

毫米波腔体滤波器谐振腔平整度误差研究

南雪莉,张斌珍,赵 龙,徐苏坪

(中北大学 电子测试技术重点实验室,山西 太原 030051)

摘 要:平整度误差引起的寄生量变化对毫米波滤波器的自谐振频率及品质因数有重大影响,为获得低插损、高品质因数的滤波器结构,针对滤波器制作中存在的平整度误差,该文开展了一系列的研究。通过对基于 SU-8 胶的毫米波腔体滤波器电铸工艺实验的反复探索,制定出一套能减小毫米波滤波器谐振腔平整度误差的最优电铸方案,即利用脉冲小电流进行电铸。实验结果表明,利用 50 mA 小电流密度电铸能快速获得平整致密高质量的滤波器谐振腔,其铸层表面平整度误差小于 $2\ \mu\text{m}$;制作精度高,且能实现快速制作。可见,小电流脉冲电铸得到的铸层平整、致密,可有效减小毫米波滤波器的寄生效应,提高系统的精度及灵敏度。

关键词:毫米波腔体滤波器;谐振腔平整度;电铸铜;脉冲电铸;小电流

中图分类号: TN385;TQ153

文献标识码: A

The Research on the Resonant Cavity Flatness Error of Millimeter Wave Cavity Filter

NAN Xueli, ZHANG Binzhen, ZHAO Long, XU Suping

(National Key Lab. for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The parasitic volume change caused by the flatness error has a significant influence on the self-resonant frequency and quality factor of millimeter wave filter. In order to obtain filter structure with low insertion loss and high quality factor, the article has carried out a series of studies on the copper electroforming technology of millimeter wave cavity filter based on SU-8 in terms of flatness error occurred in the manufacture process of the filter. A set of optimized electroforming solutions were put forward through using a small current pulse electroforming able to decrease unflatness of resonant cavity of millimeter wave cavity filter; The experiment results showed that the use of 50 mA low current density electroforming can achieve rapid production of filter resonant cavity with high-quality and smooth dense, the surface flatness error of electroformed cast layer is less than $2\ \mu\text{m}$; The low current pulse electroforming can be used to produce the cast layer with smooth dense, thus can reduce the parasitic effect effectively and improve the accuracy and sensitivity of millimeter filters.

Key words: millimeter wave cavity filter; resonant cavity flatness; electroforming copper; pulse electroforming; low current

0 引言

基于微机电系统(MEMS)工艺的毫米波腔体滤波器具有损耗小,品质因数(Q)高,加工成本低,工艺精度高等优点,广泛应用于高频段军用无线通信系统的信号处理端^[1]。因其具有高Q值及易于实现等优点,特别适合于插损小,通带窄及带外抑制高的无线电路^[2]。由于毫米波滤波器频率高故其尺寸更小^[3],加工精度要求很高(微米级)。因加工微小结构的工艺具有一定的局限性,加工出的滤波器

结构存在一定的误差,影响到系统的精度及灵敏度^[4]。尤其对于腔体滤波器,谐振腔平整度的微小误差对滤波器的插损及Q影响较大^[5]。故滤波器加工过程中所引起的平整度不均及如何解决成为了科学研究的重点。

毫米波射频腔体滤波器是用来分离不同频率射频信号的滤波器,其中带通滤波器应用最广^[6]。谐振腔的制备精度直接决定滤波性能。谐振腔最主要指标有谐振频率 f_r 和Q。 f_r 是谐振回路中电磁能

收稿日期:2015-07-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475438);国家自然科学基金资助项目(61401405)

作者简介:南雪莉(1987-),女,甘肃定西人,硕士生,主要从事微纳技术及仪器等的研究。Email: nanxueli@yeah.net。张斌珍(1974-),男,山西岚县人,教授,博士生导师,主要从事微纳机电系统(MEMS/NEMS)和武器系统恶劣环境下的动态测试技术的研究,在此领域内先后开展了微纳器件和系统的设计制造、微弱信号检测与处理以及恶劣环境下存储测试理论与技术的研究。E-mail: zhangbinzhen@nuc.edu.cn。

量的转换频率,其大小与回路的形状和电磁场的模式有关; Q 值与谐振回路的损耗有关^[7]。谐振腔的 Q 值与谐振腔的体积、电磁场的模式、谐振腔所用材料及其光洁度有关^[8]。在实际加工和工作中,腔体滤波器的插入损耗也须调整,以确保良好的滤波特性。

本文主要针对毫米波腔体滤波器制作中出现的谐振腔误差进行实验研究,提出一套常温环境下加工高精度毫米波滤波器的有效方法,即采用脉冲小电流进行电铸,可有效提高毫米波腔体滤波器谐振腔的平整度、系统的灵敏度及精度。该方法还适用于制作功分器、耦合器、移相器、电容、电感等高频器件,在航空航天、导弹卫星、便携雷达等领域具有广阔的应用前景^[9]。

1 平整度误差对滤波器性能的影响

在影响射频电子设备性能指标的诸多结构因素中,表面平整度误差因其存在的普遍性、分布的随机性及对设备性能影响机理的复杂性而备受瞩目^[10-12]。射频滤波器类的高频部件要求加工精度高,对结构表面的平整度要求更高。平整度误差会对器件性能产生重大影响,主要是平整度对高频滤波器寄生参数的影响。由于平整度误差的客观存在导致谐振峰出现,从而引起滤波器寄生量的变化^[13-14]。寄生量的变化会导致设备噪声的大量存在,使滤波器性能下降,从而不能起到很好的滤波作用。寄生量变化示意图(只画了1个)如图1所示。

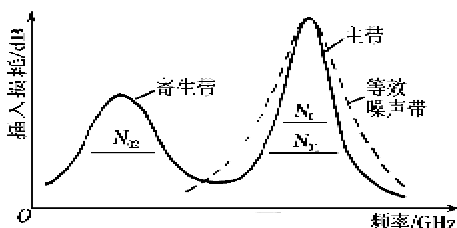


图1 滤波器存在寄生带时的通带特性

由图1可看出,系统内部输出的噪声功率为 N_0 ,主频带功率为 N_{01} ,寄生带功率为 N_{02} , $N_0 = N_{01} + N_{02}$,寄生带 N_{01} 的变化量增大使 N_0 增大,噪声是影响高频射频器件 Q 的最重要因素,噪声增大降低系统的灵敏度及精度。

腔体滤波器是一种纯结构性的器件,其性能指标及可靠性都取决于自身的结构特征。本文从结构出发,对腔体滤波器进行了仿真分析,提出了一些有利于提高腔体滤波器性能和可靠性的加工方案,还

提出了加工制作过程中的一些关键技术指标,进一步减小不平整度造成的损耗。

本文以毫米波腔体滤波器的单个腔体为例进行说明,毫米波腔体滤波器中心频率为37.5 GHz。在HFSS软件中建立单腔体模型(模型材质为铜),如图2所示。使用参数优化功能,计算谐振柱高度 h_r 在0.85~1.05 mm范围内变化时,单腔体结构的自谐振频率,仿真计算结果如图3所示。由图可看出,随着 h_r 的微小变化,自谐振频率时刻在发生变化。只有当 $h_r \approx 1.03$ mm时,该腔体的自谐振频率为37.5 GHz,可见, h_r 的微小(微米级)变化会引起滤波器自谐振频率的急速变化。

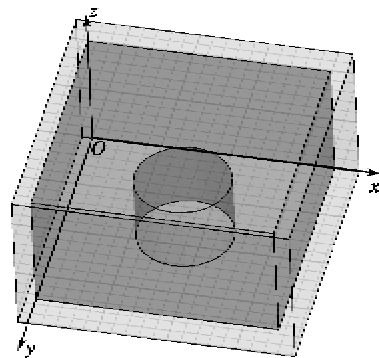


图2 单腔体谐振腔仿真

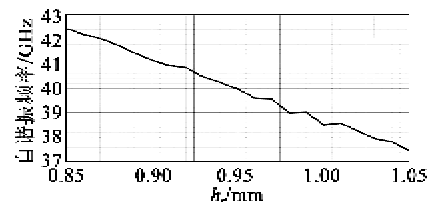


图3 自谐振频率随 h_r 变化曲线

图4为仿真计算出单腔体的 Q 。 $h_r = 1.03$ mm时,其 $Q \approx 2033$,大于我们滤波器设计时所设定的2000,因此,该仿真结果可满足要求。由图3、4可知, h_r 变化0.01 mm都会引起 f_r 及 Q 的变化。任何一个微小(毫米级甚至微米级)的凹坑或突起都会引起滤波器关键参数的变化。腔体滤波器谐振柱平整度对滤波器的 f_r 及 Q 影响较大。

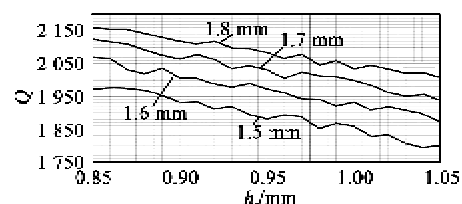


图4 Q 随 h_r 变化曲线

2 实验与测试

滤波器的制作步骤主要有:

- 1) 用 SU-8 胶制作谐振腔负模。
- 2) 在第 1) 步的基础上进行电铸, 获得纯金属结构。
- 3) 去胶。

本文仅就电铸部分进行实验研究。铸层表面粗糙度是衡量铸层宏观质量的重要指标。

2.1 脉冲小电流电铸研究

经过分析探究及多次实践得出有效的解决方法是使用脉冲小电流进行电铸实验。电流对于大面积部件的电铸效果的影响不大; 但对于高频的射频微小器件, 要进行深孔电铸。经过反复实验研究得出, 电流对深孔等微小结构的电铸效果影响较大。

电铸时, 电流密度应得到适当控制。电流密度太小会导致镀层生长过慢, 电铸过程太长影响加工效率; 但电流密度过大会导致电极附近因缺少金属离子而形成较疏松的镀层, 导致镀层的内应力增大, 镀层晶粒粗糙, 对于高深宽比的孔缝结构, 大的电流由于电铸溶液流速太快, 令其内部电铸溶液与外部无法很好地进行交换, 造成电铸层不均匀, 表面平整度不够, 从而影响整个器件的性能。

为得到更好的微结构电铸效果, 实验中, 我们使用脉冲小电流电铸, 配备正负脉冲电源, 如图 5 所示。以镀铜为例, 配制硫酸铜溶液, 引入硫酸调节电铸溶液 pH 值约为 2, 用此电铸溶液对制作获得的 SU-8 谐振腔负模进行电铸, 使用脉冲电流进行电铸测试。固定其他参量不变, 验证电流密度的变化对镀层宏观表面质量的影响。



图 5 正负脉冲电源

2.2 电铸层表面平整度误差测试

毫米波滤波器作为各类射频收发组件的重要部件, 其主要制作工艺为电铸工艺, 所以, 电铸结构表面的平整度直接影响滤波器的性能。对完全相同的

两组谐振腔负模用不同脉冲电流进行电铸, 其余参数都保持一致。

电铸实验完成后, 用共聚焦显微镜对电铸结果进行表面平整度误差测试, 测试图如图 6 所示。由图 6(a) 可见, 其铸层表面平整度误差大于 $5\ \mu\text{m}$, 电铸结构结晶晶粒粗大, 平整度不够。采用完全相同的样片, 同时保持其他参量不变, 仅将电流峰值降低至 $50\ \text{mA}$, 得到如图 6(b) 所示的形貌结果。由图 6(b) 可见, 其铸层表面平整度误差小于 $2\ \mu\text{m}$, 其电铸层晶粒减小, 平整度误差小, 铸层均匀。对比图 6(a)、(b) 可得, 用小电流进行电铸, 可得表面平整度误差较小结构紧密的铸层。

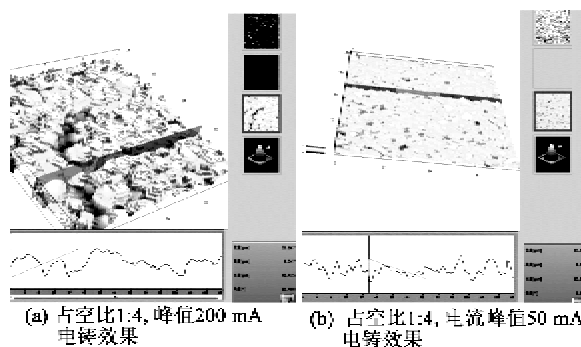


图 6 不同峰值电铸电流下铸层表面平整度对比图

为使毫米波腔体滤波器有较低的插入损耗和较高的 Q , 必须降低腔体内壁和谐振柱表面及四周壁的平整度误差, 电铸完成后对表面进行适量抛光, 效果更好。

3 结果与讨论

通过 $50\ \text{mA}$ 脉冲小电流电铸获得的腔体滤波器谐振柱的镀层表面平整度误差小于 $2\ \mu\text{m}$, 且电铸速度快, 可快速完成高精度毫米波腔体滤波器的制作; 电铸电流小于 $50\ \text{mA}$ 时, 平整度误差变化小, 但电铸速度降低, 影响滤波器的制作速度。故在电铸效果相近的情况下选择速度最快的电铸方案, 即在 $50\ \text{mA}$ 时的电铸效果较理想。

实验中使用脉冲电源, 因为通过脉冲电流对亥姆霍兹层和扩散层的影响, 脉冲电铸可改善电铸效果^[3-4]。由于电流导通时间 T_{on} (即脉冲宽度) 很短, 峰值电流密度很大, 因此, 在 T_{on} 期间, 靠近阴极电极反应处的金属离子会急剧减少, 但电源随之瞬间被切断, 使扩散层来不及长厚。在电源断开时间 T_{off} (即脉冲间歇时间) 里, 主体溶液及时向阴极电极反应处表面补充所缺少的金属离子, 这可减小扩散

层厚度,使电解液中金属离子浓度趋于一致。由此可知,采用脉冲电铸主要作用有:

1) 使扩散层内金属离子的浓度得到及时补充。

2) 通过迫使扩散层周期间歇式的形成,减薄了扩散层的厚度。

3) 降低了浓度过电位,从而提高了阴极的极限电流密度。

同时,电流密度分布和电解液成分传输直接影响着镀层的均匀性,在脉冲电铸的过程中,间歇性通电可使阴极发生反应部分的表面离子浓度得到缓冲,很大程度上减小了镀层厚度因电镀液成分传输不均匀而造成的差异,从而提高了镀层的均匀性。在电铸深槽结构时,同样因为扩散时间增大,脉冲电铸的深层镀附能力显著优于直流电铸,且脉冲电铸的镀层晶体比直流电铸精细。这一方面是因为脉冲电铸中可应用较高的峰值电流,加速新晶核的生长,另一方面, T_{off} 的存在阻碍了晶核的进一步生长,即延缓了其外延生长的趋势。综上所述,在进行微结构电铸时首选脉冲电源。

4 结束语

本文就毫米波腔体滤波器制作过程中出现的平整度误差提出了一种有效的解决方案,即在加工滤波器的电铸环节采用脉冲小电流进行电铸,对实验结果进行了表面不平整度测试。测试结果表明,小电流脉冲电铸制得的谐振腔表面晶粒细化,改善铸层质量,减小平整度误差,提升了微滤波器的制作精度及灵敏度。利用该工艺加工出来的毫米波腔体滤波器,可与三维同轴连接线互联,应用于三维微波/射频PCB平台,可有效减小系统体积,提升系统性能。该工艺也适合于制作其他微金属器件,如微滤波器、功分器等高频器件,具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 汤红军,洪伟.一种紧缩结构的新型毫米波基片集成波导滤波器[J].红外与毫米波学报,2006(2):139-143.
TANG Hongjun, HONG Wei. Novel millimeter waves substrate integrated waveguide filter with compact configuration[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006(2):139-143.
- [2] 李倩,杨志,胡小东. MEMS毫米波滤波器的设计与制作[J].微纳电子技术,2010,47(3):170-174.
LI Qian, YANG Zhi, HU Xiaodong. Design and fabrication of MEMS millimeter-wave filters[J]. Micro-nanoelectronic Technology, 2010, 47(3):170-174.
- [3] 瓦达,文尼,乔斯,著. RF MEMS应用指南[M]. 1版. 赵海松,邹江波,译. 北京:电子工业出版社,2005.
- [4] 王成,周焕福,方亮,等.低固有烧结温度LTCC微波介质陶瓷研究进展[J].电子元件与材料,2012,31(7):76-79.
WANG Cheng, ZHOU Huanfu, FANG Liang, et al. Research progress of LTCC microwave dielectric ceramic with low intrinsic sintering temperature[J]. Electronic Components and Materials, 2012, 31(7):76-79.
- [5] 聂时振.微电铸的工艺技术研究[D].长沙:中国科学技术大学,2009.
- [6] 谢睦宽.小型腔体滤波器设计技术研究[D].成都:电子科技大学,2011.
- [7] 南雪莉,张斌珍,张少华,等.基于UV-LIGA工艺的酸性电铸铜溶液最优化配比[J].科学技术与工程,2014,29:265-270.
NAN Xueli, ZHANG Binzhen, ZHANG Shaohua, et al. The optimal ratio of acid copper electroforming solution based on UV-LIGA process[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 29:265-270.
- [8] CONRADIE E H, MOORE D F. SU-8 thick photore-sist processing as a functional material for MEMS applications[J]. J Micromech Microeng, 2002, 12(368):74-77.
- [9] REID J R. Three dimensional metal micromachining: A disruptive technology for millimeter-wave filters[C]// Santa Clara, CA, United States: Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF), 2012 IEEE 12th Topical Meeting, 2012, 1:16-18.
- [10] MISU K, NAGATSUKA T, WADAKA S. Film bulk aeonstiv wave filters using lead titanate on silicon substrate[J]. IEEE, 1998(2):1091-1094.
- [11] LEE H, KATEHI P B L. A vertically integrated micromachined filter[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(9):2063-2068.
- [12] PAPAPOLYMEROU J, CHENG J C, EAST J, et al. A micromachined high-Q X-band resonator[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1997, 7(6):168-170.