文章编号: 2095-4980(2015)06-0849-04

基于 SiGe BiCMOS 工艺的片上太赫兹滤波器

崔博华,李一虎,熊永忠

(中国工程物理研究院 太赫兹半导体器件研究室,四川 成都 611731)

摘 要:基于硅锗双极-互补金属氧化物半导体(SiGe BiCMOS)工艺,采用衬底集成波导(SIW) 结构,设计了几款片上太赫兹滤波器。测试结果中带宽和中心频率分别为 20 GHz@139 GHz, 20 GHz@168 GHz 和 26 GHz@324 GHz,结果表明制作的带通滤波器中心频率与设计的偏差很小; 滤波器在中心频率的插入损耗为-6 dB@139 GHz,-5.5 dB@168 GHz 和-5 dB@324 GHz。

关键词:滤波器;太赫兹;硅锗双极-互补金属氧化物半导体;衬底集成波导

中图分类号:TN713 文献标识码:A doi:10.11805/TKYDA201506.0849

Terahertz filter based on SiGe BiCMOS process

CUI Bohua, LI Yihu, XIONG Yongzhong

(Terahertz Semiconductor Device Laboratory, China Academy of Engineering Physics, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: Based on Silicon Germanium Bipolar Complementary Metal Oxide Semiconductor(SiGe BiCMOS) process technology, several terahertz filters with Substrate Integrated Waveguide(SIW) structures are designed. The measured results show that the deviation of the center frequency is very small compared with the design. The center frequencies and bandwidths of the filters are 20 GHz@139 GHz, 20 GHz@168 GHz and 26 GHz@324 GHz, respectively. The insertion losses of the filters on the center frequency are -6 dB@140 GHz, -5.5 dB@170 GHz and -5 dB@330 GHz, respectively.

Key words: filter; terahertz; SiGe BiCMOS; Substrate Integrated Waveguide

太赫兹(terahertz)波是电磁频率在 0.1 THz~10 THz 之间的电磁波,介于远红外光与微波之间,可应用于雷达、 通信、电子对抗、天文学、医学成像、无损检查、安全监察等众多领域,在通信方面具有传输容量大^[1-2]、波束 窄、保密性好^[3-5]等优势。为了把通信系统的体积和重量做得更小,成本控制得更低,把整个太赫兹通信系统集 成在芯片上,采用的是高频性能很好、工艺集成度高、制造成本低的 SiGe BiCMOS 工艺。

滤波器是太赫兹通信系统中必不可少的组成部分,也是技术含量较高的无源器件,其性能的优劣直接影响到 整个通信系统的性能,因此研究太赫兹滤波器对于太赫兹波段的开发和利用具有重要的意义。为了解决矩形波导 滤波器体积和空间大的问题,促进通信系统向小型化、微型化发展,使整个系统集成在一个封装内成为可能,本 文滤波器采用了 SiGe BiCMOS 工艺和 SIW 结构来实现^[6],打破了采用印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)、 低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fired Ceramic, LTCC)或者薄膜工艺制作 SIW 滤波器的传统方式,可以很好地 兼容到集成的片上系统之内。

1 SIW 技术与 SiGe BiCMOS 工艺

SIW 是一种新的微波传输线形式,利用金属过孔在介质基片上实现波导的场传播模式。该结构限制电磁波只能在金属通孔列阵和上下金属面之间传播,从而在介质基板上实现传统的金属波导的功能^[7-9],它的结构示意图如图 1 所示。SIW 的原理是把电磁波限制在两排金属孔和上下金属板形成的矩形腔内,且由于边上是过孔,横磁波(TM)不存在,主模为 TE10 模。SIW 兼有矩形波导和微带器件的优点,即具有低辐射、低插损、高 Q值、高功率容量、小型化和容易连接等优点;最大一个优点是能够同时将无源器件、有源器件和天线等所有通信系统器件集成在同一衬底,不同工艺制作的器件不需要进行转换。而它的缺点是工作频率一般在 30 GHz 以下,采用 SiGe BiCMOS 工艺克服了这个缺点,工作频率可以达到 100 GHz 甚至更高。

基于 SiGe BiCMOS 工艺来制作滤波器只涉及到 SiGe BiCMOS 工艺中的无源部分,如图 2 所示,金属层嵌 在二氧化硅层内部,金属层一共有 7 层,从下至上分别为 M1,M2,M3,M4,M5,TM1 和 TM2 层^[10],金属层的厚度 以及层间距由图 2 可知,金属层与金属层之间也可以通过金属柱连接,这样就可以把 TM2 作为上层金属板,M1 作为下层金属板,中间的金属层以及层间的金属柱可以相连成为从 TM2 到 M1 的金属柱,而且金属柱之间的距 离可以仅为 2 μm,从而实现了 SIW 结构。由于工艺精确度高,工作频率可以达到 330 GHz 乃至更高。



Fig.1 Structure of substrate integrated waveguide 图 1 基片集成波导结构示意图



Fig.2 Structure of SiGe BiCMOS 图 2 SiGe BiCMOS 工艺结构示意图

2 片上滤波器的设计

在滤波器的设计中考虑到 SiGe BiCMOS 的工艺情况,并综合考虑损 耗和带外抑制,选择了矩形波导结构的滤波器。首先设计出传统的金属波 导腔体滤波器,通过求解传统的金属波导的尺寸可以推算出基片集成波导 腔体的尺寸^[11];由于电磁波在有一定损耗的二氧化硅中传播,滤波器的长 度应该尽量短,以减小滤波器的损耗,所以把滤波器的耦合段也就是膜片 设计得很薄;滤波器的阶数越少损耗也越小,但是为了满足带外抑制的需 求,滤波器采用的阶数是三阶;滤波器是 SIW 结构,而与外部连接是通 过微带线,因此在滤波器的输入输出口处设计了微带到 SIW 的过渡,是 一种凹形过渡,它具有较宽的工作带宽和较小的插入损耗,同时此过渡结 构也减小了滤波器的长度和滤波器的损耗。

在高频结构仿真软件 HFSS 中建模,进行仿真并对滤波器的谐振腔、 耦合窗以及微带-SIW 等的各项参数进行优化,得到一个相对最优的模型, 如图 3 所示。按照这个模型的尺寸在 Candence 软件下设计 SiGe BiCMOS 工艺的版图,如图 4 所示,完成设计并进行流片。



Fig.3 Structure of the filter in HFSS 图 3 HFSS 中滤波器仿真结构



3 滤波器的测试

对滤波器进行版图的设计并流片,最后得到片上的滤波器,并对滤波器进行了测试。因为是片上测试,测试平台由探针台、探针与矢量网络分

Fig.4 Structure of the filter in Candence 图 4 Candence 中滤波器结构

析仪共同搭建而成。测试的具体过程为首先把矢量网络分析仪连接矢网的扩展件,使频率扩展到滤波器所对应的 频段(分别使用了 110 GHz~170 GHz,140 GHz~220 GHz 和 220 GHz~330 GHz 这 3 个频段的扩展件),扩展件的 2 个波导输出端口分别经弯波导连接到对应频段的 RF 探针;然后对矢网和探针进行校准,使 2 个探针接触在直通 金属线上时,矢网测试到的损耗为 0 dB;最后把探针分别接触到滤波器两侧的 pad 上,记录矢网测试数据,完 成测试。

140 GHz 滤波器测试结果与仿真结果对比图见图 5,显微镜实拍实物图如图 6 所示。滤波器大小为 1 900 μm × 800 μm × 10 μm,测试结果的中心频率为 139 GHz, 3 dB 带宽为 20 GHz,中心频率插入损耗为-6 dB。与仿真结果对比可见,中心频率稍有偏差,在 1%以内,插损增加了 1 dB 左右。

170 GHz 滤波器测试结果与仿真结果对比图见图 7,显微镜实拍实物图见图 8。滤波器大小为 1 550 μm× 700 μm×10 μm,测试结果的中心频率为 168 GHz, 3 dB 带宽为 20 GHz,中心频率插入损耗为-5.5 dB;与仿真 结果对比可见,中心频率稍有偏差,在 1%以内,插损增加了 1 dB 左右。 330 GHz 滤波器测试结果与仿真结果对比图见图 9,显微镜实拍实物图如图 10 所示。滤波器大小为 900 μm × 400 μm × 10 μm,测试结果的中心频率为 324 GHz, 3 dB 带宽为 20 GHz,中心频率插入损耗为-5 dB;与仿真结果对比可见,中心频率稍有偏差,在 2%以内,插损增加了 1 dB 左右。



Fig.5 Simulation and test results of the 140 GHz filter 图 5 140 GHz 滤波器仿真和测试结果





Fig.9 Simulation results of the 330 GHz filter 图 9 330 GHz 滤波器仿真和测试结果



Fig.6 Microscope photograph of the 140 GHz filter 图 6 显微镜下 140 GHz 滤波器实物图



Fig.8 Microscope photograph of the 170 GHz filter 图 8 显微镜下 170 GHz 滤波器实物图



Fig.10 Microscope photograph of the 330 GHz filter 图 10 显微镜下 330 GHz 滤波器实物图

首先关于滤波器损耗的问题,基于 SiGe BiCMOS 工艺的片上太赫兹滤波器的损耗由辐射损耗、导体欧姆损 耗和介质损耗 3 部分组成。辐射损耗是由金属化过孔之间存在缝隙导致能量的泄漏产生,在 SiGe BiCMOS 工艺 中空间距离远远小于波长的十分之一,辐射损耗可以忽略不计;导体欧姆损耗是由于金属波导壁的电导率不是无 穷大而带来的,损耗的大小与金属的电导率和波导的宽和高有关,而在 SiGe BiCMOS 工艺下电导率和波导的高 已经确定,波导的宽关系着滤波器的工作频段因而也是确定值,因此导体欧姆损耗是个确定值;介质损耗是在电 场作用下,由于介质电导和介质极化的滞后效应,在其内部引起的能量损耗,损耗的大小与滤波器的体积有着直 接的关系,3款滤波器中 330 GHz 的滤波器体积最小而 140 GHz 滤波器体积最大,所以导致 330 GHz 滤波器的 损耗最小,140 GHz 滤波器损耗最大。

在本次流片中,二氧化硅层的介电常数偏高且损耗角正切值也增加了,滤波器的谐振频率与二氧化硅的介电 常数和磁导率都成反比,所以介电常数增大使得滤波器的中心频率稍有降低;而损耗角正切表示电介质在交流电 压下的有功损耗和无功损耗之比,值越大,介质损耗越大,因此增加了滤波器的插损;所以这3款片上滤波器的 测试与仿真结果的对比中,中心频率都比仿真结果频率稍微偏低,而且插入损耗稍大了1dB。

4 结论

设计制作出了基于 SiGe BiCMOS 工艺的片上太赫兹滤波器,测试结果中带宽和中心频率分别为 20 GHz@ 139 GHz,20 GHz@168 GHz 和 26 GHz@324 GHz,中心频率处插损分别为-6 dB,-5.5 dB 和-5 dB,可以很好地应用到集成的片上系统中。

参考文献:

- YAO Jianquan, CHI Nan, YANG Pengfei, et al. Study and outlook of terahertz communication technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9):2213-2233.
- [2] Nagatsuma T,Hirata A. 10 Gbit/s wirless link technology using the 120 GHz band[J]. NTT Technical Review, 2004,2(11): 58-62.
- [3] Yamaguchi R,Hirata A,Kosugi T,et al. 10 Gbit/s MMIC wireless link exceeding 800 meters[C]// 2008 IEEE Radio and Wireless Symposium. Orlando,FL:[s.n.], 2008:695-698.
- [4] Miles R E,ZHANG X C,Eisele H,et al. Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects[M]. Spiez, Switzerland:Springer, 2007.
- [5] Crowe T W. Multiplier technology for terahertz applications[C]// IEEE Sixth International Conference on Terahertz Electronics Proceedings,1998. Leeds, England:[s.n.], 1998:58-61.
- [6] HU Sanming, WANG Lei, XIONG Yongzhong, et al. A 434 GHz SiGe BiCMOS transmitter with an on-chip SIW slot antenna[C]// 2011 IEEE Asian Conference on Solid State Circuits Conference(A-SSCC). Jeju Island, Korea:[s.n.], 2011:269–272.
- [7] 张胜,王子华,肖建康,等. 基于基片集成波导(SIW)的双模带通滤波器[J]. 微波学报, 2007,23(2):55-58. (ZHANG Sheng, WANG Zihua,XIAO Jiankang, et al. Dual-mode bandpass filters based on substrate integrated waveguide(SIW)[J]. Journal of Microwaves, 2007,23(2):55-58.)
- [8] Leviatan Y,LI P G,Adams A T,et al. Single-post inductive obstacle in rectangular waveguide[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1983,31(10):806-812.
- [9] Dealandes D, WU Ke. Single-substrate integration technique of planar circuits and waveguide filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003,51(2):593-596.
- [10] HOU Debin,XIONG Yongzhong,Goh W L,et al. A D-Band cascode amplifier with 24.3 dB gain and 7.7 dBm output power in 0.13 μm SiGe BiCMOS technology[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2012,22(4):191-193.
- [11] 曾奇远. LTCC 基片集成波导滤波器的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2008. (ZENG Qiyuan. Research on the substrate integrated waveguide filter based on LTCC[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.)

作者简介:



崔博华(1986-),男,四川省乐山市人,硕 士,研究实习员,主要研究方向为微波毫米波 MMIC设计和研制.email:cuibohua@163.com. **李一虎**(1986-),男,辽宁省阜新市人,博士,助理研究员,主要研究方向为微波毫米波 MMIC 设计和研制.

熊永忠(1963-),男,湖北省仙桃市人,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为微波毫米波 MMIC设计和研制.