文章编号:1004-2474(2017)01-0052-04

基于 $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ 薄膜电容的 L 波段可调滤波器

刘 浪,谭 宇,秦 超,王文君,姚宗影,陈宏伟,张继华,杨传仁 (电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室,四川成都 610054)

摘 要:在蓝宝石基片上使用 Ba_xSr_{1-x}TiO₃(BST)铁电薄膜电容作为可调元件制作出一种五阶梳状线可调带通 滤波器。通过对 BST 平行板电容的材料特性(介电常数、损耗和可调率)的提取,其中 40 V 偏压下的可调率为 43.1%,将这些特性运用于可调滤波器的制作。初步的实验结果分析表明,在 20 V 直流偏置电压作用下,滤波器的中 心频率从 1.19 GHz 变化到 1.31 GHz(可调率为 10.1%),带内插入损耗为 13.5~13.7 dB,回波损耗低于 12 dB。

关键词: $Ba_x Sr_{1-x} TiO_3(BST)$ 薄膜;可调滤波器;可调率;平行板电容;铁电薄膜

中图分类号:TN713;TM22 文献标识码:A

L-Band Tunable Filter Based on $Ba_xSr_{1-x}TiO_3Thin$ -Film Varactors

LIU Lang, TAN Yu, QIN Chao, WANG Wenjun, YAO Zhongying, CHEN Hongwei, ZHANG Jihua, YANG Chuanren

(State Key Lab. of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: A tunable fifth-order combline bandpass filter using thin-film $Ba_x Sr_{1-x} TiO_3$ (BST) varactors and fabricated on a sapphire substrate is presented in this paper. The voltage-dependent material properties (permittivity, loss tangent, and tunability) have been extracted and used in the development of a specific integrated metal-insulator-metal (MIM) capacitor that shows a measured tunability of 43.1 % under 40 V bias. After the BST parallel plate capacitors characterization, the varactors have been exploited in the design of the tunable combline bandpass filter. The analysis of some preliminary experimental results shows that the application of 20 V bias varied the center frequency of the filter from 1. 19 GHz to 1. 31 GHz which corresponds to a relative shift of 10.1%. The insertion loss varied from 13.7 dB to 13.5 dB, while the return loss was less than 12 dB over the bias range.

Key words: $Ba_x Sr_{1-x} TiO_3$ (BST) thin film; tunable filter; tunability; MIM capacitors; ferroelectric thin films

0 引言

现代无线通信系统中,具有低成本、小体积、高集 成度和快速调谐率的电可调微波滤波器已占据越来 越重要的地位^[1-2]。钛酸锶钡(Ba_xSr_{1-x}TiO₃,BST) 铁电材料由于低成本,很强的介电非线性和简单的薄 膜制备工艺使其广泛地应用于电可调滤波器。使用 这种可调技术的滤波器由于具有高功率处理能力、快 速可调率和封装的易实现性而广受关注^[3-8]。目前 BST 薄膜电容有平行板(MIM)结构^[9]和叉指电极 (IDE)结构^[4]。与叉指电容相比,尽管 MIM 结构电容 需要较复杂的工艺步骤,但它能提供高的电容密度和 低偏压下的高调谐率。梳状线结构因其尺寸的紧凑 性、封装的适应性和宽阻带带宽性而被广泛应用于现 代微波系统的可调带通滤波器中^[10-12]。 本文采用 MIM 结构的 BST 薄膜电容作为可调 元件在蓝宝石基片上制作出 L 波段五阶可调梳状 线带通滤波器。

1 实验

1.1 MIM 结构的 BST 薄膜电容的制备

本文采用直流磁控溅射在蓝宝石单晶(0001)基片 上制备 Pt/Ti 底电极。表 1 为射频磁控溅射法沉积 BST 薄膜的工艺参数。以 Ba_{0.6} Sr_{0.4} TiO₃ 陶瓷为靶材, 表 1 为射频磁控溅射制备 BST 薄膜工艺参数,在空气 气氛中采用 760 ℃的退火温度对其进行晶化处理,再 在底电极垂直方向采用真空电阻蒸发法制备 Au/NiCr 上电极。对薄膜和电极分别进行图形化处理后得到 MIM 结构的 BST 薄膜电容器。

收稿日期:2016-03-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51172035)

作者简介:刘浪(1992-),女,湖南衡阳人,硕士生,主要从事铁电薄膜相关微波器件的制备及研究。E-mail: LiuLang920123@hotmail. com。张继华(1975-),男,副教授,主要从事薄膜集成技术的研究。E-mail: jhzhang@uestc.edu.cn。

刘 浪等:基于 Ba_xSr_{1-x}TiO₃ 薄膜电容的 L 波段可调滤波器

表 1 射频磁控溅射法沉积 BS1 溥膜

背底真空度/Pa	工作气压/Pa	溅射气氛
$<\!\!5\! imes\!10^{-4}$	约 0.1	$\mathrm{Ar}\!:\!\mathrm{O}_{2}\!=\!1\!:\!5$
溅射功率/W	基片温度/℃	靶基距/mm
90~100	400	71
靶材尺寸/mm	基片类型	靶材类型
Ø120	Pt/Ti/蓝宝石基片	${\rm Ba}_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$

1.2 滤波器的设计和制作

梳状线滤波器是由 1/4 波长的平行耦合谐振器 组构成,每个谐振器的一端由一定电长度的微带线 接地,另一端则通过加载电容接地。其原理示意图 如图 1 所示。其中,r+1 根微带线可以看成并联短 截线,这些并联短截线的特性导纳为

$$Y_j = vC_j \tag{1}$$

串联短截线的特性导纳为

 $Y_{j,j+1} = vC_{j,j+1} \tag{2}$

式中:v为电磁波在媒介中的传播速度; C_j 是第j级 谐振器对地的单位自电容; $C_{j,j+1}$ 是第j级谐振器和 第j+1级谐振器之间的单位互电容。





本实验采用抽头线端口耦合结构,通过直接耦合的方式输入、输出信号,进一步减少器件的体积。这种滤波器的理论计算可通过经典设计公式进行计算^[13]。设定滤波器的设计要求:中心频率为900 MHz,3 dB带宽为10%,带内插损 S_{21} <5 dB,带外抑制 S_{11} 优于20 dB。设计通过计算确定滤波器的阶数为五阶,并拟合得到微带线的尺寸。其版图结构和具体优化尺寸大小如图2和表2所示。



表 2 梳状线可调微带滤波器的优化结构尺寸					
W_1/mm	W_2/mm	W_3/mm	W_4 /mm	W_5/mm	
1.35	2.11	1.34	1.06	1.24	
L_1/mm	L_2/n	ım	G_1/mm	G_2/mm	
7.85	9.79	92	0.4	0.02	

图 2 中, W_1 , W_3 , W_5 为接地边缘微带线的宽 度; W_2 , W_4 为微带线的间距, L_2 为抽头线的高度, 可以由谐振器的电长度得到。 L_1 与 L_2 的总和表示 谐振器的长度。

器件的制作过程类似于 BST 薄膜电容器的制备 过程,需经过底电极、薄膜及上电极的制备和图形化 3个步骤。对于微波器件,需要考虑金属导体在微波 频段上的趋肤效应(当交变电流通过导体时,电流会 集中在导体表面通过),因此,需要通过电镀工艺将 Au电极加厚到2 µm以上。趋肤深度的计算公式为

$$\delta_{\rm s} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \tag{3}$$

式中: ω 为角频率; $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ 为真空磁导率; σ 为金属的电导率,金的电导率为4.098×10⁷。

最后,将滤波器封装在夹具内,通过 Sub-Miniature-A(SMA)接头与测试接头连接,SMA 接头是 一种典型的微波高频连接器,其使用的最高频率为 27 GHz,这里的接地连接是通过将低温银浆放在烘 箱内(温度为 100 ℃)烘上 0.5 h 后涂于微带与地连 接处。器件的封装实物图如图 3 所示。



图 3 可调滤波器的封装实物图

1.3 薄膜性能表征和器件测试

采用美国 DekTak 台阶仪测膜厚。采用 LC 2000 铁电材料测试仪测量 BST 薄膜材料的电滞回 线;采用 Agilent 4294A 阻抗分析仪测量 BST 薄膜 的电容、损耗的偏压特性,测试频率为1 MHz,最大 直流偏压为±40 V。BST 薄膜的相对介电常数为

$$\varepsilon_{\rm r} = \frac{Cd}{\varepsilon_0 A} \tag{4}$$

式中:C为薄膜的电容; ε₀ = 8.854×10⁻¹² F/m 为真

空介电常数; A 为电容的面积; d 为薄膜的厚度。 BST 薄膜的非线性特性可通过介电调谐率(T)来表征,即

$$T = \frac{\varepsilon_{\rm r}(0) - \varepsilon_{\rm r}(V)}{\varepsilon_{\rm r}(V)}$$
(5)

式中V为电容所加直流偏压。

采用 Agilent E5071C 型矢量网络分析仪测试 可调滤波器的微波性能,测试频率范围为 300 kHz~ 20 GHz。所加电压为 0、10 V 及 20 V。

2 实验结果与讨论

2.1 薄膜的性能分析

2.1.1 电滞回线

图 4 为室温下厚 400 nm、面积 0.04 mm² 的 BST 薄膜的电滞回线。由图可知,制备的 BST 薄膜 具有明显的铁电性。当外加偏压为-40 ~+40 V 时,剩余极化强度(2 P_r)为 0.939 μ C/cm²,矫顽电场 强度(2 E_c)约为 79.34 kV/cm。由图可得:

1) 电滞回线关于纵坐标明显不对称,即沿横坐标左移。这可能是由于晶格失配,在下界面(BST薄膜与底电极之间的界面)处形成了肖特基势垒, 从而引起不对称^[14-15]。

2)电滞回线不完全闭合,这可能是由于薄膜内存在残余应力和退极化场而引起的^[16]。



图 4 BST 薄膜的电滞回线

2.1.2 介电偏压特性曲线

图 5 为在室温、1 MHz 下同一 BST 薄膜样品的 介电常数、损耗与外加电场的关系曲线(测试信号为 0.1 V,直流偏压为-40~+40 V,步进为 0.1 V)。 由图可知,BST 薄膜的介电偏压特性曲线形状为不 对称的"双蝶形",这同样证明了它具有铁电性且存 在异质结界面。当外加偏压从 0 变化到 40 V 时,薄 膜的相对介电常数由 130 变为 74,由式(4)可求得 偏压为 40 V 时,薄膜的介电调谐率为 43.1%。薄 膜的介电损耗小于 0.012。



图 5 BST 薄膜的相对介电常数、损耗与电场强度的关系曲线

2.2 器件的特性分析

可调滤波器模拟和测试的散射参数(S_{11} 和 S_{21}) 随频率变化的关系分别如图 6、7 所示。通过 AnsoftHFSS 三维高频电磁场仿真软件对如图 2 所示 的器件结构模型进行仿真计算,初始设计中,微带线 材料为金导体,厚为 3 μ m,介质基板使用蓝宝石单 晶材料,厚定为 0.5 mm,相对介电常数设为 11.5, BST 薄膜材料的参数设置可由 2.1 节得到,损耗正 切 tan δ 设为 0(理想情况下)。由图 6 可知,当 BST 薄膜的相对介电常数从 140 变到 100 时,器件的中 心频率往高频方向偏移,从 826 MHz 移动到 882 MHz(6.8%),3 dB 带宽约为 9%,插入损耗 $S_{21} < 5$ dB,回波损耗 $S_{11} < -20$ dB。





图 7 器件的测试结果

由图 7 可知,当外加偏压从 0 变到 20 V时,即 对应于仿真时 BST 薄膜的介电常数随偏压的增大 而减小,同样可以看出器件的中心频率往高频方向 移动,从 1.19 GHz 变到 1.31 GHz,插损维持在 13.5~13.7 dB之间,回波损耗低于一12 dB。测试 的中心频率与仿真结果有轻微的差异是因为 BST 薄膜电容在光刻对准过程中出现了尺寸上的偏差, 使得调谐电容值发生了变化。带内插损比仿真结果 大的原因是一方面器件在制作过程中 BST 薄膜性能 的退化,另一方面是实验室电镀条件相对简陋,得到 的镀层表面较粗糙,附着性不好。本文使用的 SMA 接头本身有 2 dB 插损,导致器件的回波损耗增大。

3 结束语

本文采用 BST 薄膜电容作为可调元件制作出 L 波段五阶梳状线可调带通滤波器,制备的 BST 薄 膜在 40 V 的偏压下可调率为 43.1%。制作的器件 在 20 V 直流偏压作用下,中心频率从 1.19 GHz 变 化到 1.31 GHz,实现 10.1%的可调率,带内插损为 13.5~13.7 dB,回波损耗低于-12 dB。

参考文献:

- [1] FU J S, ZHU X A, PHILLIPS J D, et al. Improving linearity of ferroelectric-based microwave tunable circuits[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2007, 55 (2):354-360.
- [2] JIANG H, LACROXIS B, CHOI K, et al. K_{α} and U-

band tunable bandpass filters using ferroelectric capacitors[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2011, 59 (12):3068-3075.

- [3] TOMBAK A, MARIA J P, AYGUAVIVES F, et al. Tunable barium strontium titanate thin film capacitors for RF and microwave applications[J]. IEEE Microw Wireless Compon Lett, 2002, 12(1): 3-5.
- [4] NATH J,GHOSH D,MARIA J P, et al. An electronically tunablemicrostripbandpass filter using thin-film barium-strontium-titanate (BST) varactors [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech,2005,53(9):2707-2712.
- [5] YANG L H, FREDDY P, WANG G, et al. Microwave properties of epitaxial (111)-oritented Ba_{0.6} Sr_{0.4} TiO₃ thin films on Al₂O₃ (0001) up to 40 GHz[J]. Appl Phys Lett, 2010,97(16):162909.
- [6] TAKEDA K, MURAISHI T, HOSHINA T, et al. Dielectric tunability and electric-optic effect of Ba_{0.5} Sr_{0.5} TiO₃ thin films[J]. J Appl Phys, 2010, 107(7):074105-74110.
- [7] CHUN Y H, HONG J S, BAO P, et al. BST-varactor tunable dual-mode filter using variable Z_c transimission line[J]. IEEE Microw Wireless Compon Lett, 2008, 18 (3): 167-169.
- [8] CHONG K B, KONG L B, CHEN Linfeng, et al. Improvement of dielectric loss tangent of Al₂O₃ doped Ba_{0.5} Sr_{0.5} TiO₃ for tunable microwave devices[J]. J Appl Phys, 2004, 95(3):1416-1419.
- [9] VOROBIEV A, RUNDQVIST P, KHAMCHANE K, et al. Silicon substrate integrated high Q-factor parallel-plate ferroelectric varactors for microwave millimeter wave applications [J]. Appl Phys Lett, 2003, 83 (15):3144-3146.
- [10] HUNTER I C, RHODES J D. Electronically tunable microwave bandpass filters [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1982, 30(9):1353-1360.
- [11] SUHERMAN P M, JACKSON T J, TSE Y Y, et al. Microwave properties of Ba_{0.5} Sr_{0.5} TiO₃ thin film coplanar phase shifters[J]. J Appl Phys, 2006, 99(104101): 1-7.
- [12] KIM B W, YUN S W. Varactor-tuned combline bandpass filterusing step-impedance microstriplines[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech ,2004,52(4):1279-1283.
- [13] 甘本祓,吴万春.现代微波滤波器的结构与设计[M]. 北京:科学出版社,1973:191-194.
- [14] GRUVERMAN A, RODRIGUEZ B J, NEMANICH R J, et al. Nanoscale observation of photoinduced domain pinningand investingation of imprint behavior in ferroelectric thinfilms[J]. J Appl Phys, 2002, 92(5):2734-2739.
- [15] ABE K, KOMATSU S, YANASE N, et al. Asymmetric ferroelectricity and anomalous current conduction in heteroepitaxial BaTiO₃ thin films[J]. Jpn J ApplPhys, 1997, 36(9B):5846-5853.
- [16] KIGHELMAN Z, DAMJANOVIC D, CANTONI M, et al. Properties offerroelectric PbTiO₃ thin films [J]. J Appl Phys, 2002, 91(3):1495-1501.