

文章编号: 2095-4980(2021)02-0181-04

一种低插入损耗的 180 GHz 腔体滤波器

熊 阳, 裴乃昌, 何毅龙, 黄 建

(中国西南电子技术研究所, 四川 成都 610036)

摘要: 基于 H 形感性窗结构设计了一款低插入损耗的 8 阶波导腔太赫兹滤波器。经 Ansoft HFSS 对滤波器进行仿真优化后, 滤波器采用传统的数控铣进行实物加工。测试结果表明: 滤波器的中心频率位于 179.1 GHz, 1 dB 相对带宽为 8.7%。滤波器中心频率处的插入损耗为 0.34 dB, 回波损耗优于 18.9 dB。所设计的太赫兹腔体滤波器具有低插入损耗、高选择性、高带外抑制等优点, 可以满足太赫兹通信系统的要求。

关键词: 太赫兹; 带通滤波器; 腔体滤波器; 低插入损耗

中图分类号: TN713⁺.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020085

A low insertion loss 180 GHz cavity bandpass filter

XIONG Yang, PEI Naichang, HE Yilong, HUANG Jian

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu Sichuan 610036, China)

Abstract: A 8-pole terahertz (THz) cavity bandpass filter with low insertion loss based on H ladder structure is presented. The filter is simulated and optimized by Ansoft HFSS, and it is finally processed by computer numerical control milling. The measured results show that the center frequency of the filter is located at 179.1 GHz with 1 dB fraction bandwidth of 8.4%. The insertion loss at 179.1 GHz is 0.34 dB, and the return loss is lower than 18.9 dB. The proposed THz cavity bandpass filter possesses the merits of low insertion loss, high selectivity and high stopband suppression, which can meet the requirements of THz communication systems.

Keywords: terahertz; bandpass filter; cavity filter; low insertion loss

随着太赫兹高速通信、无损检测、安检等应用的兴起, 太赫兹无源器件受到越来越多的关注。作为太赫兹收发前端的关键器件, 太赫兹滤波器在抑制各种杂谐波、滤除镜频干扰方面发挥着十分重要的作用。

传统微带形滤波器由于 Q 值较低, 具有较大的插入损耗^[1-3]。对于太赫兹通信系统, 较高的带内插入损耗意味着系统后级的功放和低噪放必须具备更高的功放能力才能弥补滤波器对有用信号的衰减。然而, 当前成熟稳定的太赫兹功放芯片十分昂贵和稀缺。波导腔具有高 Q 值^[4], 结构简单, 易于加工等特点, 因此, 太赫兹波导滤波器广泛用于太赫兹通信系统中^[5-6]。

本文设计了一款低插入损耗的 8 阶波导腔太赫兹带通滤波器。滤波器的中心频率位于 179.1 GHz, 1 dB 相对带宽为 8.7%, 中心频率处的插入损耗为 0.34 dB, 带内回波损耗优于 18.9 dB, 带外 195 GHz 处的抑制度为 49.3 dB。

1 180 GHz 滤波器设计

图 1 为 180 GHz 腔体滤波器的结构示意图。从图中可以看到, 滤波器由输入/输出波导口以及 8 个谐振器腔级联构成。滤波器采用标准的 WR5 矩形波导 ($a=1.3$ mm, $b=0.65$ mm) 实现输入端口和输出端口的连接。

太赫兹滤波器的技术指标如下:

通带范围: 175~185 GHz; 插入损耗: ≤ 1 dB; 回波损耗: ≥ 20 dB;

带外抑制: DC~165 GHz ≥ 40 dB, 195~220 GHz ≥ 40 dB。

收稿日期: 2020-03-04; 修回日期: 2020-05-10

作者简介: 熊 阳(1990-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为微波、毫米波电路设计。email: xiongyang0291@163.com

考虑加工误差会导致滤波器中心频率产生偏移,在滤波器通带的两侧预留 2~3 GHz 保护带宽。因此实际的通带范围约为 173~188 GHz。此外,为保证频偏后的滤波器带外抑制仍然优于 40 dB,将滤波器的阶数设置为 8。

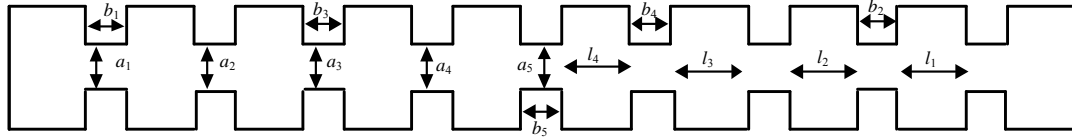


Fig.1 Structure of the 180 GHz cavity filter
图 1 180 GHz 腔体滤波器结构

1) 根据滤波器设计指标,给出低通原型 g 值
对于切比雪夫低通原型,其 g 值由式(1)给出^[7]:

$$\begin{cases} g_0 = 1 \\ g_1 = \frac{2}{\alpha} \sin \frac{\pi}{2n} \\ g_i = \frac{1}{g_{i-1}} \times \frac{4 \sin[(2i-1)\pi/2n] \sin[(2i-3)\pi/2n]}{\alpha^2 + \sin^2[(i-1)\pi/n]}, \quad i = 2, 3, \dots, n \\ g_{n+1} = \begin{cases} 1, & n \text{ 为奇数} \\ \coth^2(\beta/4), & n \text{ 为偶数} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\beta = \ln[\coth(L_{Ar}/17.37)]$, L_{Ar} 为带内波纹; $\alpha = \sinh(\beta/2n)$ 。

因此,当给定带内波纹 L_{Ar} 和滤波器阶数 n 时,求得低通原型的 g 值为:

$g_0=1, g_1=1.018\ 916, g_2=1.451\ 775, g_3=1.968\ 263, g_4=1.656\ 963, g_5=2.025\ 198, g_6=1.610\ 380, g_7=1.774\ 410, g_8=0.833\ 650, g_9=1.222\ 235$ 。

2) 计算谐振器的长度和电感膜片的尺寸

根据低通原型的 g 值,可以计算出阻抗变换器 K 值。第 i 个谐振器的长度值可由式(2)给出^[8]:

$$L_i = \frac{1}{2} - \frac{1}{4\pi} \left[\arctan \frac{2K_{i-1,i}}{Z_0 [1 - (K_{i-1,i}/Z_0)^2]} + \arctan \frac{2K_{i,i+1}}{Z_0 [1 - (K_{i,i+1}/Z_0)^2]} \right] \quad (2)$$

第 i 个电感膜片的等效电抗可由式(3)计算得出^[8]:

$$X_{i,i+1} = \frac{K_{i,i+1}}{1 - (K_{i,i+1}/Z_0)^2} \quad (3)$$

根据电抗 $X_{i,i+1}$ 可以计算出电感膜片的尺寸。

3) 180 GHz 腔体滤波器仿真

将上述计算得到的滤波器尺寸作为初始值,利用 Ansoft HFSS 对滤波器进行仿真和优化,优化后的尺寸如表 1 所示。图 2 为太赫兹腔体滤波器的 S 参数仿真结果。从图 2 中可以看到,滤波器的通带范围为 173~188 GHz,回波损耗优于 20 dB,在两倍带宽处的带外抑制分别为 115 dB 和 67.8 dB。由于太赫兹滤波器对尺寸非常敏感,因此,对滤波器进行了 $\pm 10\ \mu\text{m}$ 的容差性仿真,如图 3 所示。可以看到,滤波器在 $\pm 10\ \mu\text{m}$ 的加工误差下,仍然可以保证 175~185 GHz 的通带特性。

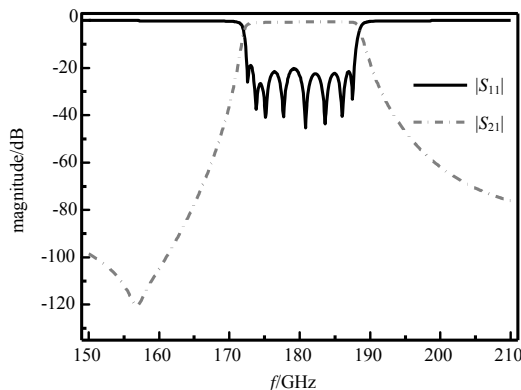


Fig.2 Simulated S-parameters of cavity filter
图 2 腔体滤波器 S 参数仿真结果

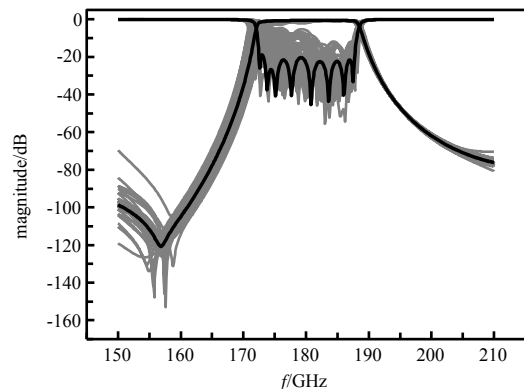


Fig.3 Tolerance analysis of the filter
图 3 滤波器容差性分析

表 1 太赫兹腔体滤波器尺寸参数(单位: mm)
Table 1 Parameters of terahertz cavity filter(unit:mm)

l_1	l_2	l_3	l_4	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
0.754	0.886	0.921	0.927	0.802	0.637	0.583	0.573	0.573	0.18	0.214	0.202	0.202	0.206

2 滤波器加工及测试

滤波器采用高精度($\pm 10 \mu\text{m}$)的数控机床进行加工。为减小装配误差影响,滤波器沿矩形波导 E 面剖分为 2 个完全对称的腔体结构。同时,为了考虑机械加工的可实现性,滤波器的直角倒角均设为 0.2 mm。滤波器腔体材料为黄铜,并在其表面镀 1 μm 厚度的金层。滤波器的整体尺寸为 30 mm \times 15 mm \times 20 mm,如图 4 所示。

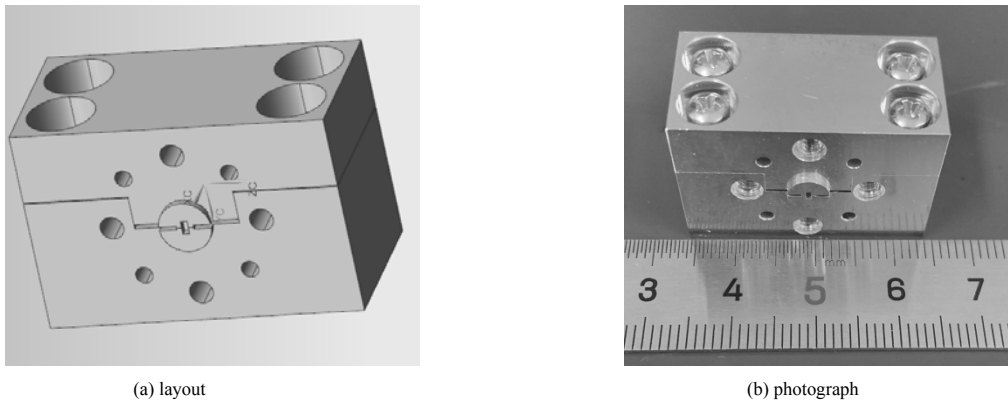


Fig.4 THz cavity filter
图 4 太赫兹腔体滤波器

借助 Keysight PNA-X N5247A 矢量网络分析仪、中国电科 41 所的毫米波扩频机控制模块 AV3640A 及 AV3649 S 参数测试模块(170~220 GHz),搭建了 180 GHz 滤波器测试平台,测试环境如图 5 所示。在对仪器进行校准之后,对滤波器进行了 S 参数测试,测试结果如图 6 所示。可以看到,滤波器的中心频率位于 179.1 GHz,1 dB 相对带宽为 8.7%。滤波器中心频率处的插入损耗仅为 0.34 dB,通带内回波损耗优于 18.9 dB。

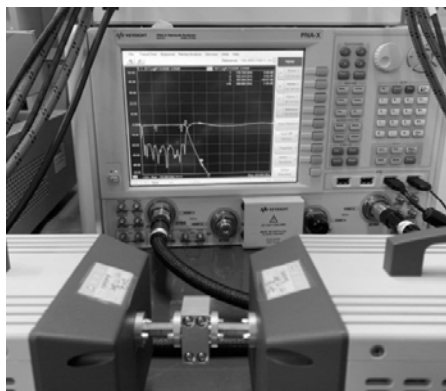


Fig.5 Test environment of cavity filter
图 5 腔体滤波器测试环境

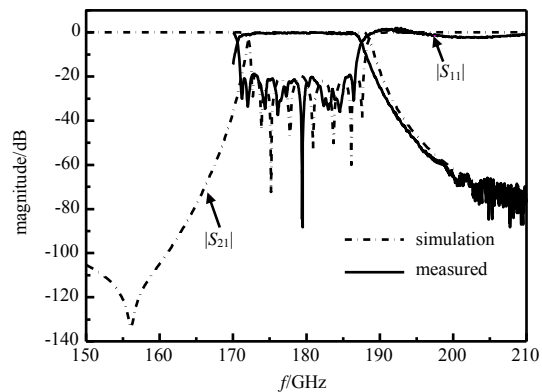


Fig 6 Measurement and simulation results
图 6 测试与仿真结果对比

3 结论

本文基于 H 形感性窗结构设计了一款高性能太赫兹带通滤波器。测试结果显示,该太赫兹滤波器的中心频率位于 179.1 GHz,1 dB 带宽为 15.55 GHz,插入损耗为 0.34 dB/@179.1 GHz。滤波器结构简单,易于加工,具有较好的容差性,以及较低的插入损耗和优良的通带选择性。

参考文献:

[1] 成彦. Ka 频段薄膜滤波器设计[J]. 电讯技术, 2012,52(7):1164-1168. (CHENG Yan. Design of Ka-band thin film filter[J]. Telecommunication Engineering, 2012,52(7):1164-1168.)

- [2] 王文才,陈昌明,杨刚. 一种毫米波微带带通滤波器设计[J]. 电子器件, 2014,37(5):855-858. (WANG Wencai, CHEN Changming, YANG Gang. Design of millimeter-wave microstrip bandpass filter[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2014,37(5):855-858.)
- [3] 庞豆豆,熊阳,何明,等. 多传输零点的新型五通带多模滤波器[J]. 电子元件与材料, 2017,36(10):67-72. (PANG Doudou, XIONG Yang, HE Ming, et al. New quint-band multimode filter with multiple transmission zeros[J]. Electronic Components & Materials, 2017,36(10):67-72.)
- [4] 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.)
- [5] WANG Cheng, LU Bin, LIN Changxing, et al. 0.34 THz wireless link based on high-order modulation for future wireless Local Area Network applications[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014,4(1):75-85.
- [6] WANG Cheng, LU Bin, LIN Changxing, et al. A 10 Gbit/s wireless communication link using 16 QAM modulation in 140 GHz band[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013,61(7):2737-2746.
- [7] HONG J S, LANCASTER M J. Microstrip filters for RF/microwave applications[M]. New York, NY, USA: Wiley, 2001.
- [8] 吴中川. 一种 220 GHz 滤波器的设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(3):37-40. (WU Zhongchuan. A novel design for 220 GHz filter[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(3):37-40.)

第八届国际新型光电探测技术及其应用研讨会

2021年11月 昆明

会议官网: <https://b2b.csoe.org.cn/meeting/NDTA2021.html>

组委会将于2021年11月在昆明市举办“第八届国际新型光电探测技术及其应用研讨会”, 深入研讨近年来涌现出的各种新型探测技术, 包括微光探测、偏振探测、量子探测、单光子探测技术等, 以促进国际和国内新型光电探测技术及相关产业的可持续、健康发展。大会征文已开通, 诚挚欢迎国内外相关领域的科研人员、教师、研究生等踊跃投稿。

主办单位、承办单位、联办单位:

见网站: <https://b2b.csoe.org.cn/submission/NDTA2021.html>; <http://www.iaeej.com>

征文方向:

见网站: <https://b2b.csoe.org.cn/submission/NDTA2021.html>; <http://www.iaeej.com>

论文发表:

中英文稿件兼收, 请作者登录网站提交论文全文, 组委会请专家进行审稿。通过审查的稿件被大会录用, 择优推荐到正式出版物发表。英文稿件推荐至SPIE会议论文集(EI检索)收录。中文稿件推荐至支持期刊发表。

投稿网址: <https://b2b.csoe.org.cn/submission/NDTA2021.html>

截稿时间: 2021年5月20日(第一轮)

组委会: 刘 艳 022-58168510 email:liuyan@csoe.org.cn