

用于 PolyStrata 技术的光刻工艺探索研究

汪郁东, 赵广宏, 陈青松, 金小锋, 张 姍
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 在高集成的射频微机电系统 RF MEMS (Radio Frequency Micro Electro Mechanical System) 器件的发展趋势下, 三维集成工艺的研究越来越多。基于 PolyStrata 技术的三维多层堆叠同轴器件以其无色散、低损耗、超宽带的优势脱颖而出, PolyStrata 技术使用紫外厚胶作为牺牲材料, 对光刻胶粘附性、精度、工艺兼容及释放性能要求高, 常规厚胶难以满足。探索 A、B 两种紫外光刻厚胶, 对两者工艺参数及图形质量进行对比研究。结果表明, 光刻胶 A 厚度均匀性为 98.6%, 图形偏差小于 10 μm ; 光刻胶 B 图形偏差小于 5 μm , 但均匀性较差, 约 80.4%。

关键词: RF MEMS; PolyStrata; 紫外光刻; 厚胶

中图分类号: TB322 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2020)06-0057-06

Research on lightgraph technology for PolyStrata technology

WANG Yudong, ZHAO Guanghong, CHEN Qingsong, JIN Xiaofeng, ZHANG Shan
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China)

Abstract: With the development of highly integrated RF MEMS devices, there are more and more researches on 3D (Three Dimensional) integration technology. The 3D multi-layer stacking coaxial devices based on PolyStrata technology stand out for its advantages of dispersionless, low loss and ultra-wiband. PolyStrata technology uses ultraviolet thick adhesive as sacrificial material, which has high requirements on photoresist adhesion, precision, process compatibility and release performance, and conventional thick adhesive is difficult to achieve. In this paper, two kinds of UV lithography thick adhesives, A and B, are explored, and their process parameters and graphic quality are compared. The experimental results show that the thickness uniformity of photoresist A is 98.6%, and the graphic deviation is less than 10 μm . The deviation of photoresist B is less than 5 μm , but with poor uniformity, about 80.4%.

Key words: RF MEMS; PolyStrata; UV lithography; Thick photoresist

引 言

微机电系统 MEMS 是 21 世纪科技与产业的热点之一, 随着 MEMS 技术向更小型化、高集成度、高频段需求发展, RF MEMS 集成系统的优势逐渐显露出来。RF MEMS 系统在小型化、高集成度的同时, 满足高精度、低功耗的需求, 比起微带线、共面波导结构, 微同轴结构在微波毫米波段优势更加明显。微同轴器件由外导体屏蔽结构、悬空的内导体结构组成, 内外导体之间形成空气腔结构, 使得器件隔离度高、无色散且损耗低。2004 年, 美国 Rohmand Haas 公司开发出 PolyStrata 技术^[1], 应用电化学增材的三维堆叠集成并在同轴结构中引入内导体的介质支撑结构, 在美国国防高级研究计划局 DAPRA (Defense Advanced Research Projects Agency) 的支持下实现封闭外导体与内导体之间为空气介质的同轴传输线结构^[2]。从研究至今, 国外基于 PolyStrata 技术已经实现天线^[3,4]、天线阵列^[5]、耦合器^[6]、功分器^[7]、谐振器^[8]等 MEMS 微小型器件的三维集成, 集成度高、频带宽且损耗低, 在毫米波甚至太赫兹频段优势更为明显, 且能与 MMIC 电路或其他无源器件互连^[9], 实现一体化封装集成。国内对于 PolyStrata 技术的研究刚刚起步, 目前, 已有加工的同轴器件只有五层的较基础的传输线、耦合器及天线结构等^[10,11], 远不如国外已经完成的十层结构及一体化集成器件。

PolyStrata 技术是在硅基表面利用光刻胶制作电铸母型, 电化学沉积在其上电铸金属 Cu, 利用研

磨或抛光将基片表面平坦化处理, 根据器件结构重复上述过程, 最后释放光刻胶得到悬空的内导体及空气腔结构。微同轴器件一般通过五到十一层金属铜堆叠实现, 图 1 以五层同轴传输线结构为例介绍 PolyStrata 技术的工艺流程。如图 1 所示, 每层铜厚 $50\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$, 传输线截面宽高都在百微米左右, 复杂结构根据器件需求在层数及尺寸上都有增加, 但整体尺寸在毫米级。

作为整个金属铜器件的支撑模型, 光刻工艺是 PolyStrata 技术的基础工艺之一。PolyStrata 技术的 PolyStrata 工艺利用 UV-LIGA 技术得到电铸母型, 光刻图形的线条精度及对准精度直接影响电铸 Cu 堆叠面的平整度, 尤其在狭缝结构中细微的偏差会直接影响器件性能。PolyStrata 技术中, 每层金属 Cu 的高度在 $50\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$, 光刻胶的厚度至少在 $120\mu\text{m}$ 以上才能保证平坦化之后 $100\mu\text{m}$ 厚 Cu 的平整图形, 根据器件需求要经过五到十一次重复性迭代, 光刻胶多次长时间浸泡在酸性电解质溶液中, 光刻胶的超粘附性、热稳定性极其重要, 厚胶的制备时长、热稳定性决定器件的制作周期和成品率。光刻胶的选择成为 PolyStrata 技术中难点之一。

目前, 应用最广泛的紫外厚胶是 SU-8 系列光刻胶, UV-LIGA 工艺中 SU-8 光刻胶厚可达数百微米甚至 $1000\mu\text{m}$, 结构深宽比达到 $50:1$ ^[12-14], 但在 PolyStrata 技术中作为牺牲材料, SU-8 光刻胶很难去除干净, 同时价格昂贵、对光敏感程度高、影响参数多。在同轴器件中, 常将 SU-8 胶作为支撑层介质层应用^[15]。紫外厚胶种类较多, 如 AZ4000 系列正性光刻胶, 制备出 $20\mu\text{m}\sim 30\mu\text{m}$ 厚度、 $5\mu\text{m}$ 线条图形^[16,17]; 大连理工大学应用 AZ50XT 正性光刻胶制备出 $60\mu\text{m}$ 厚的光刻图形^[18,19], 并通过多层堆叠工艺完成微射频 T 形功分器的制备^[20]; 苏州大学应用 $40\mu\text{m}$ 干膜光刻胶研究了干膜光刻的整套工艺过程^[21]。中电 38 所和中北大学利用 BPN 光刻胶与 SU-8 胶结合制备出传输线结构^[22,23], 但 BPN 光刻胶对温差反应敏感, 在电铸过程中易出现裂纹, 工艺稳定性难以保证。基于 PolyStrata 技术中对光刻工艺的要求, 常规厚胶在厚度、稳定性及工艺兼容上都难以满足。

对比正性厚胶, 负胶粘附性更强, 在胶膜较厚时光刻图形精度更高。本文选用干膜光刻胶 A 和光刻胶 B 两种光刻负胶进行试验, 研究 $100\mu\text{m}$ 以上的紫外厚胶光刻工艺, 对两种光刻胶的工艺参数和图形质量进行对比研究。

1 紫外厚胶光刻的工艺过程

1.1 实验准备

作为典型的干法光刻工艺, 干膜光刻工艺是用来制备电铸母型的一种较为典型的紫外厚胶工艺方法, 其实施工艺相对简单。可用于制备高深宽比微纳结构的最常见的干膜厚胶厚度有 $120\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ 和 $40\mu\text{m}$, 本次试验光刻胶 A 选用 $120\mu\text{m}$ 的干膜光刻胶, 使用覆膜机进行贴膜操作, 选用碳酸钠溶液作为显影液。光刻胶 B 选用德国 Microchemicals 公司提供的负性光刻胶, 单次匀胶可得到 $20\mu\text{m}\sim 130\mu\text{m}$ 的匀胶厚度, 且可以实现垂直度较高的显影效果, 选用四甲基氢氧化铵水溶液 (TMAH) 作为显影液。曝光时采用的设备是 ABM 双面对准光刻机, 光强为 $13.5\text{mW}/\text{cm}^2$ 。

1.2 光刻胶 A 光刻实验

本次试验选用的 $120\mu\text{m}$ 干膜贴片由三层组成, 中间为对紫外光敏感的可光刻胶膜, 胶膜两侧一面为保护膜, 一面为透光膜。贴膜时, 撕下一侧的保护膜, 保护膜垫在待加工基片下, 透光膜在上放于

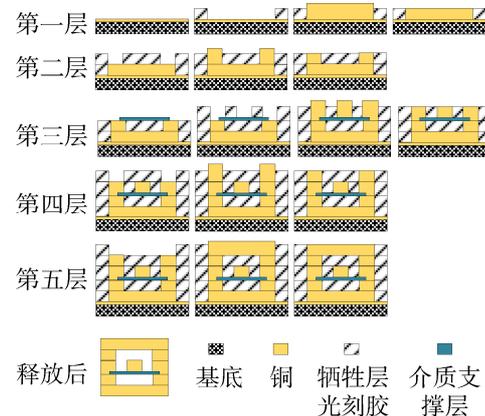


图 1 基于 PolyStrata 技术的五层同轴传输线工艺流程

Fig. 1 Process flow chart of five-layer coaxial transmission line based on PolyStrata technology

基片上一同送入加热滚筒进行贴膜操作，加热过程使干膜中的粘结剂发挥作用与基片牢固结合，保留透光膜曝光以防止光刻时发生粘板现象。在实验过程中，采用 110℃ 加热滚筒，将干膜贴在镀上金属膜的硅圆片上，待冷却后曝光 8s，1% 无水碳酸钠溶液加热至 35℃，将透光膜撕下显影 4 分钟。

干膜光刻图形如图 2 (a) 所示，黄色区域为光刻图形，图形内区域显影干净，但是边缘黑边较重，光刻胶顶部胶膜时刻处于最大光强状态，顶部胶膜和底部胶膜的曝光剂量相差较大，显影后图形顶部线宽大于底部线宽，胶膜顶部 530μm 图形显影后尺寸大于 580μm，胶膜底部 530μm 图形显影后尺寸小于 510μm。根据负胶特性可知，胶膜曝光过量，显影液温度较高显影时间过长。将曝光时间调整至 7s 后，光刻图形如图 (b) 所示，显影后线条精度改善；将曝光时间调整为 6.5s，显影液温度降到 25℃ 显影 4 分钟，此时光刻图形如图 2 (c) 所示，线条较 (a) 明显，图形外黑边明显改善。图形尺寸如图 2 (d) 所示，图形偏差小于 10μm。

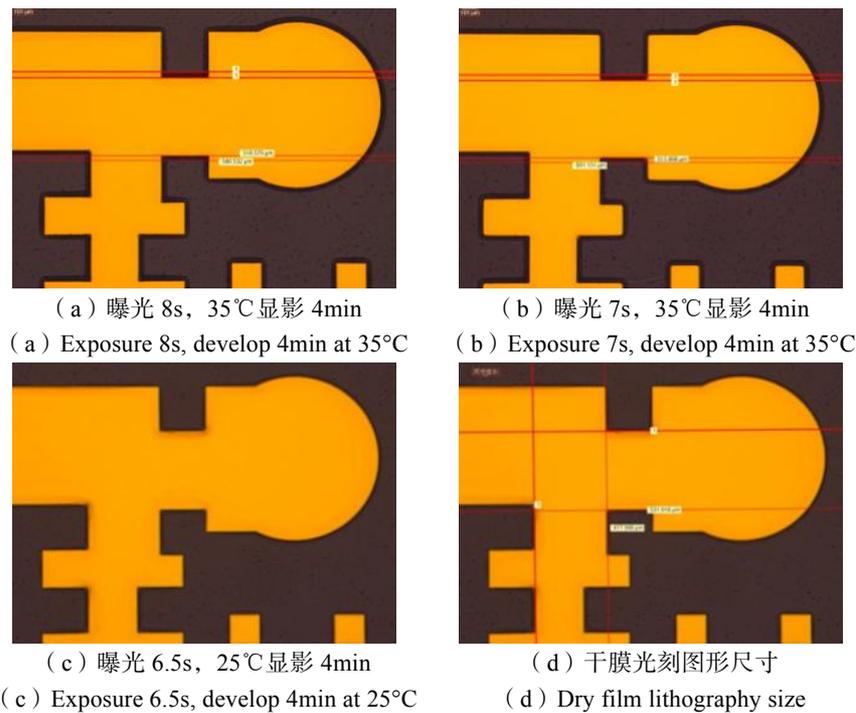


图 2 干膜光刻工艺图形

Fig. 2 Dry film lithography process graphics

使用台阶仪测量光刻胶的均匀性，结果如表 1 所示，120μm 厚的干膜光刻胶高度为 120±2μm，均匀性 98.6%。

表 1 干膜光刻胶的均匀性测试结果

Table 1 Uniformity test results of dry film photoresist

胶厚 (μm)	上	中	下	左	右
高度测试 1	119.4	119.9	120.4	122.8	119.8
高度测试 2	119.3	120.2	119.8	121.6	119.5

该光刻后基片进行去胶试验，光刻胶可溶于丙酮，在去胶溶剂中可溶解干净。

1.3 光刻胶 B 光刻实验

根据该光刻胶产品的说明资料，本次试验要实现厚度 100μm 以上的光刻图形，将匀胶速度设置为 1000rpm/min，热处理采用热板加热方式，该光刻胶粘度较大，曝光时采用接触式曝光，若烘烤时间不够容易粘板，可适当延长烘烤时长，温度 120℃ 烘烤 20min，曝光时间为 280s，显影采用 2.5% 四甲基氢氧化铵水溶液，显影 2min~3min 将基片从显影液中取出，用去离子水清洗 1min。

本次实验中, 1000rpm/min 旋涂速度得到的图形厚度在 60μm 左右, 适当降低转速, 同时延长烘烤时间。旋涂参数及可获得的光刻胶厚度, 如表 2 所示。

将转速调整至 500rpm/min, 得到光刻图形如图 3 (a) 所示。该光刻胶形成的图形结构清晰, 从图 3 (b) 可以看出, 光刻图形偏差小于 5μm。

表 2 旋涂参数及获得的光刻胶厚度
Table 2 Spin coating parameters and the obtained photoresist thickness

最高旋涂速度 (rpm/min)	旋涂时间 (s)	光刻胶平均 厚度 (μm)
1000	30	60
800	30	88
500	30	130

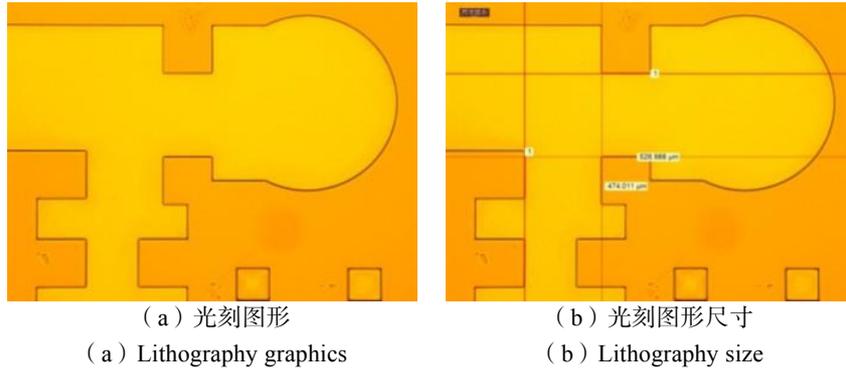


图 3 光刻胶 B 光刻工艺图形

Fig. 3 The lithography process graphics of photoresist B

使用台阶仪测量匀胶的均匀性时其测试结果如表 3 所示, 从测试结果可以发现, 匀胶基片中间位置最薄, 左侧区域较厚。由于基片的对准采用手动校准方式, 倒胶也采用手动方式, 另外, 该光刻胶的流平性有限, 造成该次光刻试验基片的均匀性约在 80.4%, 均匀性相对较差。

表 3 光刻胶 B 的光刻均匀性测试结果

Table 3 Uniformity testresults of photoresist B

胶厚 (μm)	上	中	下	左	右
高度测试 1	128.2	108.9	138.5	152.5	141.3
高度测试 2	130.4	112.5	136.7	148.9	145.8

在后续去胶实验中, 采用丙酮浸泡、去胶溶剂中加热浸泡等方式进行溶解, 未进行电铸时长时间处理可从基底剥离, 但在电铸后很难完全溶解干净。

2 实验结果讨论

结合两组结果, 对光刻胶 A 及光刻胶 B 的结果作对比, 如表 4 所示。

表 4 干膜光刻胶 A 及光刻胶 B 性能对比结果

Table 4 The performance comparison results of dry film photoresist A and photoresist B

	A	B
操作过程	较简单	手动校准及倒胶, 较复杂
线条精度	<10μm	<5μm
均匀性	98.6%	80.4%

干膜光刻胶 A 的工艺操作简单, 胶膜均匀性好, 且去胶容易。但由于干膜光刻胶对紫外光敏感程度高, 分辨率不高, 更适用于大尺寸深刻蚀中, 其固定胶膜厚度也局限了光刻图形的高度; 光刻胶 B 光刻后胶膜均匀性较差, 但是由于光刻胶对紫外光的敏感程度较低, 形成的图形结构线条更加清晰, 且图形尺寸光刻偏差小, 满足精细微小器件的需求。根据 PolyStrata 技术工艺需求, 最后两种光刻胶材料需要完全去除, 实验结果中光刻胶 A 可完全去除, 而光刻胶 B 的去除过程时间较长, 长时间的去

胶处理会影响器件结构,因此,光刻胶 A 更能满足基于 PolyStrata 技术的微同轴器件制备工艺要求。

3 结束语

本文探索两种典型的干法和湿法紫外厚胶的光刻工艺参数及图形结果,两种光刻胶稳定性好,在电铸、平坦化后均可满足多次重复光刻要求,但光刻胶 B 去胶后仍有部分残胶很难去除,干膜光刻胶 A 的去胶试验效果更好。在 PolyStrata 技术工艺需求下,光刻胶 A 更能满足微同轴器件制备工艺要求,后续的研究中将进一步突破牺牲层释放技术,应用于同轴器件制备中。

参考文献

- [1] SHERRER D, FISHER J. Coaxial waveguide microstructures and the method of formation thereof: USA, US20040263290a1[P]. (2004-12-30).
- [2] FILIPOVIC D S, POPOVIC Z, VANHILLE K, et al. Modeling, design, fabrication, and performance of rectangular μ -coaxial lines and components[C]. IEEE International Microwave Symposium Digest, 2006.
- [3] LUKIC M V, FILIPOVIC D S. Surface-micromachined dual Ka-band cavity backed patch antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(7): 2107–2110.
- [4] LUKIC M, KIM K, LEE Y, et al. Multi-physics design and performance of a surface- micromachined Ka-band cavity backed patch antenna[C]. IEEE International Microwave & Optoelectronics Conference, 2007.
- [5] LUKIC M V, FILIPOVIC D S. Integrated cavity-backed Ka-band phased array antenna[M]. 2007.
- [6] VANHILLE K, ROLLIN J M, RONDINEAU S, et al. Ka-band surface-mount directional coupler fabricated using micro-rectangular coaxial transmission lines[C]. IEEE International Microwave Symposium Digest, 2008.
- [7] IMMORLICA A A, ACTIS R, NAIR D, et al. Miniature 3D micro-machined solid state power amplifiers[C]. IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas & Electronic Systems, 2008.
- [8] VANHILLE K J, FONTAINE D L, NICHOLS C, et al. Ka-band miniaturized quasi-planar high-Q resonators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55(6): 1272–1279.
- [9] EHSAN, CULLENS, VANHILLE, et al. Micro-coaxial lines for active hybrid-monolithic circuits[C]. IEEE International Microwave Symposium Diges, 2009.
- [10] 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 rectangular micro-coaxial technology based on MEMS[J]. Micronanoelectronic Technology, 2019, 56(4): 303–313.
- [11] 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): 644–648, 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
- [12] YANG R, WANG W. A numerical and experimental study on gap compensation and wavelength selection in UV-lithography of ultra-high aspect ratio SU-8 microstructures[J]. Sensors and Actuators B (Chemical), 2005, 110(2): 279–288.
- [13] 张立国, 陈迪, 杨帆, 等. SU-8 胶光刻工艺研究[J]. 光学精密工程, 2002, 10(3): 266–270.
ZHANG Liguu, CHEN Di, YANG Fan, et al. Research on SU-8 resist photolithography process[J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(3): 266–270.
- [14] 李雯, 谭智敏, 薛昕, 等. 紫外线厚胶光刻技术研究及应用[J]. 微纳电子技术, 2003, 40(8): 151–153.
LI Wen, TAN Zhimin, XUE Xin, et al. Research and application of thick photoresist lithography using UV ligh[J]. Micronanoelectronic Technology, 2003, 40(8): 151–153.
- [15] 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.
- [16] 王进. AZ4620 紫外厚胶制备金属小零件工艺研究[J]. 科技创新与应用, 2017(16): 53–54.
WANG Jin. Study on preparation of metal small parts with AZ4620 UV Thick adhesive[J]. Technology Innovation and Application, 2017(16): 53–54.

- [17] 许龙芳. 聚合物微流控芯片压印成型模具关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院, 2011.
XU Longfang. The key techniques research of polymer microfluidic chips mould for hot embossing molding[D]. Changchun: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [18] 杜立群, 李爱琪, 齐磊杰, 等. 高精度 AZ 厚胶光刻及在微型射频同轴器制作中的应用[J]. 航空制造技术, 2018, 61(9): 26–31.
DU Liqun, LI Yuanqi, QI Leijie, et al. Study on lithography of high-precision AZ thick photoresist and its application in micro RF coaxial transmitter[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(9): 26–31.
- [19] 李爱琪. 高精度 AZ 厚胶光刻及其在射频同轴传输线制作中应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
LI Yuanqi. Study on lithography of high-precision AZ thick photoresist and its application in micro RF coaxial transmitter[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [20] 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.
- [21] 朱昊枢, 胡进, 朱新生. 用于微电子机械系统的干膜光刻工艺研究[J]. 苏州大学学报(自然科学版), 2011, 27(4): 53–56.
ZHU Haoshu, HU Jin, ZHU Xinsheng. The research of the lithography process of MEMS using dry film photo-resistor[J]. Journal of Soochow University (Natural Science Edition), 2011, 27(4): 53–56.
- [22] 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]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2015, 36(6): 713–718.
- [23] 李祥祥, 桑磊, 马强. 矩形微同轴射频传输性能研究[C]. 2015 年全国微波毫米波会议, 2015.
LI Xiangxiang, SANG Lei, MA Qiang, et al. Research on radio frequency transmission performance of rectangle micro coaxial[C]. 2015 National Conference on Microwave Millimeter Wave, 2015.

[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。
金小锋 1977 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为 MEMS 惯性传感器设计。
张 姗 1987 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为薄膜压力传感器设计研发。