

文章编号: 2095-4980(2023)07-0891-04

114.3~123 GHz 六阶带通滤波器设计

张宇驰, 张波, 樊勇

(电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 基于经典的半波长滤波器理论, 设计了一种用于太赫兹通信系统的半波长磁耦合矩形波导带通滤波器。仿真结果表明, 该滤波器中心频率为 118 GHz, 通带为 114.3~123 GHz, 相对带宽为 7.4%; 在 131.8 GHz 处的抑制度大于 30 dB, 通带插入损耗小于 0.8 dB, 通带回波损耗大于 20 dB。经过实物测试, 测试结果与仿真结果基本一致。这种滤波器的结构简单, 制作难度低。

关键词: 带通滤波器; 半波长磁耦合; 矩形波导; 太赫兹

中图分类号: TN713

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022167

Design of band-pass filter for terahertz communication systems

ZHANG Yuchi, ZHANG Bo, FAN Yong

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu
Sichuan 611731, China)

Abstract: Based on the classical half-wavelength filter theory, a half-wavelength magnetically coupled rectangular waveguide bandpass filter is studied and designed for terahertz communication system. The simulation results show that the center frequency of the filter is 118 GHz; the passband is 114.3~123 GHz; the relative band-width is 7.4%; the attenuation at 131.8 GHz is more than 30 dB; the passband insertion loss is less than 0.8 dB; and the pass-band return loss is more than 20 dB. After the physical test, the test results are basically consistent with the simulation results. This filter bears a simple structure and a low fabrication difficulty.

Keywords: band-pass filter; half wavelength magnetic coupling; rectangle waveguide; terahertz

太赫兹波是指频率范围为 0.1~10 THz 的电磁波, 该波段处于毫米波与光波之间, 具有大带宽、高安全性、强方向性和器件尺寸小等诸多特点, 这些优势使得太赫兹波在很多领域具有极其广泛的应用前景。同时太赫兹频段存在大量尚未开发的频谱资源, 具有超高速无线通信的潜力, 太赫兹通信技术作为第六代移动通信技术(6G)的重要选择之一, 一直是太赫兹科学技术的热点研究领域^[1]。

波导结构相较于微带线、带状线等结构, 其功率容量更高, 插入损耗更小, 同时在太赫兹波段其尺寸较小, 因此在太赫兹频段无源器件中被广泛采用。滤波器作为现代微波通信系统中必不可少的器件, 是一种典型的频率选择装置, 能够有效抑制无用信号通过, 保留有用信号, 即对信号进行频域处理^[2], 将输入信号频谱中不需要的频率成分去除^[3]。因此, 滤波器性能的优劣直接影响整个通信系统的质量^[4]。太赫兹波作为当前电子技术解决未来电磁波频谱拥挤问题而开拓的主要频段, 在通信、反恐侦测和天文探测等方面得到了广泛关注, 而滤波器则是太赫兹通信中的重要器件, 因此研究太赫兹频段的滤波器有非常高的应用价值。随着太赫兹技术的不断发展, 对太赫兹滤波器的指标也提出了更高的要求。随着电磁环境越来越复杂, 频谱拥挤越来越严重, 这对无源微波滤波器的性能指标也提出了更高的要求。如何设计高性能的滤波器减少系统对信号的衰减, 成为人们重点关注的话题^[5]。因此, 具有低插损、高选择性、易于加工的高性能太赫兹滤波器已成为现代微波滤波器设计的一个重要研究方向。

收稿日期: 2022-09-08; 修回日期: 2022-11-10

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1801502); 国家自然科学基金资助项目(62022022; 62101107); 中国博士后科学基金资助项目(2021TQ0057)

本文设计的 118 GHz 带通滤波器用于在接收系统中抑制混频器产生的镜像频率, 要求相对带宽为 7.4%, 插入损耗小于 1 dB, 在 131.8 GHz 处的抑制度大于 30 dB。考虑到 F 波段滤波器的器件加工组装精确度要求, 本文采用经典的半波长磁耦合滤波器设计理论, 对中心频率为 118 GHz 的波导带通滤波器进行了研究和设计。之后采用高精度数控铣削工艺(Computer Numerical Control, CNC)沿波导 E 面剖分加工出上下 2 个金属腔体, 对设计的波导带通滤波器进行了加工和装配, 最后对滤波器实物进行测试, 仿真和测试的一致性证明了本文滤波器的高性能。

1 带通滤波器设计

本文设计的滤波器为波导滤波器, 与传统的微带滤波器^[6]相比, 具有插入损耗低、功率容量大、无辐射损耗、结构简单、易于制造和批量生产等优点。因此, 综合考虑, 采用矩形波导设计带通滤波器。选用标准波导 WR-8, 具体尺寸为 2.032 mm×1.106 mm, 主模频率范围为 92.2~40 GHz。矩形波导传输的主模为 TE_{10} 模, 波长可以用文献[4]的公式计算。整体的波导带通滤波器共有 6 个单模谐振腔结构, 每个谐振腔的主谐振模式都为 TE_{101} 模, 因此谐振腔的初始长度近似等于通带中心频率所对应的半波长。减小谐振腔的长度, 可以使整体通带的频率升高; 增大谐振腔的长度, 则会导致整体通带频率减小^[7]。谐振腔的宽度与 WR-8 波导宽度一致, 从而减少优化参数, 降低设计难度; 整体滤波器结构左右完全对称, 从而缩短仿真时间^[8]。整体的滤波器设计先在滤波器仿真软件中计算出初始值, 之后再参数代入到 HFSS 软件中进行精确仿真。

2 带通滤波器仿真

设计的滤波器结构为六阶磁耦合结构。参数 L_i 为谐振腔的长度, 谐振腔的宽度与标准矩形波导的宽度相同, W_i 为耦合腔的宽度, 耦合腔的厚度为 0.3 mm, 圆角为 0.3 mm。滤波器的俯视图以及各参数对应位置如图 1 所示

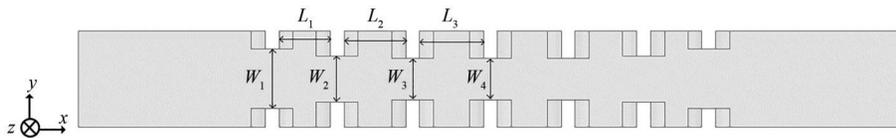


Fig.1 HFSS model of F-band waveguide bandpass filter
图 1 F 波段波导带通滤波器 HFSS 模型

设计中, 发现改变谐振腔的长度对中心频率的偏移有很大的影响。需要根据中心频率的要求并且充分考虑加工导致的圆角对滤波器响应的影响, 从而进行适当的调整。由于频率与谐振腔的长度成反比, 增加 L_i 会降低中心频率, 减小 L_i 会提高中心频率。同时发现 W_i 也对通带有一定的影响, 通过对 W_i 的调整可以进一步改善滤波器的特性。耦合腔的长度对结果的影响主要体现在带宽上。在其他参数不变的情况下, 增加耦合腔长度会降低带宽, 但这种调节方式是有限度的。在带宽不变的情况下, 更多的谐振腔能够提高对无用频率的抑制度, 但同时也会增加设计难度和插入损耗, 因此谐振腔的数量应综合考虑。在 HFSS 中进行优化后得到的参数为: $L_1=0.74$ mm、 $L_2=1.02$ mm、 $L_3=1.08$ mm、 $W_1=1.39$ mm、 $W_2=1.17$ mm、 $W_3=1.09$ mm、 $W_4=1.07$ mm, 其仿真结果如图 2 (a) 所示。

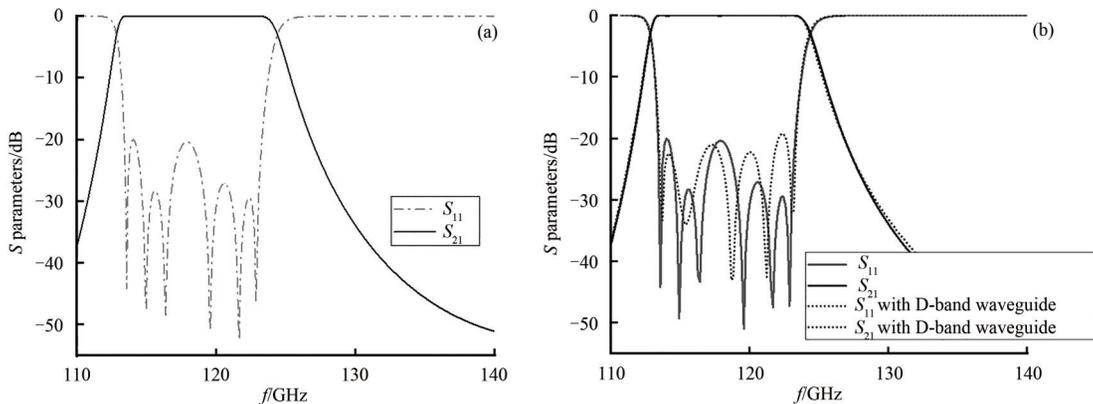


Fig.2 HFSS simulation results of F-band waveguide bandpass filter
图 2 F 波段波导带通滤波器 HFSS 仿真结果

由于实验室中暂时没有 F 波段的矢量网络分析仪扩频组件, 需要用 D 波段的组件进行测试, 但由于 D 波段波导尺寸和 WR-8 标准波导尺寸不一致, 这个差异会影响最后的测试结果。因此在 HFSS 模型中, 在该带通滤波器的输入输出端口添加一段 D 波段波导, 之后再行仿真验证, 仿真结果如图 2(b) 所示。

3 带通滤波器测试

根据仿真模型进行加工, 采用 CNC 工艺, 用半径 0.3 mm 的高速铣刀加工腔体, 加工出来的腔体如图 3(a) 所示。使用矢量网络分析仪对加工后的腔体进行测试, 测试结果与仿真结果对比如图 3(b) 所示。可以发现, 实验结果和仿真结果吻合度较好, 带内传输极点分布与仿真接近, 实测整体回波损耗优于 18 dB。滤波器的通带整体往低频有约 0.7 GHz 的频偏, 这是由于加工误差所导致, 带内插入损耗的实测与仿真结果对比如图 4 所示, 实测带内插入损耗优于 0.8 dB, 与仿真模型材料为铜的仿真结果吻合度较好。

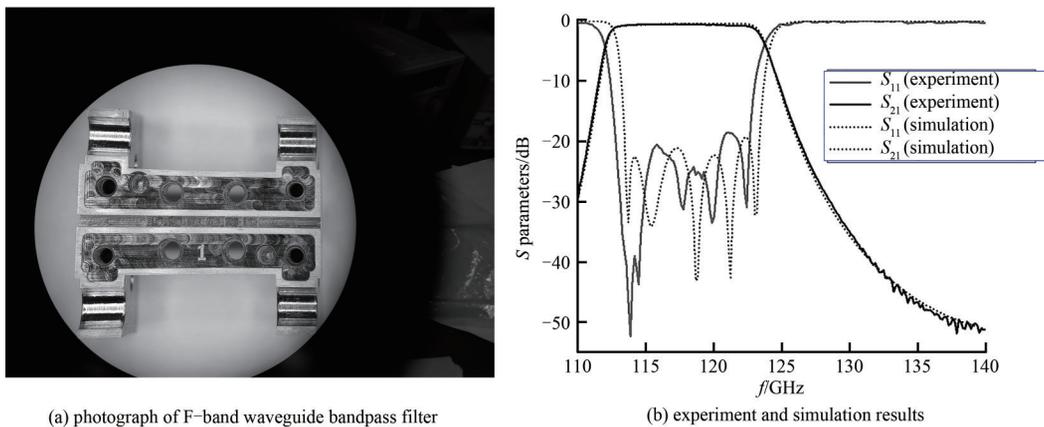


Fig.3 Photograph of F-band waveguide bandpass filter and experiment and simulation results

图3 F波段波导带通滤波器实物图与测试、仿真结果图

4 结论

本文采用波导结构设计了一种带通滤波器, 采用 TE₁₀₁ 单模谐振腔和耦合部分组成, 该结构设计简单, 加工方便。考虑到测试时需要使用 D 波段扩频展件, 对扩频件与滤波器输入输出波导尺寸的不一致性进行了验证, 结果显示其对滤波器带内的 S₁₁ 有所影响。通过矢量网络分析仪对实物进行了测试, 测试结果表明, 滤波器通带为 114.3~122 GHz, 带内插损优于 0.8 dB, 131.8 GHz 处的抑制度高于 40 dB, 与仿真结果基本一致。

参考文献:

- [1] 牛中乾,张波,周震,等. 220 GHz 太赫兹全双工高速通信系统 [J]. 无线电通信技术, 2019, 45(6): 643-647. (NIU Zhongqian,ZHANG Bo,ZHOU Zhen,et al. 220 GHz terahertz full-duplex high-speed communication system[J]. Radio Communication Technology, 2019,45(6):643-647.)
- [2] 熊阳. 基于空间映射的 Ka 频段带通滤波器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(3):273-276. (XIONG Yang. Design of Ka-band bandpass filter based on space mapping method[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(3):273-276.)
- [3] FENG Yinian,ZHANG Bo,LIU Yang,et al. WR-2.8 band pseudoelliptic waveguide filter based on singlet and extracted pole resonator[J]. IEEE Access, 2019(7):54705-54711.
- [4] QIAO Chuanqi,ZHANG Bo,FAN Yong. Design of band-pass filter for terahertz communication systems[C]// 2020 13th UK-Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies(UCMMT). Tianjin,China:IEEE, 2020:1-3.

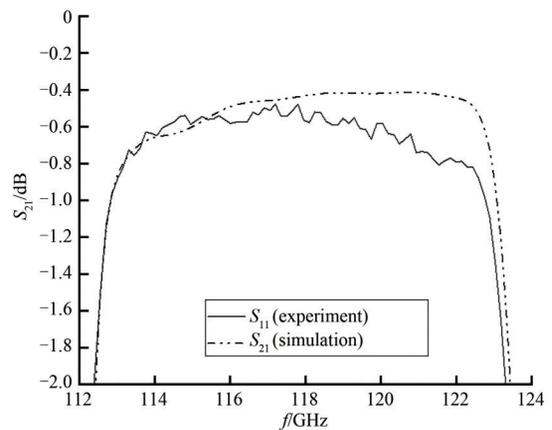


Fig.4 Comparison of insertion loss of experiment and simulation for F-band waveguide bandpass filter

图4 F波段波导带通滤波器测试与仿真的插损对比

- [5] 李田睿,张波,樊勇. 110 GHz 带通太赫兹滤波器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(1):14-17,23. (LI Tianrui, ZHANG Bo,FAN Yong. Design of 110 GHz band-pass terahertz filter[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(1):14-17,23.)
- [6] YOROZU T,HIRANO M,OKA K,et al. Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface[J]. IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan, 1987,2(8):740-741.
- [7] FENG Yinian,ZHANG Bo,LIU Yang,et al. A 200~225 GHz manifold-coupled multiplexer utilizing metal waveguides[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021,69(12):5327-5333.
- [8] YANG Hao,DHAYALAN Y,SHANG Xiaobang,et al. WR-3 waveguide bandpass filters fabricated using high precision CNC machining and SU-8 photoresist technology[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018,8(1):100-107.

作者简介:

张宇驰(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为毫米波、太赫兹器件 .email:zyc1744833548@163.com.

张波(1982-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为太赫兹固态电路与系统.

樊勇(1963-), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为毫米波与太赫兹技术及系统.

(上接第 876 页)

作者简介:

张可越(1994-), 女, 在读博士研究生, 主要研究方向为微波器件和电路非线性效应 .email:penny007@stu.xjtu.edu.cn.

陈雄(1990-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为大功率微波电路与器件.

赵小龙(1989-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为射频无源器件互调干扰研究和宽禁带半导体核辐射探测器件.

曹智(1993-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为微波无源器件的无源互调及互调测试.

张松昌(1983-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电接触、射频系统可靠性.

周昊楠(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波器件和电路非线性效应.

贺永宁(1971-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽禁带半导体器件、纳米电子器件和微波无源器件等.