

降低对 k_{eff}^2 的影响。

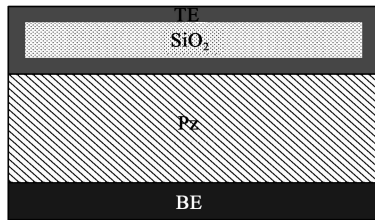


图3 高温度稳定性体声波谐振器层叠结构示意图

1.2 电路设计

本文滤波器采用 4/3 级联的梯形拓扑结构,由 4 只串联谐振器与 3 只并联谐振器级联组成,如图 4 所示。同时为了得到较好的抑制特性,尽量减小串联谐振器与并联谐振器的电容比,即并联谐振器的阻抗大于 $50\ \Omega$ 。滤波器的仿真曲线如图 5 所示。

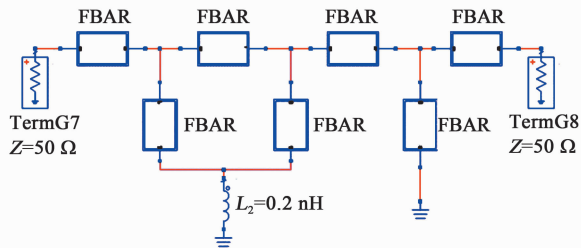


图4 滤波器电路结构设计图

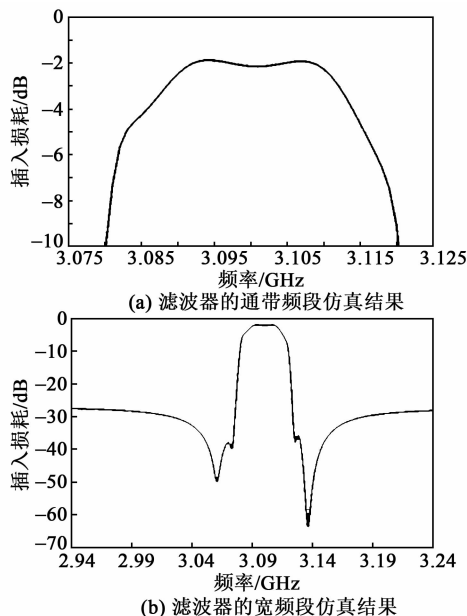


图5 高温度稳定性体声波滤波器仿真结果

1.3 版图设计

版图设计中需要考虑电磁场耦合对芯片性能的影响,故需对叠层间的边缘覆盖距离、不同谐振器的位置与距离、套刻对准及工艺监控单元结构等重点设计,图 6 为此款滤波器的版图设计方案,芯片

尺寸为 $0.71\text{ mm} \times 0.55\text{ mm}$ 。

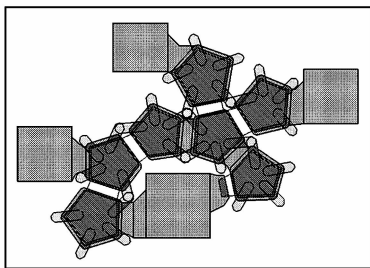


图6 滤波器版图设计图

2 滤波器加工制作与测试

2.1 滤波器加工制作

本文采用与微机电系统(MEMS)工艺兼容的工艺方法加工制作 TC-FBAR 滤波器,具体加工流程如图7所示。

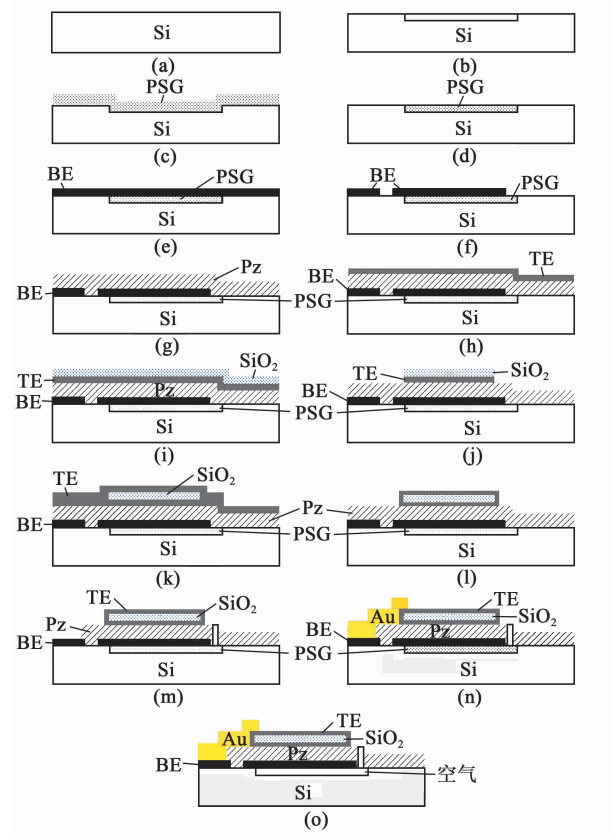


图7 TC-FBAR 滤波器加工流程图

首先清洗硅衬底,如图7(a)所示。利用等离子体刻蚀工艺在其上制作空腔结构,如图(b)所示。利用化学气相沉积(CVD)工艺在空腔内淀积掺杂的 SiO_2 作为牺牲层材料,如图7(c)所示。并利用化学机械抛光工艺对表面进行平坦化处理如图7(d)所示。利用物理气相沉积(PVD)工艺在表面沉积金属钼(Mo)薄膜,如图7(e)所示。并对其进行图

形化,形成底电极结构,如图7(f)所示。继续利用 PVD 工艺在晶圆上依次沉积 AlN 压电薄膜与金属 Mo 薄膜,如图7(g)、(h)所示。利用等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)工艺沉积 SiO_2 薄膜层,如图7(i)所示。再利用等离子体刻蚀工艺同时图形化 SiO_2 薄膜层与顶电极下部分,如图7(j)所示。利用 PVD 工艺继续沉积 Mo 薄膜,如图7(k)所示。并用等离子体刻蚀工艺图形化,制作出顶电极的上部分结构,如图7(l)所示。然后利用等离子体刻蚀工艺图形化压电层,如图7(m)所示。并利用剥离工艺加工与蒸发工艺制作用于电连接的金焊盘,如图7(n)所示。最后将晶圆浸于腐蚀液中,释放掉牺牲层,从而在器件下方形成空腔结构,如图7(o)所示。至此,完成 TC-FBAR 滤波器的制作工序。晶圆加工完成后,对其上的芯片进行切割,以实现芯片的进一步封装装配。图8为制作完成后滤波器器件,其封装尺寸为 $2.0\text{ mm} \times 1.6\text{ mm} \times 0.7\text{ mm}$ 。图9为 TC-FBAR 滤波器的侧面剖视扫描电镜(SEM)图。

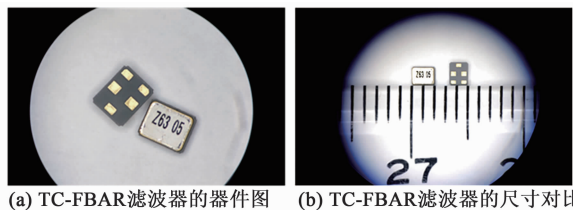
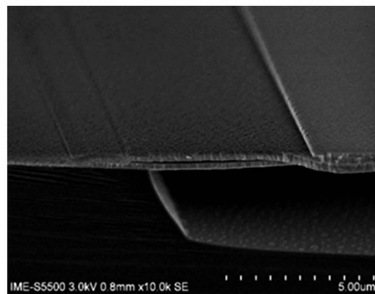
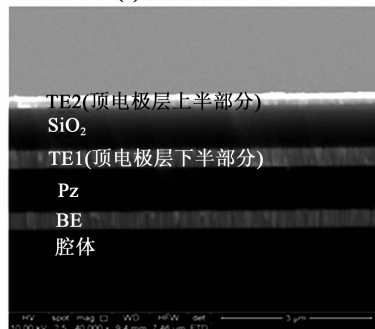


图8 TC-FBAR 滤波器器件照片



(a) 侧面剖视图



(b) 层叠结构放大图

图9 温补型 FBAR 滤波器 SEM 图片层叠结构放大图

2.2 滤波器测试结果

在温箱中对 TC-FBAR 滤波器器件进行在线测试。图 10 为 TC-FBAR 滤波器三温电性能测试曲线。滤波器中心频率为 3.1 GHz, 通带插入损耗为 2.0 dB, 1 dB 带宽为 24 MHz, 带外抑制 ≥ 30 dB。

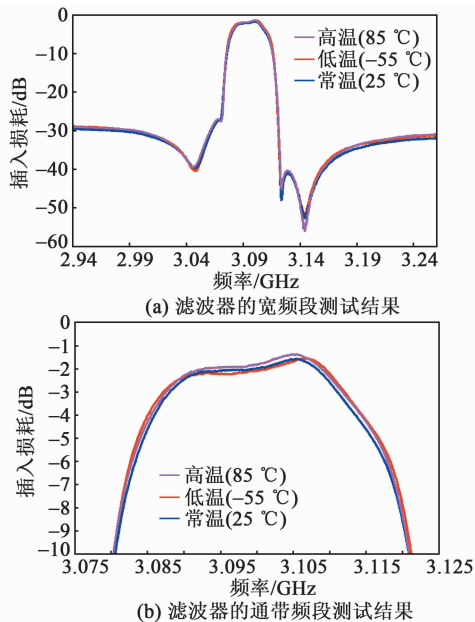


图 10 TC-FBAR 滤波器三温电性能测试曲线

对比高温(+85 °C)与低温(-55 °C)环境中测试滤波器的电学性能可知, 滤波器在高低温环境与常温环境下的电学特性无明显变化。

在环境温度 25 °C、85 °C、-55 °C 下测得滤波器中心频率分别为 3 100.129 MHz、3 100.125 MHz、3 100.134 MHz。滤波器的频率温度系数 TCF 为

$$TCF = \frac{f_1 - f_2}{(t_1 - t_2) \times f_2} \quad (1)$$

式中: f_1 是环境温度为 t_1 时滤波器中心频率; f_2 是环境温度为 t_2 时滤波器中心频率。

根据式(1)计算可得滤波器的 $TCF = -0.02 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。此器件在全温工作范围内最大频移为 8.7 kHz, 使器件电学性能受环境温度影响很小, 显著增强器件全温工作的稳定性。

利用相同测试方法对未添加温补层的滤波器分别在常温(25 °C)、高温(85 °C)与低温(-55 °C)下测试电学特性, 结果如图 11 所示。计算此滤波器的频率温度系数约为 $-26.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。由对比实验数据可知, 本文方法可显著改善 FBAR 滤波器的频率温度系数, 提升器件在全温工作环境中的稳定性。

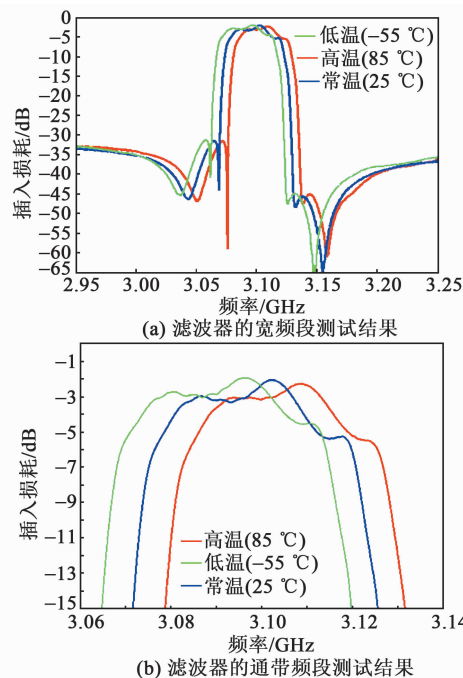


图 11 传统 FBAR 滤波器三温电性能测试曲线

3 结束语

本文在 FBAR 滤波器中引入正温度系数的 SiO_2 材料层, 将其置于顶电极中, 这样既可保证器件温补特性, 又可避免 k_{eff}^2 衰减。通过设计与工艺研究, 本文研制了温度系数为 $-0.02 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 的 TC-FBAR 滤波器, 其工作频率为 3.1 GHz, 插入损耗为 2.0 dB, 带外抑制 ≥ 30 dB。此技术减小器件在随工作温度的性能变化, 增强了器件全温工作的稳定性。

参考文献:

- [1] AIGNER R, FATTINGER G, SCHAEFER M, et al. BAW filters for 5G bands[C]//San Francisco, CA, USA; IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2018.
- [2] VETURY R, HODGE M D, SHEALY J B. High power, wideband single crystal XBAW technology for sub-6 GHz micro RF filter applications[C]//Kobe, Japan; IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2018.
- [3] RUBY R. A decade of FBAR success and what is needed for another successful decade[C]//Shenzhen, China; Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA), 2011.
- [4] HASHIMOTO K Y. RF bulk acoustic wave filters for communications[M]. Norwood, Mass London; Artech House, 2009: 31-34.