

## 基于 MEMS 工艺的太赫兹波导窄带带通滤波器\*

张勇、谢善谊、胡江

电子科技大学极高频复杂系统国防重点学科实验室, 四川成都 611731

**摘要:** 太赫兹滤波器在太赫兹通信和雷达系统中起着举足轻重的作用。本文采用附加传输零点的二阶波导滤波器形式, 设计了一种中心频率为390GHz, 相对带宽仅为2.5%的太赫兹波导滤波器, 并基于MEMS体硅工艺技术加工了太赫兹滤波器样品。对该滤波器利用矢量网络分析仪进行测试, 结果表明, 带内最小插损为4.5 dB, 回波损耗优于17.7 dB。

**关键词:** 太赫兹 滤波器 波导 MEMS工艺

## Waveguide Bandpass Filter based on MEMS Technology for Terahertz Applications

Yong Zhang, Shanyi Xie, Jiang Hu

Fundamental Science on EHF Laboratory, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sicuan 611731

**Abstract:** Terahertz filters play a key role in Terahertz communication and radar systems. A 390GHz Terahertz filter of second-order type with additional transmission zeros is presented in this paper. The fractional bandwidth is only 2.5%. The filter is fabricated using MEMS bulk silicon technology. The measurement is carried out with vector network analyzer. The measured minimum insertion loss is 4.5 dB and the return loss is better than 17.7 dB.

**Keywords:** Terahertz, Filter, Waveguide, MEMS technology

### 1 引言

随着近年来太赫兹频段不断地被研究、开发与利用[1], 对太赫兹频段器件的研究探索亟需开展。其中, 太赫兹滤波器就是一种极为重要的无源器件, 对太赫兹通信和雷达系统性能起着举足轻重的作用。在这一频段, 平面滤波器的发展面临着损耗大、功率容量低、结构较为复杂等诸多困境, 而以矩形波导滤波器为代表的腔体滤波器很好地克服了这些缺点, 成为太赫兹滤波器实现方案的首选。

### 2 滤波器的设计

图1是滤波器的等效电路模型。低通梯形网络通过频率变换和元件变换并加入阻抗变换器, 变形为由阻抗变换器和LC串联段组成的带通网络。就波导滤波器而言, 在物理结构上, LC串联段由波导段实现, 阻抗变化器由感性窗实现。设计工作采用参考文献[2-4]中所述方式完成。

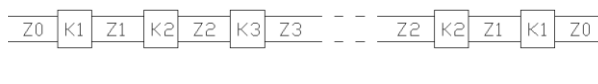


图1 滤波器网络结构模型

在前期工作中采用了经典的直通耦合形式实现滤波器设计[5]。该结构由5个直通排列的谐振腔构成, 并经由六对感性膜片实现谐振腔之间以及谐振腔与输入输出波导段之间的耦合。其滤波

\*基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)和中央高校基本科研业务费 (ZYGX2011X002, ZYGX2011J018)

器的仿真性能较好,然而,考虑到加工过程中误差的影响可能随着结构复杂度的提升而放大,本文设计了更为简单的二阶滤波结构;同时,为了适当提升其性能,添加第三个谐振腔实现阻带内的传输零点,增强边带陡峭特性,其结构图如图2所示。

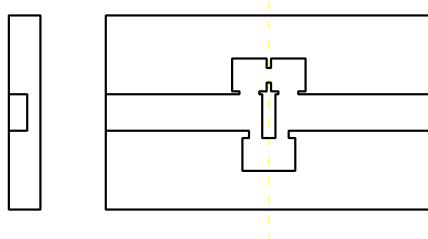


图2 附加传输零点的二阶波导滤波器结构图

滤波器的输入输出端口均采用Virginia Diodes Inc.的WR-2.2标准波导尺寸,以便与外部电路相连接。

### 3 仿真与优化

使用Ansoft HFSS软件对该滤波器的初值进行仿真,并随后优化其性能,结果见图3,仿真与优化均设定滤波器内部为光洁度为0.5 $\mu\text{m}$ 的金质表面(电导率为 $4.1 \times 10^7 \text{S/m}$ )。仿真结果表明,附加传输零点的二阶波导滤波器的通带范围是384.3GHz~395.3GHz,中心频率为389.8GHz,3dB带宽为11GHz,最小带内插入损耗为1.28dB,带内回波损耗优于18.4dB,在距离中心频点20GHz处,带外抑制分别为31 dB (365GHz)与29 dB (415 GHz)。

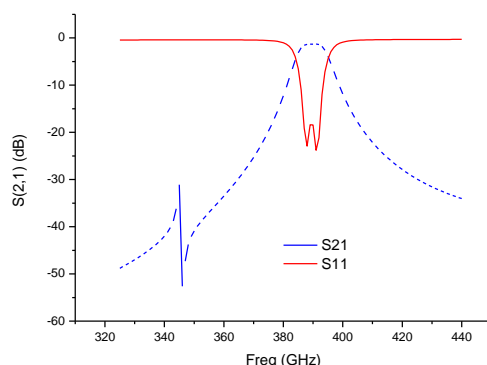


图3 附加传输零点的二阶波导滤波器仿真特性

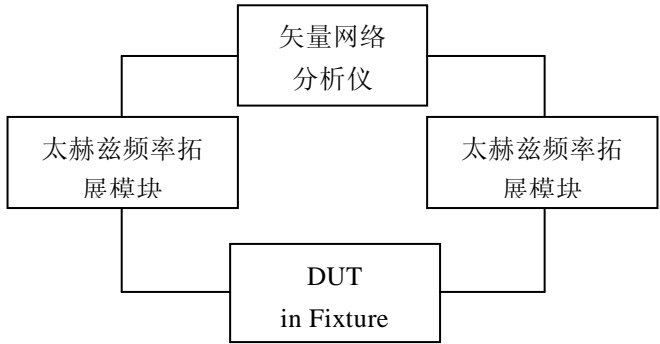
### 4 测试及结果分析

上述滤波器的设计采用MEMS体硅工艺实现,相关的工艺流程已见报导[6]。加工完成滤波器(键合前)俯视图如下所示

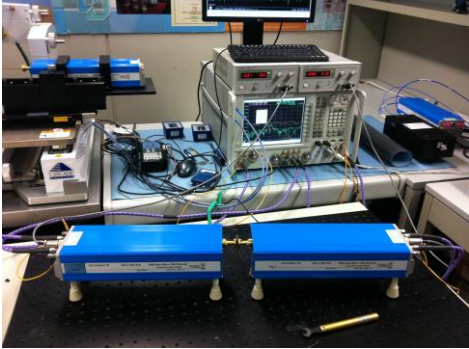


图4 滤波器俯视图照片（镀金工序完成后）

采用矢量网络分析仪系统（Agilent N5245A）结合OML-V022VNA2系列频率拓展模块对滤波器进行测试，可以将测试频率拓展到500GHz，系统端口为WR-2.2标准矩形波导，整个矢量网络分析仪测试系统框图以及照片如下图所示。



(a) 系统框图



(b) 测试系统照片

图5 矢量网络分析仪测试系统框图和照片

为了便于测试，定制了相应夹具（如图6所示），使滤波器能够以标准法兰盘的形式与矢量网络分析仪连接，连接端口采用UG-387标准法兰，波导端口为WR-2.2标准矩形波导。

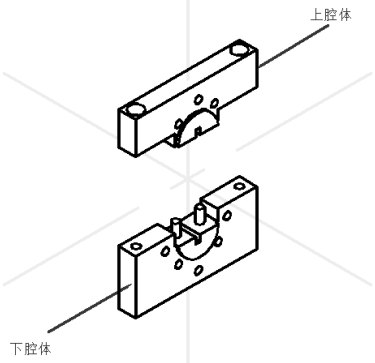
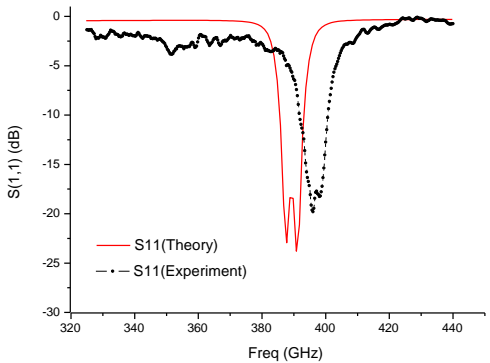
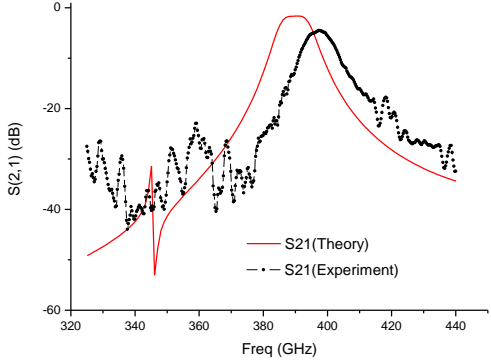


图6 夹具结构示意图

测试结果与上述仿真特性的对比如下图所示：



(a) S11参数特性的对比



(b) S21参数特性的对比

图7 波导滤波器仿真与测试特性的对比

测试结果表明, 获得了较好的太赫兹滤波曲线, 带内最小插损为4.5 dB, 回波损耗优于17.7 dB。从仿真与测试结果的对比可以看出, 测试中心频率相对于仿真产生了+6.6GHz的频率偏移, 插入损耗恶化了3.2dB。这些现象是多方面的因素造成的, 其中主要包括以下几个因素: 第一, 在刻蚀过程中产生的额外横向腐蚀; 第二, 直角结构腐蚀的不完全; 第三, 镀金层的表面粗糙程度。从图4可以看出, 滤波器边壁的直角构造处在底部没有完全腐蚀成型, 将导致滤波器中心频率升高, 带宽减小。插入损耗的显著升高则主要是镀金层的表面粗糙程度导致的。

## 5 结论

本文设计、加工并测试了一例390GHz的基于MEMS工艺的太赫兹波导窄带带通滤波器, 该频段采用MEMS工艺设计的太赫兹波导带通滤波器鲜有报道[7-8]。本文的工作为太赫兹频段滤波器的设计制造提供了重要的借鉴。从本文的工作可以看出, 加工误差对滤波器性能仍然具有相当的影响, 插入损耗的增大以及中心频率的偏移是今后的工作将要集中解决的问题。有鉴于此, 我们需要对加工误差进行定量建模及影响预估以加以规避, 同时寻求容差性更强的设计方案。

## 致 谢

作者感谢中国电子科技集团公司第五十五研究所在滤波器加工方面提供的帮助, 同时感谢香港城市大学毫米波国家重点实验室在测试方面提供的协助。

## 参 考 文 献

1. Iwao Hosako, et al., "At the Dawn of a New Era in Terahertz Technology", Proceedings of the IEEE, Aug. 2007, Vol 95, Issue: 8.
2. J. Hong and M.J. Lancaster, Microstrip filters for RF/microwave applications, John Wiley & Sons, Inc, 2001.
3. G. Matthaei, L. Yound and E.M.T. Jones, Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structure, MA, Artech House, 1980.
4. R. Levy, "Theory of Direct Coupled Cavity Filters", IEEE Transaction on Microwave Theory & Tech, MTT-15, No. 6, pp. 340-348, June 1967.
5. Shanyi Xie, Jiang Hu, Yong Zhang, Yonglun Wu, "Design of a Micromachined Waveguide Band-pass Filter for Terahertz Application," International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, Shenzhen, May 2012, Vol.4, pps 1-3,.
6. Hong Jun Tang, Wei Hong, Guang Qi Yang, Ji Xin Chen, "Silicon based THz antenna and filter with MEMS process", 2011 International Workshop on Antenna Technology (iWAT 2011). Small Antennas, Novel Structures and Innovative Metamaterials. IEEE. 2011, 148-51. Piscataway, NJ, USA.
7. P.L. Kirby, D. Pukala, H. Manohara, I. Mehdi, J. Papapolymerou, "A Micromachined 400 GHz Rectangular Waveguide and 3-Pole Bandpass Filter on A Silicon Substrate", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2004. v2, pp.1185-1188.
8. X. Shang, M.L. Ke, Y. Wang and M.J. Lancaster, "Micromachined WR-3 Waveguide Filter with Embedded Bends", Electronics Letters, April 2011, Vol. 47, No. 9., pp.545-547.

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题, 有资深工程师领衔主讲, 课程既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 设计原理和设计仿真实践相结合, 向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



### 微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频, 专家授课, 中文讲解, 直观易学; 既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

### 更多专业培训课程:

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>