

文章编号: 2095-4980(2020)02-0330-04

基于 GaAs 变容二极管的电调滤波器芯片设计

李世峰

(中国电子科技集团公司 第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

摘要: 介绍基于 GaAs 变容二极管工艺的电调滤波器芯片的研究与设计, 包括变容材料制备、二极管模型建立以及电路设计。设计多款电调滤波器, 工作频段范围覆盖 1~19 GHz。测试结果显示, 电调滤波器具有超过一个倍频程的调谐范围, 器件击穿电压大于+30 V。本文选取中心频率为 2~5 GHz 可调的一款电调滤波器进行详细介绍, 控制电压范围为 0~15 V, 插入损耗在 10 dB 左右, 输入和输出驻波(电压驻波比)均优于 1.8。设计的系列化电调滤波器具有一致性高、小型化、低成本和免调试等优势, 拥有良好的应用前景。

关键词: 砷化镓; 单片微波集成电路(MMIC); 电调滤波器

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018316

Design of tunable filter chip based on GaAs varactor diode

LI Shifeng

(The 13th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang Hebei 050051, China)

Abstract: This paper introduces the research and design of the tunable filter based on the GaAs varactor technology, including the preparation of the variable capacitance material, the establishment of the diode model and the circuit design. Several tunable filters are designed, and the frequency range covers 1~19 GHz. The test results show that the tunable filter has more than one frequency doubling range, the breakdown voltage of the device is greater than 30 V. In this paper, a tunable filter with central frequency 2~5 GHz adjustable is introduced in detail. The control voltage range is 0~15 V, the insertion loss is about 10 dBm, and the input and output return VSWR(Voltage Standing Wave Ratio) are better than 1.8. The series of tunable filters designed bear the advantages of high consistency, miniaturization, low cost and debugging-free, and have good application prospects.

Keywords: GaAs; Monolithic Microwave Integrated Circuit(MMIC); tunable filter

随着微波集成电路(MMIC)技术的飞速发展, 针对跳频通信系统中跳频滤波器的高集成度、小型化、多功能复用以及可重构的要求, 传统体积大、集成度低的微波滤波器已不能满足需求。使用电调滤波器芯片不仅可以大大缩小系统的尺寸和降低复杂性, 并且可以适应多通信协议复用要求, 因此电调滤波器的研究与设计近年来已成为研究热点之一。

目前, 电调滤波器的研究领域已有很多研究成果, 包括变容二极管滤波器^[1]、钇铁石榴石铁氧体(Yttrium-Iron-Garnet, YIG)滤波器^[2]、微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)滤波器等^[3-17]。

本文介绍了基于 GaAs 变容二极管工艺的电调滤波器的研究与设计, 包括变容材料制备、二极管模型建立以及电路设计。最终设计了多款电调滤波器, 工作频段范围覆盖 1~19 GHz, 测试结果显示, 电调滤波器具有超过一个倍频程的调谐范围, 器件击穿电压大于+30 V。由于篇幅有限, 本文仅选取其中一款芯片进行详细介绍, 中心频率变化范围为 2~5 GHz, 电调电压为 0~15 V, 实测插入损耗为 10 dB 左右, 输入和输出的驻波比(VSWR)均优于 1.8。

收稿日期: 2018-11-07; 修回日期: 2019-03-19

作者简介: 李世峰(1986-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为微波单片集成电路的设计。email:li_525lx@163.com

1 材料制备

变容二极管按照材料不同可分为硅变容管和砷化镓变容管，一般砷化镓变容管具有更高的工作频率和更高的 Q 值，因此在许多高效率 and 低噪声应用中被优先选用，本次设计使用中电十三所自主生产的外延材料。

变容二极管管芯的主要部分是 PN 结，材料通常采用低电阻(重掺杂)的 N+型衬底，在衬底表面上外延生长一层电阻率不同的 N 型薄层，在其上制作二氧化硅保护层，再用光刻和氧化扩散的方法形成一层 P 型层，一般是 P+，最后在 N+和 P+两面都形成金属与半导体的欧姆接触而制作电极。

重掺杂突变 PN 结的势垒电容可表示为

$$C_i = \frac{A\epsilon_r\epsilon_0}{\delta} \approx A\epsilon_r\epsilon_0 \sqrt{\left[\frac{2\epsilon_r\epsilon_0}{q} \cdot \frac{1}{N_D} U_i \right]^{\frac{1}{2}}} \tag{1}$$

此电容即是结电容 C_j ，对应结上的电压 $V_i = \phi - U$ ，其中 ϕ 是 PN 结接触电势差， U 是 PN 结上外加电压。经过变换后的电容值可统一表示为

$$C_j(U) = C_j(0) \left/ \left(1 - \frac{U}{\phi} \right)^m \right. \tag{2}$$

式中： m 称为结电容非线性系数，它的大小取决于半导体中掺杂浓度的分布状态，反应了电容随外加电压变化的快慢。

经过数次试验与改进，对半导体材料进行掺杂浓度以及厚度的调整，最终制作的变容二极管可以达到 30 V 以上的反向击穿电压，同时电容变比在 0 V 到 15 V 偏置电压下超过 4:1，可以满足电调滤波器的工作频率超过一个倍频程的调谐范围。

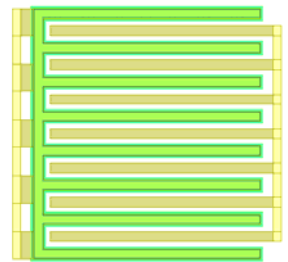


Fig.1 Varactor model
图 1 变容二极管模型

2 变容管器件模型

为获得单位面积更大电容值和变容比，变容二极管模型采用了叉指型结构，如图 1 所示。

在 MMIC 电路设计中，准确的无源和有源器件模型是设计电路的前提，而无源和有源模型的建立必须基于精确的器件参数测试。该设计使用的变容二极管属于无源器件，对待测模型采用 TRL 校准方法，测试不同偏压下的 S 参数，根据测试结果在仿真软件中对模型进行拟合，建立准确的可仿真模型。变容二极管的拟合模型如图 2 所示。

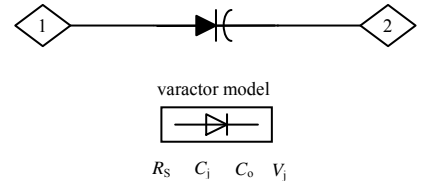


Fig.2 Fitting model of varistor diode
图 2 变容二极管拟合模型

3 电调滤波器的设计与仿真

基于现有滤波器拓扑的电调滤波器应当具有更加紧凑的结构以及较大的调谐范围。梳状线滤波器是一种能够得到宽阻带的带通结构，谐振器是由一端短路，一端经过一个集总电容 C_j 接地的一些平行耦合线所组成，梳状线滤波器的结构及等效电路如图 3 所示。

梳状线滤波器的集总电容 C_j 经常做得很大，以使谐振线在谐振时约为 $\lambda_0/8$ ，或更短些，这样可使滤波器很小。同时，在这类滤波器中，谐振线长度略超过半波长时出现第二通带，因此，若第一通带上谐振线是 $\lambda_0/8$ ，则第二通带的中心频率将为第一通带中心频率的 4 倍，梳状线滤波器在第一通带上面也有很宽的阻带。因此，梳状线带通滤波器成为理想的电调滤波器拓扑之一。

将梳状线滤波器的集总电容用变容二极管代替，同时为了减少电调滤波器在不同工作频段下的失配，将谐振器之间的平行耦合改为使用变容二极管的电容耦合。本文选取可调范围为 2~5 GHz 的电调滤波器进行介绍。电调滤波器的结构图及版图如图 4 所示。

在 ADS 中利用之前拟合的变容二极管模型进行了建模仿真，得到的 2~5 GHz 电调滤波器仿真结果如图 5 所示。

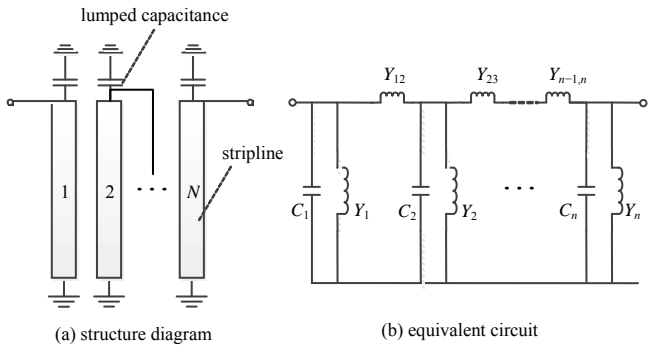


Fig.3 Structure and equivalent circuit of comb line band-pass filter
图 3 梳状线带通滤波器结构及等效电路

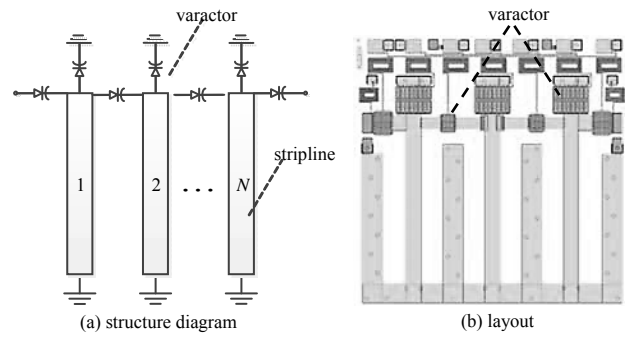


Fig.4 Structure and layout of electric regulating filter
图 4 电调滤波器的结构及版图

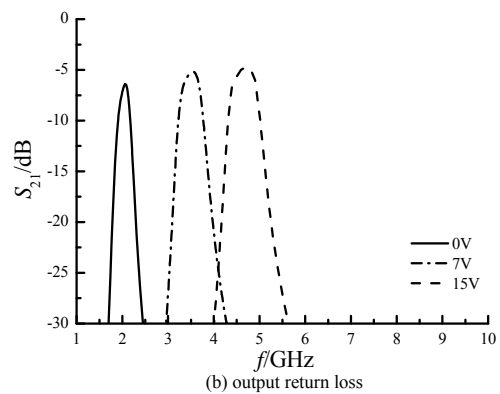
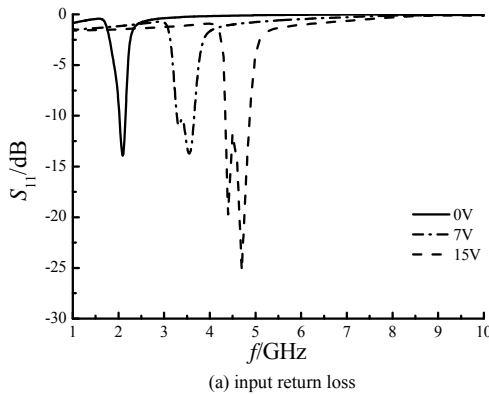


Fig.5 Simulation results
图 5 仿真曲线

4 测试结果与分析

采用中电十三所自主 GaAs 变容管工艺进行流片，芯片照片如图 6 所示。

流片完成之后在探针台对电调滤波器进行在片测试，测试中对芯片施加了不同偏置电压，电路测试结果与仿真结果对比如图 7 所示。

测试结果显示能够与仿真结果很好地吻合，拟合模型可以较为准确地预期电路的最终性能。

与国外同类产品 HMC891 型电调滤波器进行比较，本文介绍的电路测试结果与后者回波损耗的指标相当，插损略大(10 dB 左右)，后者插损为 8 dB 左右，主要是因为变容二极管制造过程增加了材料的厚度以获得更高的反向击穿电压以及更大变容比，从而使得电路在频率调谐范围方面要优于 HMC891，但造成了变容二极管的寄生电阻值偏大，最终增加了电路的插入损耗。

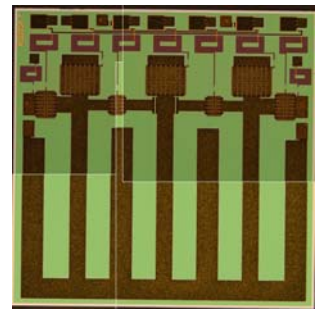


Fig.6 Chip photo
图 6 芯片照片

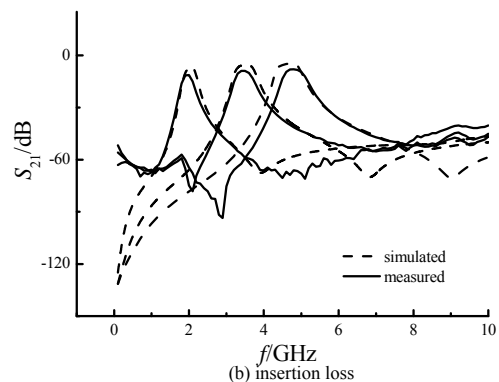
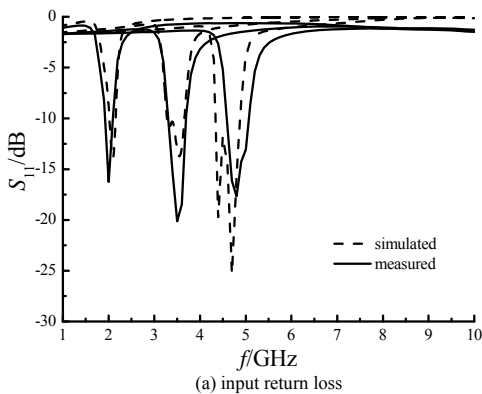


Fig.7 Test results
图 7 测试曲线

5 结论

本次设计对新材料和新工艺进行了全面设计验证，结果证明，材料性能已经可以达到实用要求，能够基本实现电路所要求的性能，并具有工艺可生产性。填补了国内在该工艺方向的空白，为今后同类产品进行国产化替代打下了坚实的基础。

参考文献：

- [1] LUGO C, PAPANOLYMEROU J. Six-state reconfigurable filter structure for antenna based systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(2):479-483.
- [2] ZHU Yun, QIU Gang, CHI Kai H, et al. A tunable X-band band-pass filter module using YIG/GGG layer on RT/Duroid substrate[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10):4195-4198.
- [3] ABBASPOUR-TAMIJANI Abbas, DUSSOPT Laurent, REBEIZ Gabriel M. Miniature and tunable filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(7):1878-1885.
- [4] ENTESARI Kamran, REBEIZ Gabriel M. A 12-18-GHz three-pole RF MEMS tunable filter[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 51(4):2566-2571.
- [5] KEANE W J. Narrow-band YIG filters aid wide-open receivers[J]. MicroWaves, 1980, 17(8):235-238.
- [6] HUNTER I C, RHODES J D. Electronically tunable microwave bandpass filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1982, 30(9):1354-1360.
- [7] BROWN A R, REBEIZ G M. A varactor-tuned RF filter[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(7):1157-1160.
- [8] LUGO C, PAPANOLYMEROU J. Electronic switchable bandpass filter using PIN diodes for wireless low cost system-on-a-package applications[J]. IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation, 2004, 151(6):497-502.
- [9] SANCHEZ-RENEADO M, GOMEZ-GARCIA R, ALONSO J I, et al. Tunable combline filter with continuous control of center frequency and bandwidth[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(1):191-199.
- [10] TOMBAK A, MARIA J-P, AYGUAVIVES F T, et al. Voltage-controlled RF filters employing thin-film Barium-Strontium-Titanate tunable capacitors[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(2):462-467.
- [11] NATH J, GHOSH D, MARIA J P, et al. An electronically tunable microstrip bandpass filter using thin-film Barium-Strontium-Titanate (BST) varactors[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(9):2707-2712.
- [12] DUSSOPT L, REBEIZ G M. Intermodulation distortion and power handling in RF MEMS switches, varactors, and tunable filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(4):1247-1256.
- [13] YOUNG R M, ADAM J D, VALE C R, et al. Low-loss bandpass RF filter using MEMS capacitance switches to achieve a one-octave tuning range and independently variable bandwidth[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2003, 47(1):1781-1784.
- [14] BRANK J, YAO J, EBERLY M, et al. RF MEMS-based tunable filters[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2001, 11(1):276-284.
- [15] ENTESARI K, REBEIZ G M. A differential 4-bit 6.5-10 GHz RF MEMS tunable filter[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(3):1103-1110.
- [16] PARK S J, LEE K Y, REBEIZ G M. Low-loss 5.15-5.70 GHz RF MEMS switchable filter for wireless LAN applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(11):3931-3939.
- [17] TRIPATHI V K. Asymmetric coupled transmission lines in an inhomogeneous medium[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1975, 23(9):734-739.