

S波段FBAR滤波器芯片的研制

李丽,郑升灵,李丰,李宏军

(中国电子科技集团公司第十三研究所,河北石家庄 050051)

摘要:采用完全自主的薄膜体声波谐振器(FBAR)滤波器设计、工艺技术,制备了S波段FBAR滤波器芯片。该FBAR滤波器的电路结构为梯形结构,采用一维Mason模型进行了仿真、优化。在工艺上采用空气隙型结构,突破了高 c 轴取向AlN压电薄膜淀积、精密空气腔制作等关键工艺技术,制备的4节FBAR滤波器中心频率为2 340 MHz,3 dB带宽为25 MHz,中心插损为3.8 dB,矩形系数达2.24:1,输入、输出阻抗均为50 Ω ,芯片体积仅为1 mm \times 1 mm \times 0.3 mm,该性能与同频率、同带宽的介质滤波器性能进行了对比,体积可缩小几千倍,矩形系数优于介质滤波器。

关键词:薄膜体声波谐振器(FBAR)滤波器;一维Mason模型;AlN压电薄膜;空气腔

中图分类号: TN75 **文献标识码:** A

Development of FBAR Filter Chip for S Band Application

LI Li, ZHENG Shengling, LI Feng, LI Hongjun

(13th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: A kind of FBAR filter chip for S band application is developed successfully with fully independent design and process technique. The filter is composed of ladder circuit, it is simulated and optimized using one dimensional Mason model. In the technical realization, the device has air gap structure. Both the deposition technology of AlN piezoelectric film with high c -axis oriented and precision air gap are broken through. The fabricated 4 pole FBAR filter has the center frequency of 2 340 MHz, the 3 dB bandwidth of 25 MHz, the insertion loss at center frequency of 3.8 dB, the shape factor of 2.24 : 1, and both the input and output impedance of 50 Ω . The chip size is only 1 mm \times 1 mm \times 0.3 mm. The above performance is compared with dielectric filter having the same frequency and bandwidth. The volume of FBAR filter is reduced by several permillage, and the shape factor outgoes the dielectric filter obviously.

Key words: FBAR filter; one dimensional Mason model; AlN piezoelectric film; air gap

0 引言

由于微波单片集成电路(MMIC)发展迅速,微波射频滤波器成为许多微波电子系统实现小型化、集成化及芯片化的瓶颈。薄膜体声波谐振器(FBAR)技术是目前唯一有望在500~4 000 MHz频段实现高性能滤波器单独芯片化、500 MHz~20 GHz微系统滤波器实现片上集成的重要途径。FBAR技术是一种基于体声波谐振的全新技术,通过压电薄膜的逆压电效应将电能转换成声波,形成谐振。FBAR滤波器具有工作频段宽,体积小,品质因数(Q值)高,带外抑制高,功率容量大,温度稳定性好及可与射频集成电路(RFIC)或MMIC集成的优点^[1]。

1999年,美国安捷伦(Agilent)公司的Ruby等

人经长达10年的攻关研究,研发出应用于美国PCS 1 900 MHz频段的薄膜体声波双工器,同时正式提出了FBAR的称谓^[2]。并于2001年将其大规模生产。之后,美国的TriQuint公司、德国的Infineon公司也开发了类似的FBAR技术。目前,国外FBAR器件研发生产能力最强的厂商为美国安华高(Avago)公司,占据了欧美日等国际市场的主要份额,在国外FBAR滤波器及多工器在民用领域已是成熟化的产品。

国内目前还未见FBAR芯片化产品的报道,全部依靠进口。研究主要集中在科研院所和高校,FBAR滤波器制作方面的报道很少。2009年,熊娟等^[3]报道了3节FBAR滤波器样品,其中心频率约为1.2 GHz,滤波器的带宽为180 MHz,带外衰减

收稿日期:2013-03-28

基金项目:国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2009CB320200)

作者简介:李丽(1976-),女,河北人,高级工程师,博士,主要从事射频/微波频段FBAR技术及相关器件的研发、设计工作。

为-10.108 dB,插入损耗为-5.15 dB。该滤波器插入损耗大,带外衰减小,不能满足实际工程的使用要求。

本文报道了一种S波段FBAR滤波器,其中心频率为2 340 MHz,3 dB带宽为25 MHz,中心插损为3.8 dB,矩形系数($K_{40\text{ dB}/3\text{ dB}}$)达2.24:1,带外翘起在35 dB以下,输入、输出阻抗均为50 Ω,该性能指标为目前国内报道的最高水平。

1 FBAR 滤波器的设计

通常采用一维Mason模型^[4]或MBVD模型^[5]描述FBAR器件的特性。MBVD模型能方便的进行基于FBAR的滤波器设计,但由于MBVD模型描述的只是谐振模式附近的电学特性,在对FBAR器件进行全波段分析时,一维Mason模型描述较精确。

本文采用一维Mason模型模拟单个FBAR的频率特性,其等效电路如图1所示。FBAR由底电极、压电层及顶电极的三明治结构构成,两电极的边界均为空气界面,以限制声波在三明治结构中。压电层有2个声学端口、2个电学端口,电极层只有2个声学端口,等效电路是通过将三层薄膜的声学端通过串联构成。图2为三明治各层厚度分别为308 nm,1 000 nm,308 nm时,利用Mason模型仿真得到的阻抗特性曲线。由图可看出,该谐振器呈双极点(Dipole)谐振特性,其串联谐振频率和并联谐振频率分别为2 185 MHz和2 213 MHz,有效机电耦合系数为3.12%。

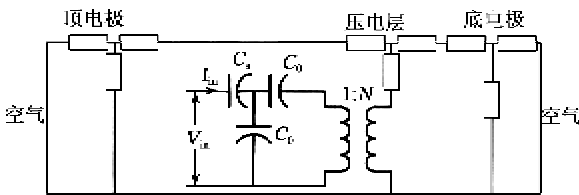


图1 FBAR的Mason等效电路模型

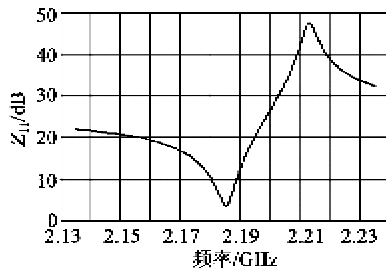


图2 FBAR的阻抗特性曲线

将多个FBAR谐振器通过一定的方式级联就能构成满足一定要求的滤波器。梯形级联结构的滤

波器(见图3)是最常用的滤波器级联形式。图中 X_1 和 X_2 为串臂的FBAR谐振器,它们具有相同的串联谐振频率 f_{S1} 和并联谐振频率 f_{P1} , X_3 和 X_4 为并臂的FBAR谐振器。它们也具有相同的串联谐振频率 f_{S2} 和并联谐振频率 f_{P2} 。当 $f_{S1} = f_{P2}$ 时,就可获得带宽为 $f_{P1} - f_{S2}$ 的带通滤波器。

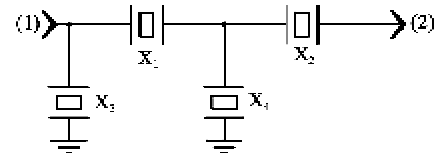


图3 梯形结构电路原理图

采用ADS软件对图3所示的4节FBAR滤波器进行了仿真,电极厚度为图2中三明治各层厚度。通过对滤波器中各FBAR阻抗特性的优化,明显改善了滤波器的带外翘起情况。图4为仿真得到的FBAR滤波器特性曲线。滤波器的中心频率为2 185 MHz,中心插损为3.52 dB,3 dB带宽为24 MHz, $K_{40\text{ dB}/3\text{ dB}}$ 为2.08:1,中心频率处的驻波比小于1.23:1,输入、输出阻抗为50 Ω。且该滤波器带外翘起在($f_0 \pm 90$) MHz处为35 dB。

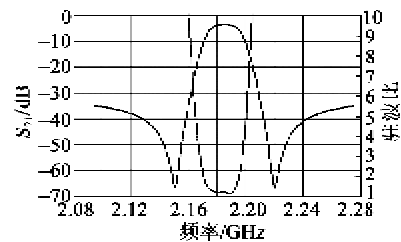
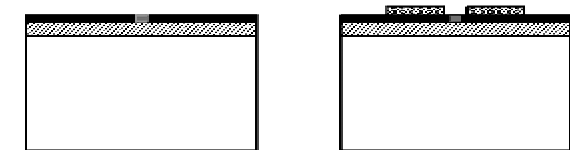


图4 FBAR滤波器仿真曲线

2 FBAR 滤波器的实现

在工艺实现上,选用机械牢固度好,Q值高,且可与MMIC集成的空气隙型结构进行研究。具体工艺流程如图5所示。图5(a)在单片抛光的 $\varnothing 10.16\text{ cm}$ 硅片上进行氧化,然后沉积 Si_3N_4 支撑层并图形化。图5(b)蒸发Cr/Pt/Au底电极并图形化。图5(c)采用磁控溅射台溅射AlN压电薄膜并图形化。图5(d)蒸发Cr/Pt/Au顶电极并图形化。图5(e)滤波器并臂FBAR的顶电极加厚并图形化。图5(f)通过腐蚀通道腐蚀牺牲层,最终形成空气隙型FBAR滤波器。



(a) 氧化,制作支撑层并图形化

(b) 制作底电极并图形化

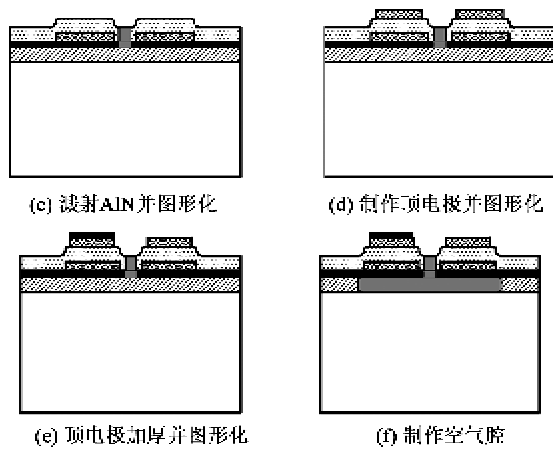


图 5 FBAR 滤波器工艺流程图

在工艺流程中,图 5(c)、(f)是全新的工艺,进行了重点的技术攻关,主要包括高 c 轴取向 AlN 压电薄膜的制作及空气腔的制作。采用 DC 反应磁控溅射的方式来生长 AlN 薄膜,通过优化溅射 AlN 压电薄膜的各个参数,XRD 测试摇摆曲线的半高宽,应力测试仪测试薄膜的应力水平,通过大量的试验及测试,目前溅射的 AlN 薄膜的半高宽达 3.75° ,应力为 -360 MPa。可满足制作滤波器的要求。另外,FBAR 滤波器的空气腔不同于 MEMS 器件,不能在电极上制作释放孔,只能通过腐蚀通道进行腐蚀,腐蚀情况不便于观察,给空气腔的制作带来困难。通过在流片过程中加入检测图形,可观察腐蚀情况,最终实现了底电极下面的空气界面,且器件结构平整。图 6 为制备的 FBAR 滤波器芯片实物照片。裸芯片的体积约为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ 。

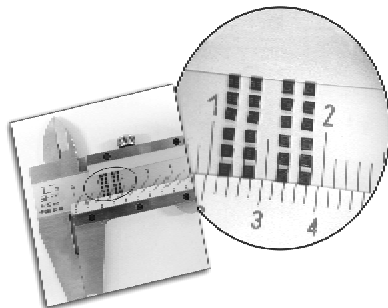


图 6 FBAR 滤波器实物照片

3 FBAR 滤波器的测试结果与分析

利用微波探针台和矢量网络分析仪对 FBAR 滤波器 $\varnothing 10.16\text{ cm}$ 圆片进行了在片测试。图 7 为 S 参数测试结果。滤波器的中心频率为 $2\ 340\text{ MHz}$,中心插损为 3.8 dB , 3 dB 带宽为 25 MHz , $K_{40\text{ dB}/3\text{ dB}}$ 为 $2.24:1$,中心频率处的驻波比约为 $1.5:1$,输

入、输出阻抗均为 $50\ \Omega$,且该滤波器带外翘起在 $(f_0 \pm 90)\text{ MHz}$ 处低于 35 dB 。比较图 4、7 可看出,在带宽、矩形系数及带外翘起情况,实测结果与仿真结果基本吻合。但实测滤波器的中心频率比设计值偏高,这是由于现在采用的设备不能对膜厚进行精确控制,且 AlN 薄膜的材料参数(如声速、密度等)和理论值不一致。另外,测试的中心插损比仿真值大,驻波较差,这还是由于膜厚不准确,造成 $f_s \neq f_{ps}$,从而使带内纹波变大,驻波变差。

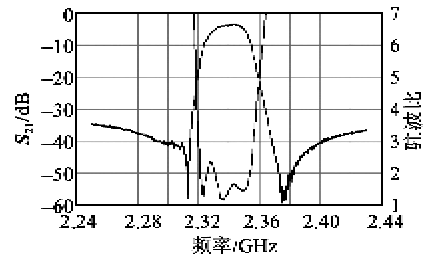


图 7 FBAR 滤波器实测 S 参数曲线

图 8 为实测 4 节 FBAR 滤波器性能与相同节数,采用直径为 $\varnothing 6\text{ mm}$ 的介质谐振器构成的介质滤波器仿真结果的对比。两种滤波器的 3 dB 带宽均为 25 MHz 。由图可看出,两种滤波器的中心插损基本一致,FBAR 滤波器的带内驻波相对较差,这是由于 FBAR 滤波器中各谐振器未很好地谐振在一起,即薄膜的厚度未能精确控制。另外,FBAR 滤波器的阻带近端特性明显优于介质滤波器,图中介质滤波器的 $K_{40\text{ dB}/3\text{ dB}}$ 为 $3.31:1$,因此 FBAR 滤波器的矩形系数变好。但阻带远端特性比介质滤波器差,这可采用在 FBAR 滤波器电路中加入电容或电感元件来改变阻带衰减极点的位置^[6],从而达到改变 FBAR 滤波器阻带远端特性的目的。另外,也可采用网格型结构与梯形结构的级联^[7],同时实现阻带近端和远端的高抑制。FBAR 滤波器不仅在电性能指标上具有上述优点,且体积减小。4 节表贴介质滤波器的体积约为 $26.3\text{ mm} \times 14\text{ mm} \times 7.4\text{ mm}$,因此 FBAR 滤波器的体积缩小几千倍。

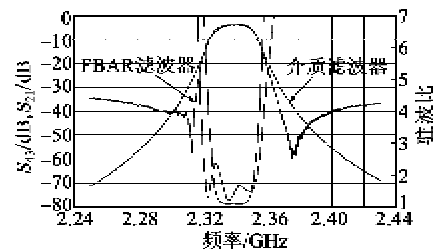


图 8 FBAR 和介质滤波器比较

(下转第 623 页)