Email:ycyk704@163.com　TEL:010-68382327　010-68382557

超宽带矩形微同轴滤波器制备及性能分析

汪郁东[1]，赵广宏[1]，陈春明[1]，陈青松[1]，谷胜明[1]，许　进[2]
（1 北京遥测技术研究所　北京 100094
2 西北工业大学电子信息学院　西安 710029）

摘要：在射频微系统对高性能超宽带滤波器的需求下，基于矩形微同轴制备技术研究了 10GHz~50GHz 的超宽带矩形微同轴滤波器的设计及制备。在矩形微同轴传输线的电路基础上进行电路实现，对超宽带矩形微同轴滤波器模型进行仿真试验，结果显示，在 10GHz~50GHz 工作带宽内插入损耗小于 0.8dB，回波损耗优于 17dB，带外抑制达到 45dB。基于矩形同轴结构的制备流程经过九次光刻-电铸-平坦化过程及一次介质支撑结构光刻后完成十层滤波器样件的制备，测得制备的滤波器样件性能与仿真曲线基本吻合，在 40GHz 时插入损耗为 0.6dB，回波损耗为 21.6dB，在 5GHz 和 55GHz 时带外抑制分别为 41.8dB 和 43.9dB。矩形同轴结构的低损耗、高频段等优点在该超宽带矩形微同轴滤波器中有良好的体现。

关键词：微电子机械系统；矩形微同轴；超宽带；滤波器
中图分类号：TH706　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**CN11-1780(2020)03-0065-06

Preparation and performance analysis of ultra-wideband rectangular micro-coaxial filter

WANG Yudong[1], ZHAO Guanghong[1], CHEN Chunming[1], CHEN Qingsong[1], GU Shengming[1], XU Jin[2]
（1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China;
2. School of Electronic and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710029, China）

Abstract: The design and preparation of 10GHz~50GHz ultra-wideband micro coaxial filter based on rectangular micro coaxial fabrication technology is studied under the requirement of RF microsystems for high-performance ultra-wideband filters. The model of micro coaxial filter is based on micro coaxial transmission line circuit, and its simulation results show that the insertion loss is less than 0.8dB, the return loss is superior to 17dB, and the out-of-band suppression is up to 45dB. This 10-layer-filter is completed through rectangular micro coaxial fabrication process after nine lithography-electroforming-flattening processes and a support structure lithography. The test results of the filter samples show that the insertion loss is 0.6dB and the return loss is 21.6dB at 40GHz, the restraint outside the band are 41.8dB and 48.9dB at 5GHz and 55GHz, the curve of which is consistent to the simulation curve. The ultra-wideband rectangular micro coaxial filter reflect the advantages of rectangular coaxial structure well，such as low less and high isolation.

Key words: Micro-electromechanical system (MEMS); Rectangular micro coaxial; Ultra-wideband; Filter

引　言

在信息化发展需求的推动下，现代雷达通信、高精度定位以及卫星导航通信系统等都对高性能射频微系统提出了更高的要求，同时超宽带系统以其功耗小、安全性高、不易产生干扰和数据传输速率快等优点成为近年研究热点。在超宽带射频微系统中滤波器作为选频和去噪的重要器件，在工作带宽大、频段高的基础上，还需要满足带内插损低、带外抑制度高等条件。传统的超宽带滤波器在工作带宽及使用频段上都有所限制，不能适用于超宽带射频微系统的场合。

随着三维工艺技术的发展，三维射频器件的集成得到了进一步的拓展。目前，三维集成工艺主要包括低温共烧陶瓷 LTCC（Low Temperature Co-fired Ceramic）及硅通孔 TSV（Through Silicon Via）等，

收稿日期：2020-05-28

多采用微带线、带状线、共面波导和介质集成波导等平面传输线形式，再利用陶瓷或硅基板等进行多层图案和层间互连结构制备，从而得到具有宽带特性的滤波器结构。一方面，微带线等开放式传输线在集成度较高时，线间耦合性较大；另一方面，基底介质在高频段时损耗越发明显。因此，目前的传统三维集成工艺难以实现毫米波乃至太赫兹频段宽带滤波器的高传输效率和功率容量，不能满足射频微系统对高性能超宽带滤波器的要求。

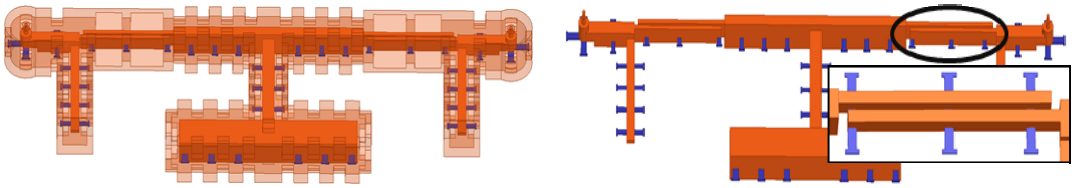
近年来，在美国国防部先进研究计划局（DARPA）的支持下，以美国 Nuvostronics 公司为首，并联合科罗拉多大学博尔德分校等高校开展一种基于 MEMS 工艺的全金属结构增材制造技术的研究——PolyStrata 工艺。PolyStrata 工艺通过多层光刻成形及金属电铸的 MEMS 微加工工艺来实现集成的矩形微同轴传输线[1]，利用矩形微同轴传输线，可进行各类宽带无源器件与天线设计，并可作为射频微系统的集成平台。这种矩形同轴传输线优势在于[2,3]：50Ω 矩形同轴传输线在 450GHz 高频能提供单 TEM 模式的传输；完全屏蔽的传输线意味着辐射损耗低，同时提供较高的共墙线间耦合度；避免了多层介质材料引入的插入损耗和散热问题。

矩形微同轴传输线的优点在各类高性能宽带无源器件与天线设计中也得到了良好的印证，为高性能毫米波及太赫兹系统的设计提供了可能。基于 PolyStrata 工艺，目前国外实现了部分基于同轴传输线的微波毫米波器件三维片上集成，如功分器[4]、耦合器[5,6]、天线及天线阵列[7-9]、滤波器[10]等，并且已经开展了射频微系统的一体化集成。国内对矩形微同轴传输线制备技术的研究起步较晚，目前已报道的文献多为无源器件及天线的理论仿真研究，在工艺制备上还处于矩形微同轴传输线制备及测试阶段[11-15]。本文基于现有工艺条件，设计并制备得到了 10GHz~50GHz 超宽带矩形微同轴滤波器样件，并通过测试验证了工艺制备的精度与高层器件堆叠的可行性，为高性能射频微系统的集成奠定了基础。

1　矩形微同轴滤波器结构设计

矩形微同轴传输线在很宽的频率范围内都具有低损耗特性，因此非常适用于设计低损耗宽带微波无源器件。本文基于矩形微同轴传输线，对 10GHz~50GHz 超宽带带通滤波器进行了设计与制备。

图 1（a）所示为本文设计的 10GHz~50GHz 超宽带滤波器，主要包括多模谐振器内导体部分、外导体以及介质支撑结构。去除外导体的多模谐振器内导体部分如图 1（b）所示，其中包括深宽比超过 5:1 的高深宽比狭缝结构，大大增加了工艺制备的难度。通过优化内导体线宽、线高以及线间距，可获得所需电学性能。外导体侧壁上有用于内部牺牲光刻胶剥离的周期排布释放孔结构，在保证光刻胶能够充分释放的前提下，释放孔尺寸应尽可能小。介质支撑结构在器件内部也呈周期性排列，用来支撑并固定内导体结构，设计在第五层进行制备。仿真分析表明，排布合适的薄、窄介质支撑结构具有对内导体的稳定支撑作用，且不会影响阻抗特性。



（a）整体结构　　（b）内导体及支撑结构

（a）The overall structure　　（b）Inner conductor and supporting structure

图 1　10GHz~50GHz 超宽带矩形微同轴滤波器模型

Fig. 1　10GHz~50GHz UWB rectangle micro-coaxial filter model

图 1（a）所示的矩形微同轴滤波器结构外部整体尺寸为 13.2mm×4.2mm×0.86mm。滤波器两侧端口由矩形微同轴线-GSG 过渡转接结构组成，用于探针台进行测试，同时可通过金丝引线键合的方式与其他器件或芯片进行互联，集成混合电路或微系统。

利用 ANSYS HFSS 软件对图 1 所示模型进行仿真，得到如图 2 所示结果：矩形微同轴滤波器在 10GHz~50GHz 工作带宽内回波损耗优于 18dB，插入损耗低于 0.2dB；在 5GHz 处带外抑制达到 42dB，在 55GHz 处带外抑制达到 45dB。从仿真结果来看，所设计的基于矩形微同轴传输线 10GHz~50GHz 超宽带滤波器具有低损耗、高通带选择性、高带外抑制等优良特性。

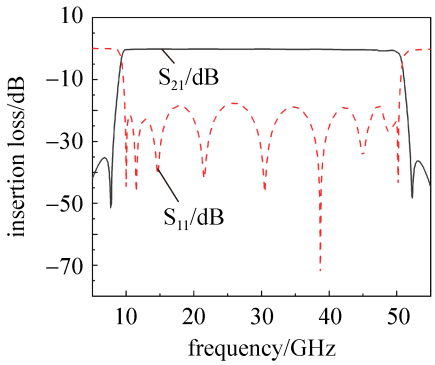


图 2　超宽带矩形微同轴滤波器仿真结果

Fig. 2　Simulation results of UWB rectangle micro-coaxial filter

2　矩形微同轴滤波器工艺流程及器件制备

2.1　工艺流程

矩形微同轴器件的加工工艺过程如图 3 所示。衬底一般使用半导体硅基底，在衬底表面建设一层技术种子层，选用光刻胶作为牺牲层，光刻制备得到图形凹槽，在凹槽内利用电化学沉积电铸一定厚度的金属铜，经过平坦化后将表面粗糙的电铸铜处理成表面光亮的平整结构，同时控制金属铜与光刻胶的高度差。内导体的悬空状态由涂覆的一层聚合物形成的桥梁结构支撑。重复光刻-电铸-平坦化工艺过程，完成多层堆叠后，去除牺牲层光刻胶，得到空气介质的金属矩形微同轴传输线结构。当每层的图形变化复杂时，多次重复光刻-电铸-平坦化等重复性工艺次数得到十层同轴滤波器，图形的线条精度及每层堆叠的层高精度均控制在微米量级内，堆叠层数越高，精度控制越困难，工艺实现难度越大。

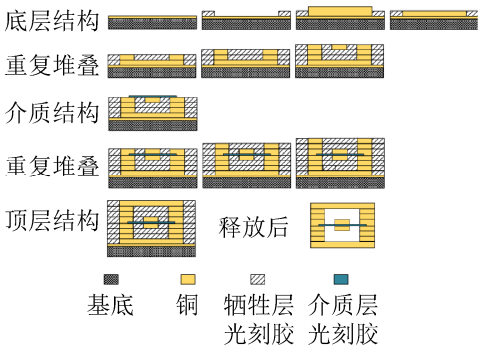


图 3　矩形微同轴器件制备流程

Fig. 3　Flow chart of preparation of rectangle micro-coaxial devices

2.2　器件制备

利用图 3 所示的加工流程方法，经过试验参数优化通过光刻得到均匀性 97%、厚度 100μm 以上的光刻胶膜，其中胶膜陡直度达到 88.5°，层间套刻误差可控制在 5μm 以内。微电铸后的电铸铜结构均匀性可达 95%，且表面铜结晶细密、表面光亮。平坦化后的一层结构厚度为 100μm±5μm，其中金属铜与光刻胶的高度差均值低于 1μm。如图 4 所示，重复上述过程，经过九次光刻-电铸-平坦化过程及一次介质支撑结构光刻后完成十层滤波器样件的制备。

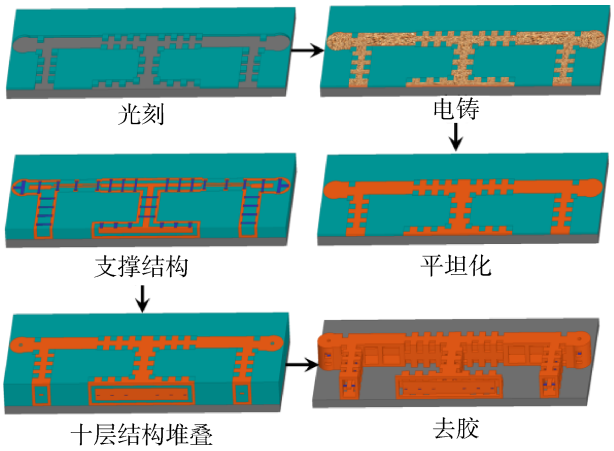
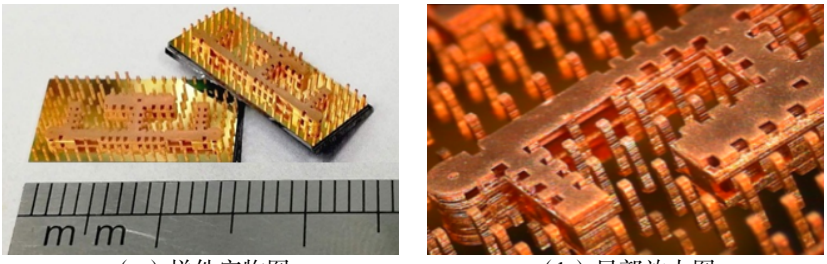


图 4　矩形微同轴滤波器制备工艺过程

Fig. 4　Fabrication process of rectangle micro-coaxial filter

最终去除牺牲层光刻胶得到矩形微同轴滤波器实物如图 5（a）所示，局部放大图如图 5（b）所示。



（a）样件实物图
（a）Sample physical picture

（b）局部放大图
（b）Partial enlarged view

图 5　矩形微同轴滤波器实物图
Fig. 5　Photos of rectangle micro-coaxial filter

3　矩形微同轴滤波器结构及性能分析

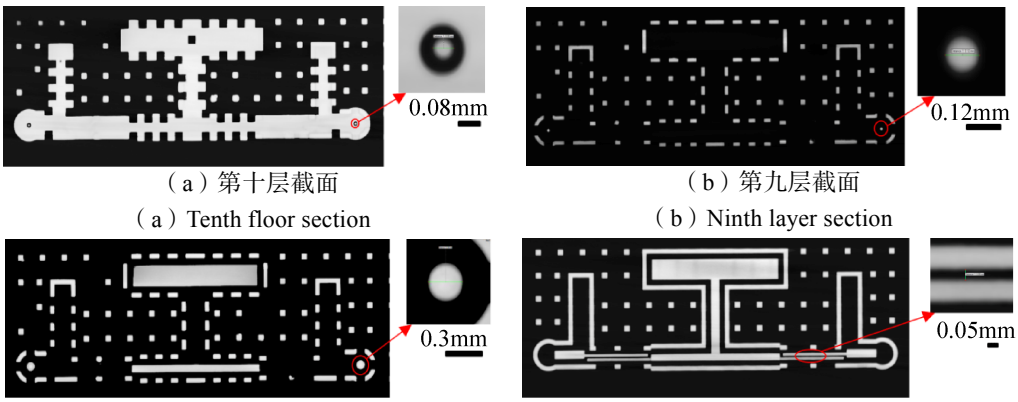
3.1　结构分析

测量滤波器外部结构尺寸，与设计值对比分析工艺误差，如表 1 所示，线宽误差在 4μm 范围内，器件厚度误差在±7μm 范围内。

表 1　外部尺寸测量
Table 1　External dimension measurement

技术指标	设计值（μm）	实测 1（μm）	实测 2（μm）	实测 3（μm）	误差（μm）
器件厚度	860	863	853	861	±7
线宽	527	530.13	529.37	530.52	4
端口 1	180	179.91	179.70	179.34	±1
端口 2	80	80.53	81.18	79.25	±2

滤波器样件内部结构不可视，使用计算机断层成像技术 CT（Computer Tomography）对矩形微同轴滤波器的内部微细结构尺寸进行测量，如图 6 所示，内外导体及支撑结构均完好，且各截面测量尺寸基本与设计尺寸一致。



（a）第十层截面
（a）Tenth floor section

（b）第九层截面
（b）Ninth layer section

（c）第八层截面
（c）Eighth layer section

（d）第四层截面
（d）Fourth layer section

图 6　矩形微同轴滤波器 CT 扫描图像
Fig. 6　CT scan image of rectangle micro-coaxial filter

3.2　性能测试分析

使用射频探针台与矢量网络分析仪测试滤波器性能，如图 7 所示。在 10GHz~45GHz 内，实测插

入损耗小于 0.76dB，在 27.7GHz 处测得最小插入损耗为 0.44dB，在此频率范围内回波损耗都优于 14.3dB。在 45GHz~50GHz 内，滤波器的损耗变大至 1.2dB，测得 47GHz 频率附近回波损耗恶化至 11.4dB。此外，测得在 5GHz 时带外抑制达到 41.8dB，55GHz 时带外抑制为 43.9dB。

滤波器样件测试结果曲线与仿真结果基本吻合，表现出低损耗、高通带、高带外抑制等优良特性，但在更高频时的损耗与仿真结果存在差异。

微同轴滤波器的内导体结构为线宽 50μm 的深宽比超过 5:1 的高深宽比结构，如图 1（b）所示，工艺实现难度较大。该部分 50μm 尺寸的仿真结果显示，在±2μm 的误差范围内，回波损耗均优于 15dB，插入损耗小于 0.8dB；误差增大至±4μm 时，插入损耗增大至 1dB。

分析造成高频损耗差异的原因，主要包括以下两点：

①在实际测试中，使用 CT 扫描成像观测到内部结构均完好，但测量精度有限，内部 50μm 线宽尺寸需通过牺牲层光刻胶去除后金属铜的去除速率进行评价，推测该部分线宽在 49μm~53μm 之间，插入损耗与误差仿真结果基本一致，但回波损耗有所增大。由于该部分 50μm 线宽尺寸是由去铜速率分析得到，存在一定误差，且制备过程中的工艺不确定性造成不同区域的线宽差值，尺寸误差导致测试结果与仿真数据之间的差异。

②十层结构制备完成后经过牺牲材料的释放，处理后的矩形微同轴滤波器样件的内外导体金属铜表面粗糙度均变大，粗糙度直接影响样件插入损耗，特别是毫米波频段更为明显[15]，如图 8 所示，在 45GHz~50GHz 处的损耗与仿真结果相比有增大趋势。后续将进一步优化工艺参数提高线宽精度，改善释放过程造成金属铜表面粗糙的问题，提升制备的滤波器性能。

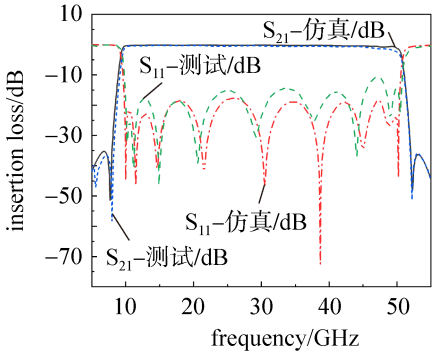


图 7　矩形微同轴滤波器样件测试结果

Fig. 7　Test results of rectangle micro-coaxial filter samples

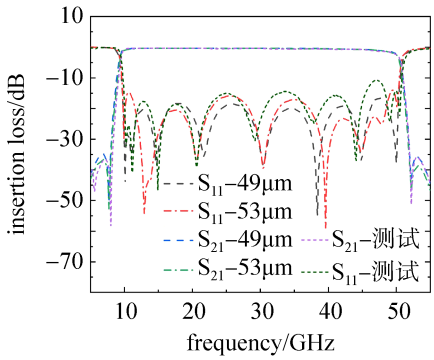


图 8　矩形微同轴滤波器样件损耗测试及仿真结果对比

Fig. 8　Result comparison of the simulated and measured loss of rectangle micro-coaxial filter samples

4　结束语

本文在矩形微同轴传输线的电路基础上设计了 10GHz~50GHz 超宽带矩形微同轴滤波器模型，仿真结果显示，在工作带宽内插入损耗低于 0.8dB，回波损耗优于 17dB，带外抑制达到 45dB。通过 PolyStrata 工艺的制备流程经过九次光刻-电铸-平坦化过程及一次介质支撑结构光刻后完成最小线宽 50μm 的十层滤波器样件的制备，测得制备的滤波器样件性能与仿真曲线基本吻合，在 40GHz 时插入损耗为 0.6dB，回波损耗为 21.6dB，在 5GHz 和 55GHz 时带外抑制分别为 41.8dB 和 43.9dB。本文完成了基于 PolyStrata 技术的多层复杂结构堆叠，实现了 10GHz~50GHz 的超宽带矩形微同轴滤波器的加工及测试，经过后续工艺优化为实现小型化、宽频带、高频段及低损耗的射频前端微系统的高度集成打下了基础。

参考文献

[1]　REID J R, MARSH E D, WEBSTER R T. Micro machined rectangular-coaxial transmission lines[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(8): 3433–3442.

[2]　DEJAN S, ZOYA B, MILAN V, et al. Design of microfabricated rectangular coaxial lines and components for mm-wave

applications[J]. Microwave Review, 2006, 12: 11–16.

[3] VANHILLE K J. Design and characterization of microfabricated three-dimensional millimeter-wave components[D]. University of Colorado, 2007.

[4] EHSAN N, VANHILLE K, RONDINEAU S, et al. Broadband micro-coaxial wilkinson dividers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(11): 2783–2789.

[5] SUTTON N A, OLIVER J M, FILIPOVIC D S. Wideband 18–40GHz surface micromachined branchline quadrature hybrid[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2012, 22(9): 462–464.

[6] SUTTON N A, OLIVER J M, FILIPOVIC D S. Wideband 15–50GHz symmetric multi-section coupled line quadrature hybrid based on surface micromachining technology[J]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium digest，IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2012: 1–3.

[7] MRUK J, HONGYU Z, UHM M, et al. Wideband mm-wave log-periodic antennas[C]. European Conference on Antennas & Propagation. IEEE, 2009.

[8] OLIVER J M, ROLLIN J M, VANHILLE K, et al. A w-band micro machined 3-D cavity-backed patch antenna array with integrated Diode detector[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(2): 284–292.

[9] OLIVER J M, RALSTON P, Cullen S E, et al. A w-band micro coaxial passive monopulse comparator network with integrated cavity-backed patch antenna array[C]. Microwave Symposium Digest. 2011.

[10] REID J R, OLIVER J M, VANHILLE K, et al. Three dimensional metal micromachining: a disruptive technology for millimeter-wave filters[C]. IEEE Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, 2012.

[11] 史光华, 徐达, 王建, 等. 基于 MEMS 的矩形微同轴技术研究现状[J]. 微纳电子技术, 2019, 56(4): 303–313.
SHI Guanghua, XU Da, WANG Jian, et al. Study status of the rectangular micro-coaxial technology based on MEMS[J]. Micronanoelectronic Technology, 2019, 56(4): 303–313.

[12] 范新磊, 张斌珍, 张勇, 等. 射频同轴传输线的设计仿真与加工工艺[J]. 微纳电子技术, 2013, 50(6): 397–402.
FAN Xinlei, ZHANG Binzhen, ZHANG Yong, et al. Design, simulation and machining process for the RF coaxial transmission line[J]. Micronanoelectronic Technology, 2013, 50(6): 397–402.

[13] 高荣惠, 赵龙, 崔建利, 等. MEMS 射频同轴线的仿真与工艺研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 713–718.
GAO Ronghui, ZHAO Long, CUI Jianli, et al. Simulation and fabrication research of MEMS RF coaxial transmission line[J]. Jouirnal of North university of China (Natural Science Edition), 2015, 36(6): 713–718.

[14] 杜立群, 齐磊杰, 朱和卿, 等. 基于电化学沉积的金属基微射频 T 形功分器研制[J]. 电加工与模具, 2018, 340(3): 30–34, 48.
DU Liqun, QI Leijie, ZHU Heqing, et al. Development of metal-base micro RF t-shaped power divider based on electrochemical deposition technique[J]. Electromachining and Mould, 2018, 340(3): 30–34, 48.

[15] 胡松祥, 王建, 史光华, 等. MEMS 铜基微同轴传输线性能仿真及测试[J]. 微纳电子技术, 2019, 56(8): 644–673.
HU Songxiang, WANG Jian, SHI Guanghua, et al. Performance simulation and mearsurement of the MEMD Cu-based micro-coaxial transmission line[J]. Micronanoelectronic Technology, 2019, 56(8): 644–673.

[作者简介]

汪郁东　1996 年生，硕士，助理工程师，主要研究方向为 RF-MEMS 微型同轴器件工艺技术。
赵广宏　1984 年生，博士，高级工程师，主要研究方向为传感器及 MEMS 微工艺技术。
陈春明　1994 年生，硕士，助理工程师，主要研究方向为传感器及 MEMS 微工艺技术。
陈青松　1972 年生，硕士生导师，研究员，主要研究方向为传感器及仪器仪表。
谷胜明　1984 年生，博士，高级工程师，主要研究方向为相控阵天线技术。
许　进　1987 年生，博士，教授，主要研究方向为微波/毫米波电路与系统。