

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211295

## 射频 MEMS 开关寿命测试系统的设计与实现\*

史泽民<sup>1,2,3</sup> 高旭东<sup>1,2,3</sup> 王耀利<sup>2,3,4</sup> 吴倩楠<sup>1,2,3</sup> 李孟委<sup>1,2,3</sup>(1. 中北大学仪器与电子学院 太原 030051; 2. 中北大学前沿交叉科学研究院 太原 030051;  
3. 中北大学微系统集成研究中心 太原 030051; 4. 中北大学电气与控制工程学院 太原 030051)

**摘要:** 针对射频 MEMS 开关寿命测试成本昂贵,测试连线复杂,且随着射频 MEMS 开关的尺寸不断缩小,传统测试效率低、测试任务只能在实验室进行等问题,本文设计并实现了一种小型且集成化的射频 MEMS 开关测试系统,组建了具备信号发生、波形实时监测、寿命计算、数据记录和测试报告打印等功能的射频 MEMS 开关测试系统,并用该系统对某款射频 MEMS 开关进行了初步测试评价。结果表明该系统较好的完成了射频 MEMS 开关的开关电压、开关时间和冷、热寿命的测试,能够满足射频 MEMS 开关的测试要求,证明了该测试系统的实用性和测试工作的准确性。

**关键词:** 射频 MEMS 开关;MEMS 测试;小型化测试系统;开关寿命;冷寿命;热寿命

**中图分类号:** TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## Design and implementation of RF MEMS switch life test system

Shi Zemin<sup>1,2,3</sup> Gao Xudong<sup>1,2,3</sup> Wang Yaoli<sup>2,3,4</sup> Wu Qiannan<sup>1,2,3</sup> Li Mengwei<sup>1,2,3</sup>(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
2. Academy for Advanced Interdisciplinary Research, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
3. Center for Microsystem Integration, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
4. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** For the radio frequency micro-electro-mechanical system (RF MEMS) switch life test, the cost is high, the test connection is complex, and with the size of the RF MEMS switch shrinking, the traditional test efficiency is low, and the test task can only be carried out in the laboratory. In this paper, a RF micro-electro-mechanical switch test system with functions of signal generation, real-time waveform monitoring, lifetime calculation, data recording and test report printing is set up, and a RF micro-electro-mechanical switch is tested and evaluated preliminarily with this system. The results show that the design has well completed the test of the switch voltage, switch time, cold life, and thermal life of the RF micro-electro-mechanical system switch, and can meet the test requirements of the RF micro-electro-mechanical system switch, which proves the practicability of the test system and the accuracy of the test work.

**Keywords:** RF MEMS switch; MEMS test; miniaturized test system; switch lifetime; mechanical life; power life

## 0 引言

许多年来,人们一直在研究 RF MEMS 开关,相较于传统半导体开关, MEMS 开关具备高隔离、高线性度、低损耗、小体积等优势<sup>[1]</sup>。1979年,IBM公司的 Petersen<sup>[2]</sup> 首先研制出接触式 MEMS 开关,填补了在当时传统硅晶体管和机械电磁继电器之间的空白。1991年,位于加州的休斯实验室的 Larson 等<sup>[3]</sup> 设计制造出一种旋转微波传输线开关,从直流到 45 GHz 的插入损耗小于 0.5 dB,隔离度大于

35 dB。射频 MEMS 开关已经实现应用的有仪器仪表<sup>[4]</sup>、卫星系统<sup>[5-6]</sup>、无线通信系统<sup>[7]</sup> 和军事装备<sup>[8-9]</sup> 等领域。

北京大学微电子所早在 20 世纪初基于计算机视觉中的亚像元定位技术,设计了一个包括测控软件、高精度 CCD 摄像机、显微镜、图像采集与重构模块、图像分析与测量模块、信号采集适配器、信号采集与处理模块、GPIB 仪器控制、数字万用表、任意波形发生器、控制适配器、三维微动探针台、网络化远程测量、测试报告生成模块等组成部分的 MEMS 测试系统<sup>[10]</sup>。但是其本质上仍为对常规测试仪器

收稿日期:2022-09-06

\* 基金项目:装备发展部仪器型号项目资助

的有机组合,无法摆脱测试工作在实验室环境下进行的限制。中国电子科技集团公司第二十六研究所使用 LabVIEW 开发工具,同时利用国内定制的自动测试机,将矢量网络分析仪、电脑和测试机等结合到一起,开发了一套适用于 SMD 封装的 SAW 滤波器的自动测试系统。该系统可测试中心频率、带宽、插入损耗、通带波动、带外抑制、相位一致性、群延时波动、驻波等常规参数指标。且该系统可扩展应用方式,通过改造测试机可应用到更多的外壳类型的器件测试中<sup>[11]</sup>。南京电子器件研究所在近期通过对传统在片测试系统的研究,结合 GaN 芯片要求高电压、高功率输出的特点,对直流探针和测试夹具进行改进,最终使用矢量网络仪,探针台,驱动放大器,频谱仪和温度控制系统组建了大功率的在片测试系统,并用该系统对某款 GaN Quasi-MMIC 进行了测试评价<sup>[12]</sup>。中国电子科技集团公司第二十六研究所和南京电子器件研究所搭建的测试系统其主体功能仍依托矢量网络分析仪,驱动放大器,频谱仪等仪器,测试系统体积较大,集成度较低,仍需在实验室环境下进行测试。

本文主要针对共面波导(co-planar waveguide, CPW)型射频 MEMS 开关的测试进行研究,组建了具备信号发生、波形实时监测、寿命计算、数据记录和测试报告打印等功能的射频 MEMS 开关测试系统,并测试验证了组内独立设计制造的射频 MEMS 开关相关指标。

## 1 射频 MEMS 开关各项性能指标

射频 MEMS 开关测试比较复杂,是因为影响射频 MEMS 开关技术参数的因素有很多,包括悬臂梁(膜)的机械特性、接触面光滑程度、执行器的材料特性和真空封装等;同时,测试过程也受外部温度、湿度、气压甚至环境洁净度和射线情况影响<sup>[13]</sup>。在测试过程中,各种因素并不是独立存在的,而是相互耦合,互相影响,这些测试工作必须面对的问题成为准确、快速测试的一大障碍。

在设计、研发阶段,接触式射频 MEMS 开关需要进行电子特性、机械特性、环境适应性和可工作次数等项目测试<sup>[14]</sup>。表 1 是射频 MEMS 开关主要测试项目。其中,开关电压、开关时间和使用寿命是本文重点关注的测试指标。

表 1 射频 MEMS 开关测试项目分类<sup>[15]</sup>

开关特性	测试项目
电子机械特性	开关电压
	开关时间
	功率容量
	插入损耗
RF 特性	隔离度
	串联电阻
可靠性	使用寿命

如图 1 所示,传统开关电压的测试是在直流探针台上进行的,除此之外测试电路主要包括直流稳压源、电压放大器、示波器和隔离电阻。直流探针台有 3 根探针,分别为一根直流探针连接到开关的驱动电极,两根射频探针连接到开关 CPW 信号线的两端。隔离电阻取 10 k $\Omega$ ,一方面可以减小下拉电极对 RF 信号的影响,另一方面可以防止在上极板下拉时,下拉电极上 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 层被击穿而出现大电流<sup>[16]</sup>。测试时利用示波器观察波形,将电压值从 0 V(示波器波形为低电平)缓慢增加,当开关上极板下拉与接触点接触,开关处于导通状态(示波器波形为高电平),记录此时电压即为开关电压;将电压值由大到小逐渐调小,当开关处于断开状态,记录此时电压即为释放电压。

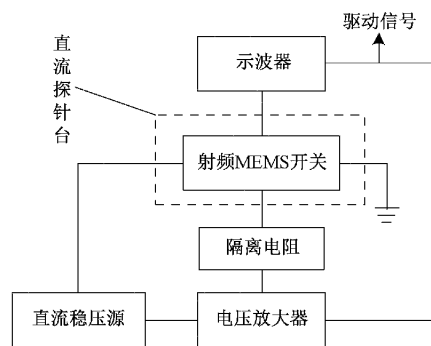


图 1 开关电压测试原理

开关时间的测试分为闭合时间和断开时间,闭合时间为开关由断开状态到导通状态这一短暂的形成稳定接触过程所用的时间,断开时间为开关由导通状态到断开状态所用的时间。信号源为开关射频通道输出较低的直流恒压。如图 2 所示,尚未施加驱动电压时,示波器 CH<sub>1</sub> 通道(观测驱动信号)显示值应为 0 V;当施加电压时,开关导通,CH<sub>2</sub> 通道(观测响应信号)显示为高电平。因此,如果用方波信号驱动开关,CH<sub>2</sub> 通道的观测到的波形也为方波信号,此时通过对比 CH<sub>1</sub> 和 CH<sub>2</sub> 之间的时间差即可得到开关的闭合时间和断开时间。

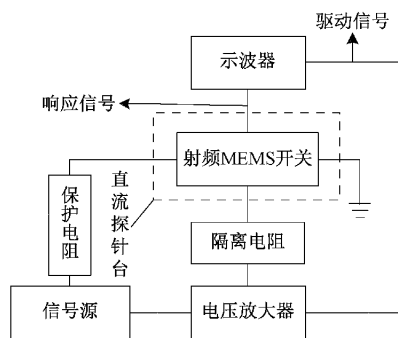


图 2 开关时间测试原理

射频 MEMS 开关的使用寿命是测试的重点指标,通常情况下用其明显失效之前的有效工作次数进行表征。射频开关冷寿命的测试原理与图 2 的开关时间测试原理类似,

不同之处为需每隔一定时间观测示波器 CH<sub>2</sub> 通道波形有无明显变差,即开关闭合时的串联电阻值没有发生剧烈变化。射频开关热寿命的测试原理如图 3 所示。与开关时间测试电路不同的是,改由射频信号源输出射频信号,经保护电阻至射频 MEMS 开关,在示波器与开关之间需接入射频检波器,方可在信号源施加方波驱动信号时清晰观测到响应信号为同频不同幅的方波,以便计数。

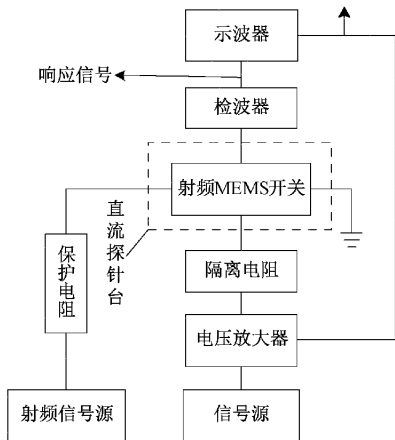


图 3 热寿命测试原理

## 2 测试系统设计

如图 4 所示,本文的主要设计有升压电路与波形调制电路的设计、射频 MEMS 开关夹具的设计和上位机软件的设计。以上位机为核心,将各传统测试仪器小型化为功能模块并集成,使得测试系统兼具驱动信号发生、波形监测和寿命计算和测试报告打印功能。

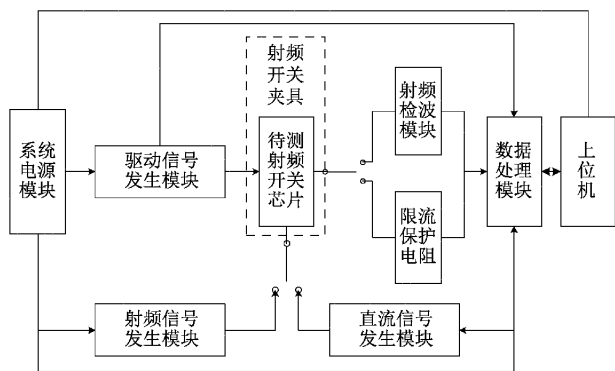


图 4 测试系统原理

### 2.1 升压与波形调制电路设计

升压电路原理如图 5 所示。升压电路将系统电源模块分配的直流低压泵升为直流高压。本文采用美国亚诺德(ADI)公司生产的 LT8365 开关芯片为核心进行电路设计,同时利用 ADI 公司的 LTspice 仿真软件进行初步仿真,能够实现升压功能,在非常低的输出电流下可以保持高效率,同时将典型输出纹波保持在 15 mV 以下。

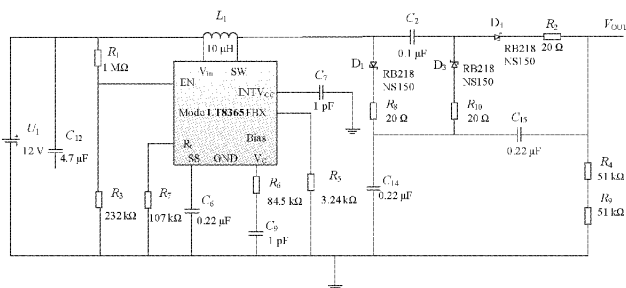


图 5 升压电路原理

波形调制电路将升压电路输出的直流高压调制为幅值可调的方波信号以供驱动射频 MEMS 开关工作。本文采用美国威世(Vishay)公司生产的电力 NMOS 管 IRFPE30 设计波形调制电路,当输入至场效应管的信号为低电平时,场效应管处于截至状态,此时场效应管相当于一个处于断开状态的开关;当输入至场效应管的信号为高电平时,即达到场效应管的导通电压,此时场效应管相当于一个处于导通状态的开关。使用小信号电压方波信号驱动场效应管通断,加上可调功率电阻,则可将直流高压调制为幅值可调的方波信号。

### 2.2 射频 MEMS 开关夹具设计

本文利用电磁波仿真软件建立开关夹具的模型,夹具为 4 层板,镀层材料为铜,由上到下 3 层板材分别为厚度为 0.254 mm 的 Rogers RO4350B 高频板和厚度分别为 0.4 和 0.204 mm 的 FR4 环氧玻璃纤维板。开关夹具示意图如图 6 所示。

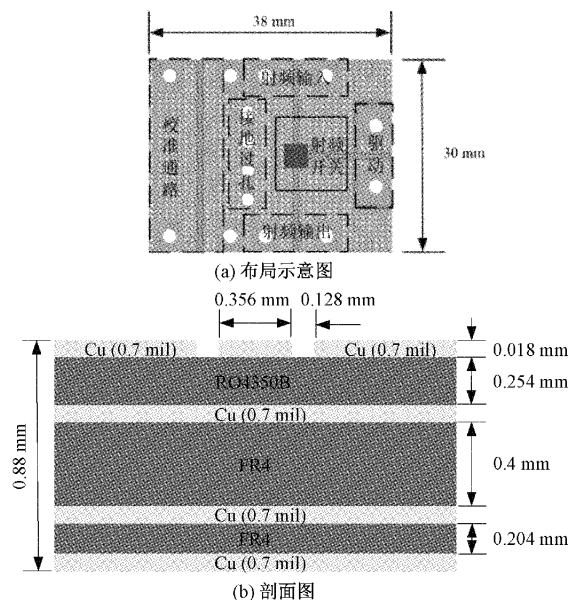
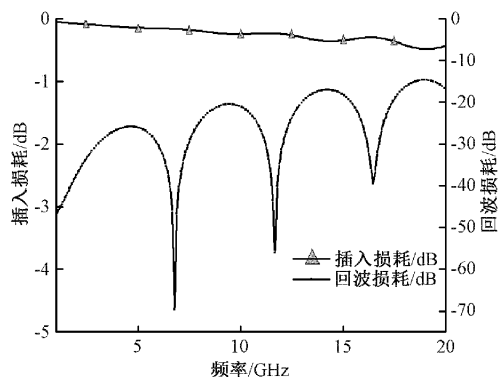


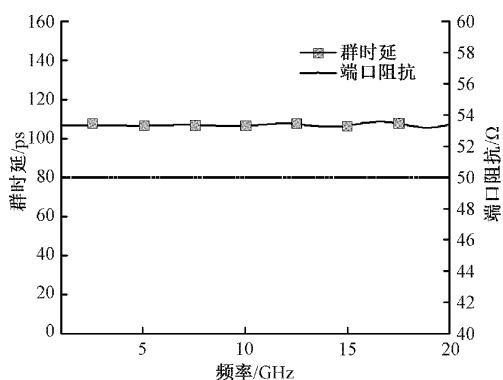
图 6 射频 MEMS 开关夹具示意图

仿真设置如下:求解模式为模型求解(driven modal);频率范围为 1~20 GHz;扫频方式离散(discrete);端口激励为波端口(wave port);边界条件为理想电导体边界(perfect E)。使用三维电磁仿真软件对夹具的插入损耗、

回波损耗、端口阻抗和群时延进行仿真,仿真结果如图 7 所示。



(a) 插入损耗和回波损耗



(b) 端口阻抗和群时延

图 7 射频 MEMS 开关夹具仿真结果

可以看出,开关夹具在 20 GHz 处:插入损耗为 0.44 dB,回波损耗为 16.89 dB;在 1~20 GHz 的工作频段范围内群时延为 106.9 ps,端口阻抗为 50 Ω;端口特征阻抗 50 Ω 时损耗最小<sup>[17]</sup>。

### 2.3 软件设计

若上位机软件采用 LabVIEW 编写,使用图形化编辑 G 语言编写程序,便于实现面向仪器的编程以及数据采集<sup>[18]</sup>,但是程序可修改性较差。美国国家仪器公司在 LabVIEW 的基础上开发出 LabVIEW RT 软件,在该环境下运行程序能够在指定时间内精准的完成任务,让每一个事件都具备确定性,并且可以长期高效稳定的执行<sup>[19]</sup>。但是文本型编程语言如 C++ 语言亦可实现上述功能,同时使用文本型编程语言编写的程序流畅度高于使用图形化编程语言的程序。

如图 8 所示,为了把一个复杂的任务分成几个小的任务以高效完成测试任务,测试系统由参数设置模块、数据采集模块、数据处理模块、实时显示模块、数据保存模块和测试报告打印模块组成。

### 3 实验结果

为了确保开关时间测试的准确性,首先对调制电路的

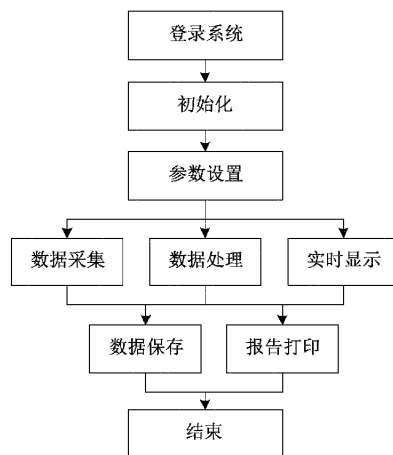


图 8 软件设计框图

响应时间进行了测试。如图 9 所示,场效应管做起开关作用时其响应时间小于 346 ns,故对于开关时间为 ns 级别的射频 MEMS 开关,可以满足测试的要求。



图 9 场效应管响应时间

目前的射频微波器件的使用寿命测试离不开:信号发生器、探针台、电压放大器、示波器、直流稳压源、功率发生器、功率计等大型测试仪器,如图 10(a)与(b)所示。使用诸多体积相对较大的仪器进行测试工作,现场连线繁琐一次、只能测一只器件、测试成本昂贵而且限制测试工作必须在实验室环境下进行。

与之相比,本文设计并实现的小型化测试系统只需一路 220 V 市电输入,搭配一台上位机即可完成测试。在极大节约测试成本的同时不可代替的优点是小型便携且稳定可靠,可以消除测试必须在实验室环境下进行的限制。



(a) 冷寿命测试



(b) 热寿命测试

图 10 冷、热寿命测试现场对比

图 11 为基于 C++ 语言设计的测试系统的软件主界面,可以看到,在该界面下可清晰地实时监测波形,获得开关电压、开关时间和当下工作次数计数值,同时可以保存并导出数据以及打印测试报告。

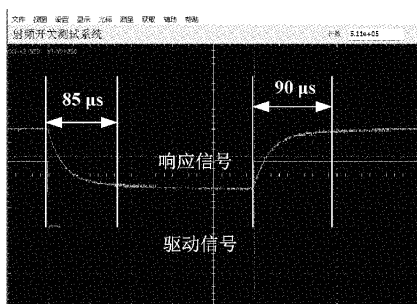
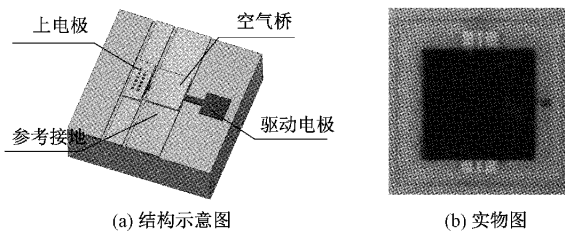


图 11 测试系统软件主界面

图 12 为开关结构示意图与实物图,主要技术指标如表 2 所示。



(a) 结构示意图

(b) 实物图

图 12 被测射频 MEME 开关结构示意图

表 2 射频 MEMS 开关技术指标

参数指标		数值
开关电压		80 V
开关时间	闭合时间	<100 μs
	断开时间	<100 μs
使用寿命		≥10 <sup>8</sup> 次

为了验证测试系统的重复性与可靠性,以及进一步证明该测试系统的实用性和测试工作的准确性,测试了本组设计加工的 5 只单刀单掷射频 RF MEMS 开关,测试数据如表 3 所示。

经由测试系统测试,得到 5 只射频 MEMS 开关的最高开关电压为 80 V,最低开关电压为 75 V;最大闭合时间和断开时间分别 90 和 85 μs,最小闭合时间和断开时间分别 68 和 72 μs;最长冷寿命和热寿命分别为 4.31×10<sup>8</sup> 和

表 3 原始数据记录表

序号	开关电压/ V	开关时间		使用寿命	
		闭合时间/μs	断开时间/μs	冷寿命	热寿命
1	80	90	85	1.56×10 <sup>8</sup>	1.19×10 <sup>8</sup> @0 dBm
2	78	80	74	4.31×10 <sup>8</sup>	2.57×10 <sup>8</sup> @0 dBm
3	75	68	72	3.88×10 <sup>8</sup>	2.33×10 <sup>8</sup> @0 dBm
4	81	70	81	2.69×10 <sup>8</sup>	1.86×10 <sup>8</sup> @0 dBm
5	77	75	73	1.37×10 <sup>8</sup>	1.21×10 <sup>8</sup> @0 dBm

2.57×10<sup>8</sup>@0 dBm,最短冷寿命和热寿命分别为 1.37×10<sup>8</sup> 和 1.19×10<sup>8</sup>@0 dBm,结果表明测试结果与本组射频 MEMS 开关产品指标一致。

#### 4 结 论

本文设计一套小型化的射频 MEMS 开关测试系统,利用该系统对本组研发的射频 MEMS 开关进行了开关电压、开关时间和使用寿命的测试,测试结果与指标一致,验证了本测试系统的准确性和实用性。采用该测试系统可以更便捷、精确地对共面波导型射频 MEMS 开关进行测试和评估,降低了测试系统搭建成本,提高了测试效率,尤为重要是可以摆脱传统测试工作只可在实验室下进行的限制。

#### 参 考 文 献

[1] 何宁红, 马哲旺, 杨雪霞, 等. 基于微带三模谐振器的超宽带带通滤波器设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(5): 148-153.

[2] PETERSON K E. Micromechanical membrane switches on silicon[J]. IBM Journal of Research and Development, 1979, 23(4): 376-385.

[3] LARSON L E, HACKETT R H, MELENDES M A, et al. Micromachined microwave actuator (MIMAC) technology-A new tuning approach for microwave integrated circuits [C]. Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium, 1991, Digest of

- Papers, IEEE 1991,1991.
- [4] REBEIZ G M, PATEL C D, HAN S K, et al. The search for a reliable MEMS switch [J]. Microwave Magazine IEEE, 2013, 14(1): 57-67.
- [5] DANESHMAND M, MANSOUR R R. RF MEMS satellite switch matrices [J]. IEEE Microwave Magazine, 2011, 12(5): 92-109.
- [6] YUECEER M. Emerging technologies for communication satellite payloads [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2012, 50: 27-34.
- [7] KO C H, HO K M J, REBEIZ G M. An electronically-scanned 1.8 ~ 2.1 GHz base-station antenna using packaged high-reliability RF MEMS phase shifters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(2): 979-985.
- [8] VAN CAEKENBERGHE K. RF MEMS on the radar [J]. IEEE Microwave Magazine, 2009, 10(6): 99-116.
- [9] REBEIZ G M, TAN G L, HAYDEN J S. RF MEMS phase shifters: Design and applications [J]. IEEE Microwave Magazine, 2002, 3(2): 72-81.
- [10] 冯亚林, 栗大超, 金翠云, 等. 基于计算机视觉的 MEMS 测试系统 [J]. 微纳电子技术, 2003, 40(7): 221-224.
- [11] 王岚, 施建锋, 彭霄. SAW 滤波器自动测试系统设计 [J]. 压电与声光, 2019, 41(6): 779-781.
- [12] 王帅, 钟世昌, 陈悦. GaN 大功率 Quasi-MMIC 在片测试系统的研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(6): 82-83.
- [13] EBEL J L, HYMAN D J, NEWMAN H S. RF MEMS testing-beyond the S-parameters [J]. IEEE Microwave Magazine, 2007, 8(6): 76-88.
- [14] 刘雷. 接触式 RF-MEMS 开关测试与实验研究 [D]. 北京:清华大学, 2013.
- [15] SIMEU E, MIR S, KHEREDDINE R, et al. Envelope detection based transition time supervision for online testing of RF MEMS switches [C]. Proceedings IOLTS 2007, 13th IEEE International On-Line Testing Symposium, 2011.
- [16] 龚著浩. 功率型多触点 RF MEMS 开关研究 [D]. 北京:清华大学, 2018.
- [17] 王耀利, 张凯旗, 张翀, 等. 一种低损耗射频 MEMS 器件测试夹具设计研究 [J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(9): 106-110.
- [18] 徐天琪, 杜磊, 张殿龙. 基于虚拟仪器技术的 77 GHz 毫米波雷达目标运动参数模拟校准装置 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 118-125.
- [19] 史丽娟, 王斯博, 赵剑, 等. 基于 LVRT 系统的动物行为学实验系统 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 137-145.

#### 作者简介

史泽民, 硕士, 主要研究方向为射频 MEMS 设计、加工及测试。

E-mail: 15733169620@163.com

吴倩楠(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为射频微机电器件、电磁超材料。

E-mail: qiannanwoo@nuc.edu.cn