文章编号: 2095-4980(2013)02-0319-04

太赫兹 MEMS 滤波器性能影响因素

崔博华,王 成,郑英彬

(中国工程物理研究院 电子工程研究所,四川 绵阳 621999)

摘 要:在太赫兹微电子机械系统(MEMS)滤波器的制作中,每一步工艺造成的误差都会对滤 波器的性能造成影响,使滤波器达不到设计要求。为能够制作出满足指标的滤波器,对影响滤波 器性能的尺寸、参数进行分析,且对这些参数进行仿真找到影响的规律;结合参数仿真与滤波器 的测量进行整体分析,提出有效的解决方案,提高了太赫兹 MEMS 滤波器的成品率和性能参数。 关键词:滤波器;太赫兹;微电子机械系统;共晶键合

中图分类号: TN713⁺.2

文献标识码:A

Influencing factors on performance of terahertz MEMS filter

CUI Bo-hua, WANG Cheng, ZHENG Ying-bin

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: In the production of terahertz Micro-Electro-Mechanical Systems(MEMS) filter, every error caused by the process could affect the performance of the filter, and its index will not meet the design requirements. In order to make the qualified filter, this paper analyzes the size and parameters which could affect the performance of the filter, seeks the relation between parameters and performance, finally contrasts and analyzes the simulation and measurement aiming to propose the solutions. The yield and performance parameters of terahertz MEMS filter have been improved.

Key words: filter; terahertz; Micro Electro Mechanical Systems; eutectic bonding

太赫兹(THz)通信具有传输容量大^[1-2]、波束窄、保密性好^[3-5] 等独特优势,而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微波无源器件,其性能的优劣直接影响到整个 通信系统的质量。在太赫兹频段,波长为 mm 量级甚至到 μm 量级, 太赫兹滤波器谐振腔和膜片的尺寸都精确到 μm 量级,用传统的机 械加工工艺难以满足要求,因此在 MEMS 工艺的基础上设计制作 了太赫兹滤波器。太赫兹波段电磁波的趋肤深度很小(亚 μm 及 nm 量级),器件表面的粗糙度以及镀膜的厚度和质量都会对滤波器性 能产生影响。

1 滤波器的仿真及其工艺流程

本文滤波器的制作工艺流程为:首先在硅片上通过等离 子体深槽刻蚀将滤波器的图形蚀通,在硅片的阳极键合上一 片玻璃盖板,再对硅片进行溅射、电镀金层,使其金属化, 最后采用金硅共晶键合,使金属化的硅片与镀有金层的玻璃 盖板进行键合,形成内部完全金属化的波导结构^[6]。图 1 为 在高频结构仿真软件 HFSS 上的结构设计,滤波器 *S* 参数的 仿真如图 2 所示。

Fig.1 Structure of the filter 图 1 滤波器结构示意图 (S_{11} Sa -20 -40 ransmission/dB -60 -80 -100 -120 135 155 130 140 145 150 125 f/GHz Fig.2 Simulation results of the filter 图 2 滤波器 S 参数仿真结果

收稿日期: 2012-11-12; 修回日期: 2012-12-10

2 工艺分析

由于耦合膜片厚度、侧壁陡直度以及镀金的厚度都会直接影响滤波器谐振腔的体积、形状,从而影响谐振频率,导致频率选择特性受到影响。谐振腔内部镀金后表面的光滑度和清洁度,加工带来的尺寸变化以及表面不均匀性等都将引起损耗的增加^[7]。

2.1 耦合膜片的影响

刻蚀工艺造成的工差会导致耦合段的膜片尺寸变化,对滤波器的性能将会产生影响,若膜片厚度减小,谐振 腔长度将增大,谐振波长也会增大,即谐振频率减小,因此滤波器中心频率会有所减小。如图 3 所示,膜片厚度 由 0.35 mm 减小到 0.34 mm,工差为 10 µm 时,滤波器的中心频率将减小 1 GHz~2 GHz,带宽也略微增加。



2.2 刻蚀陡直度的影响

由于刻蚀要直接把硅片蚀穿,刻蚀的深度达到了 356 μm,刻蚀的难度很高,难以保持绝对的垂直刻蚀,会导致刻蚀的角度低于 90°。当侧壁的陡直度减小时,谐振腔将减小,从而谐振频率增大,中心频率会增大。仿真 图形如图 4 所示。

实线是垂直刻蚀的仿真结果,虚线是刻蚀角度为 89°时滤波器 S 参数仿真结果。由图可知,当滤波器腔体侧 壁陡直度降低的时候,滤波器中心频率增大 1 GHz~2 GHz。

2.3 金层的影响

电磁波在波导中传输时会集中在导体表面一定的厚度内进行传输,而且频率越高,厚度会越小,由式 $\delta_s = \sqrt{2/\omega\mu\delta}$,可计算出在 140 GHz 时,金层的趋肤深度为 218 nm,信号能量的透过率为 86.5%。要达到 98%以上的透过率,则金层的厚度至少为 600 nm。同时金层的粗糙度可能会导致金属表面电阻率提高,使得能量传输的损耗增大,因此金层的厚度、粗糙度都会影响电磁波的传输特性。

图 5 为 HFSS 仿真金层的厚度和粗糙度对滤波器性能的影响, 仿真条件为非理想化条件, 腔体周围镀膜的材料是金, 厚度为 1 μm~8 μm, 表面粗糙度为 0 nm~600 nm。其中横坐标表示镀金的厚度, 纵坐标表示插入损耗, 每一条曲线表示的是不同的表面粗糙度。

当金层表面粗糙度一定时,随着金层厚度的增加,滤波器插入损耗变小,当厚度增加到一定程度时,插入损 耗不再减小;当镀金的厚度相同时,粗糙度越小,插入损耗则越小。从图 5 还可以看出,当粗糙度小于趋肤深度 时,插入损耗明显较低;粗糙度越大,插入损耗饱和值越低,且饱和时需要的金层厚度也越大。

本文对一些性能不太好的滤波器进行了切割并对其进行了显微镜的拍摄以及电镜扫描。图 6 为耦合段膜片的 电镜扫描,设计要求是 350 µm,而刻蚀的宽度是 336 µm,会造成中心频率降低。造成这种工差的原因可能是因 为工艺线机械精确度的问题,要解决这个问题一是调整工艺线,二是设计时直接把膜片的宽度增大,来弥补工艺 线的工差。





Fig.6 Scanning electron microscopy of the diaphragm 图 6 膜片电镜扫描

图 7 为腔体侧面的扫描,为了观察刻蚀陡直度,经过计算陡直度为 86°,与 90°差距很大,会导致中心频率 增加很多。解决这个问题同样一是改进工艺,二是改变设计模型,反补工艺。图 8 为镀金情况下显微镜拍的照片, 图中可以看到,图的右方金层较厚,满足了金层要求,但图的左方金层很薄,甚至没有金层。这是由于滤波器的 端口非常小,尺寸只有 1.651 mm×0.356 mm,在电镀的时候镀液很难从滤波器内部匀速通过,所以形成了在端口 处电镀很好,而在滤波器内部则几乎没有电镀上。可以采用先进行电镀加厚金层,然后再进行金硅共晶键合的方 法解决这个问题,但实际效果不甚理想,这是由于金硅共晶键合的温度过高,金层会遭到破坏。最后采用在键合 面间加入共晶合金作为中间层的方法,这样可以将键合的温度从 400°降低到 190°,而且键合的强度高,无缝隙, 无气泡,具有较好的气密性,也不需要助焊剂,避免对器件的污染^[8]。



Fig.7 Scanning electron microscopy of the incline 图 7 陡直度电镜扫描



Fig.8 Microscope photographs of the gold layer 图 8 金层显微镜照片

3 结论

MEMS 矩形波导腔体滤波器的主要性能与膜片的厚度、刻蚀的陡直度以及金层的厚度、粗糙度都有关系。 膜片变薄,中心频率减小;陡直度减小,中心频率增大;金层厚度越大,插损越小,增加到一定厚度,插损不变; 金层粗糙度越大,插损越大,粗糙度小于趋肤深度时,插损显著减小。

参考文献:

- Nagatsuma T,Hirata A. 10 Gbit/s wireless link technology using the 120 GHz band[J]. NTT Technical Review, 20042(11): 58-62.
- Yamaguchi R,Hirata A,Kosugi T,et al. 10 Gbit/s MMIC wireless link exceeding 800 meters[C]// IEEE Radio and Wireless Symposium,2008. Florida,Jap.:[s.n.], 2008:695-698.

- [3] Miles R E,Zhang X C,Eisele H,et al. Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects[M]. Spiez, Switzerland:Springer, 2007.
- [4] Crowe T W. Multiplier technology for terahertz applications[C]// IEEE sixth International Conference on Terahertz Electronics Proceedings, 1998. Leeds: [s.n.], 1998:58-61.
- [5] Fitch M J,Osiander R. Terahertz waves communications and sensing[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2004,24(4): 348-355.
- [6] 郑英彬,施志贵,席仕伟,等. MEMS THz 滤波器的制作工艺[J]. 微纳电子技术, 2011,48(6):399-402.
- [7] 郭开周. 行波管物理及理论问题[M]. 北京:电子工业出版社, 2011.
- [8] 张东梅,丁桂甫,汪红,等. MEMS 器件气密性封装的低温共晶键合工艺研究[J]. 传感器与微系统, 2006,25(1):82-84.

作者简介:



崔博华(1986-),男,四川省乐山市人,硕 士,实习研究员,从事微波毫米波器件以及太 赫兹无源器件的研究.email:cuibohua@163.com. **王**成(1987-),男,四川省射洪市人,实习研究员,主要研究方向为太赫兹通信技术、太赫兹关键组件和毫米波组件与电路.

郑英彬(1974-),男,河南省南阳市人,助理 研究员,主要从事 MEMS 工艺研究.

(上接第 318 页)

作者简介:



白 阳(1986-),男,北京市人,在读硕士 研究生,已在《中国物理 B》、《红外与激光工程》 等杂志和相关会议上发表文章,主要研究领域为 太 赫 兹 技 术 与 耿 氏 器 件 源 关 键 技 术 研 究.email:baiyang@ime.ac.cn.

金 智(1970-),男,河北省迁西县人,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为太赫兹固态电子器件与电路、InP 基毫米波器件与电路及石墨烯器件与电路的研究.

贾 锐(1967-),男,新疆维吾尔自治区人, 博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为太 赫兹技术与耿氏器件源关键技术研究和高效太 阳能电池技术研究.email:jiarui@ime.ac.cn.

刘新宇(1973-),男,安徽省泗县人,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为 III-V 族 化合物(GaAs,InP,GaN)半导体器件和电路工艺, 微波 MMIC 设计和研制以及微波功率模块研究.

武德起(1969-),男,山东省沧州市人,博 士,助理研究员,主要研究领域为太赫兹技术与 耿氏器件源关键技术研究和高效太阳能电池技 术研究.