

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.01.03

# 国外MEMS计量测试技术研究现状及借鉴

李雷, 张慧, 沙长涛, 张红

(中国电子技术标准化研究院, 北京 100176)

**摘要:** 随着体积小、精度高、智能化的MEMS器件得到越来越多的应用, MEMS计量测试技术的研究越来越重要。为了进一步提高和完善我国MEMS计量测试技术, 介绍了国外多个机构和组织的MEMS计量规划和技术现状, 梳理了先进的MEMS计量测试技术研究工作, 指明了在哪些方面需要借鉴国外先进的研究经验和成果。可以帮助国内研究者了解国内外MEMS计量测试技术研究现状, 进而促进我国MEMS计量测试技术的发展。

**关键词:** 计量学; 微机电系统; 测试; 标准

**中图分类号:** TB92; TP21

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2022)01-0018-08

## Research status and experience of overseas MEMS metrology and testing technology

LI Lei, ZHANG Hui, SHA Changtao, ZHANG Hong

(China Electronics Standardization Institute, Beijing 100176)

**Abstract:** With the increasing application of small-sized, high precision and intelligent MEMS devices, the research on MEMS metrology and testing technology is becoming more and more important. In order to improve China's MEMS metrology and testing technology, the MEMS metrology plans and technical status of some overseas institutions and organizations are introduced, the research works on advanced MEMS metrology and testing technology are reviewed, and the aspects in which China needs to learn from overseas research experiences and achievements are pointed out. This can help domestic researchers to understand the research status of MEMS metrology and testing technology in other countries, so as to promote the development of MEMS metrology and testing technology in China.

**Key words:** metrology; MEMS; test; standard

## 0 引言

微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)发展于二十世纪九十年代, 是在微电子制造技术发展的基础上随着精密微型机械制造技术的发展而成长起来的。基于MEMS技术的器件具有体积小、精度高、智能化、成本低和可批量生产等特点, 在航空航天、生物医学、汽车、电子等众多领域的应用日渐广泛和深入。MEMS技术作为

一项重要的军民两用技术, 是二十一世纪最有发展前景的技术之一<sup>[1-3]</sup>。

经过二十年的发展, 相较于集成电路(Integrated Circuit, IC)产业, MEMS产业依旧不太成熟。不同于IC产业, MEMS产品跨越机械、电磁、光学、化学、生物等多个领域, MEMS的计量测试研究工作不能仅仅在原有IC计量研究上做简单的改进, 需要综合电子、机械、材料、信息、物理、化学、光学以及生物医学等多个学科与技术, 根

收稿日期: 2021-09-14; 修回日期: 2022-01-12

引用格式: 李雷, 张慧, 沙长涛, 等. 国外MEMS计量测试技术研究现状及借鉴[J]. 计测技术, 2022, 42(1): 18-25.

Citation: LI L, ZHANG H, SHA C T, et al. Research status and experience of overseas MEMS metrology and testing technology[J]. Metrology & measurement technology, 2022, 42(1): 18-25.



据 MEMS 自身的特点开展 MEMS 计量测试技术研究。

近年来, 世界各国加强了对 MEMS 计量测试技术的研究, 适用于 MEMS 的计量测试方法和仪器不断涌现。学习和借鉴国外的 MEMS 计量测试技术, 对我国 MEMS 计量测试技术的发展具有重要的指引作用。

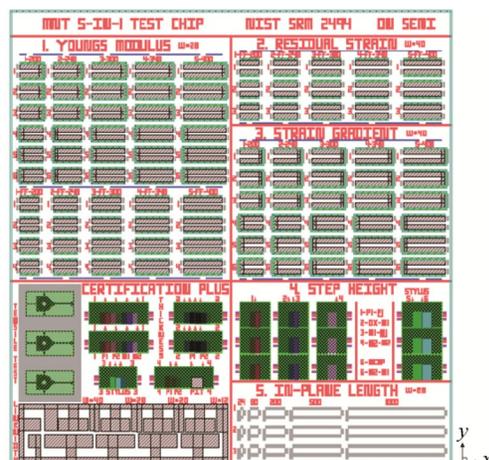
## 1 国外 MEMS 计量测试研究机构及技术现状

### 1.1 美国国家标准与技术研究院

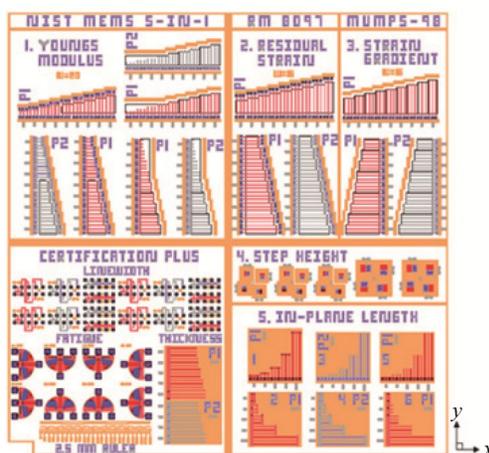
美国国家标准与技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 专门设置了微机电系统 (MEMS) 和纳机电系统 (Nano-Electro-mechanical System, NEMS) 项目, 旨在推进 MEMS/NEMS 测量技术的创新, 以支持未来 MEMS/NEMS 的发展。其主要从以下几个方面开展工作: 开发用于 MEMS/NEMS 的高级测量工具和方法; 使用这些工具和方法研究 MEMS/NEMS 器件的物理特性, 尤其是传感器的性能限制; 开发可追溯的 MEMS/NEMS 传感器, 用于 NIST 及更高级别的精密测量; 领导制定 MEMS/NEMS 计量标准。

2009 年, NIST 发布的 NISTIR (National Institute of Standards and Technology Interagency Report) 7604 《半导体微电子和纳电子计划》在“器件结构设计和表征”中, 将 MEMS/NEMS 计量作为一个章节进行阐述。在该节中主要阐述了 NIST 开发测试结构、测试方法和标准样片来表征 MEMS/NEMS 的制造工艺过程, 有四个重大标准项目: ①开发 MEMS 五合一标准样片 RM8096 和 RM8097<sup>[4]</sup>, 如图 1 所示, 包括杨氏模量 (Youngs Modulus)、残余应力 (Residual Strain)、应变梯度 (Strain Gradient)、台阶高度 (Step Height)、面内长度 (In-Plane Length); ②开发 SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International) 标准 MS5-0813、晶圆键合强度的微人字形测试结构的测试方法和利用标准测试方法开发微人字形标准物质; ③微流量系统的尺寸计量; ④引导标准化工作的尖端机器人技术的研究和开发。

由于 MEMS 领域涉及范围广, NIST 研究的领域主要有: MEMS/NEMS 的运动测量、微型和纳米光子传感器、用于传感和定时的射频 MEMS/NEMS、生物 MEMS 和微流体、光学和电子生物传感、晶圆键合计量。



(a) RM8096



(b) RM8097

图1 MEMS 五合一标准样片

Fig.1 MEMS 5-in-1 standard reference materials

### 1.2 欧洲国家计量机构协会

2007 年, 在欧盟第七框架计划经费的支持下, 欧洲国家计量机构协会 (The European Association Of National Metrology Institutes, EURAMET) 开启了欧洲计量联合研究计划 (European Metrology Research Programme, EMRP)<sup>[5-6]</sup>。在 2011 年新技术项目中, 由英国国家物理实验室 (National Physical Laboratory, NPL) 主持的项目《Metrology with/for NEMS》(简称: MetNEMS) 针对 MEMS/NEMS 计量开展了相关的研究工作。

MetNEMS 项目的首要目标是在几个欧洲计量院中开发关键技术, 以满足 NEMS 开发的需求。该项目开发了针对计量和工业应用的新型、高频、高性能 NEMS 谐振器和执行器, 解决了“超越经典计量”、纳米技术、超低损耗新材料和单个实体计量等问题, 反过来也促进了生物、安全、电信和

传感领域等可追溯测量要求的提出。为纳米尺度的质量、力、位移和温度传感，单光子、单分子测量提供了改进的超灵敏、可追溯计量测试技术，促进了片上、超稳定的小型化电压基准的生产。

该项目还广泛研究了一系列新材料，如石墨烯（一种具有广泛前景的独特新2D材料）、氮化铝（一种特别适用于薄膜器件开发以及计量应用的新型压电材料）和二硼化镁（高温常规超导体）等，来开展NEMS的优化使用，开发高性能NEMS谐振器。同时，该项目开发了新的微波激发和检测方案，以及纳入纳米级计量的光学干涉方法，用于NEMS谐振器激发和读出，用这些NEMS谐振

器来开展可追踪的电磁测量和高精度测量等计量工作。

MetNEMS项目实现了五个具体目标如下：

①优化用于高性能NEMS的新材料；②NEMS谐振器激发和读出的新方法；③可追溯电磁计量和精密测量的NEMS；④NEMS传感器：使测量打破经典热力学的极限；⑤制作和优化SQUID（低温超导量子干涉装置）-NEMS组合，使NEMS谐振器的操作接近热平衡量子极限。

此外，MetNEMS联盟整理了项目开展期间的联盟合作伙伴的投入以及行业/学术界反馈，制定了2015版MEMS/NEMS计量路线图，如图2所示。

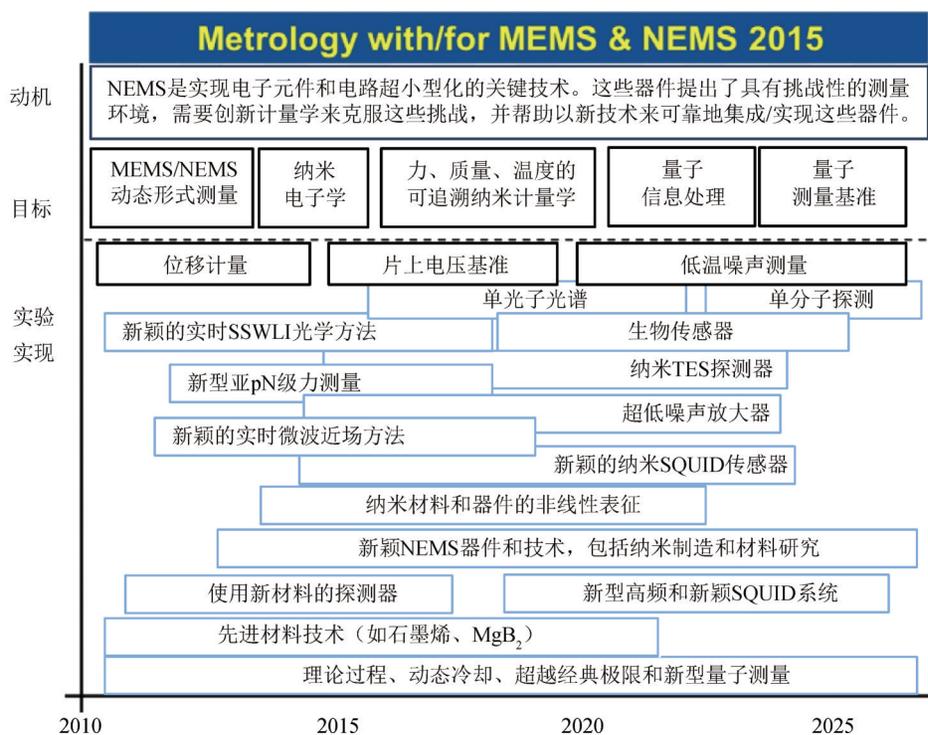


图2 2015版MEMS/NEMS计量路线图

Fig.2 2015 metrology roadmap with/for MEMS&NEMS

### 1.3 英国国家物理实验室

2006年12月，NPL发布了《MEMS传感器及其制造的计量要求概述》，该项目是DTI国家测量系统工程测量计划2005~2008年“先进传感器计量”资助项目的一部分，主要关注MEMS行业和当前计量的局限性。

该项目研究了当前的MEMS制造和计量测试技术，评估了MEMS行业的计量要求，并重点介绍计量学如何影响某些关键类型的MEMS传感器（压力传感器、加速度计、陀螺仪、射频传感器和微流

体）。评估的计量测试技术包括轮廓测定法、微坐标测量机、电子显微镜、光学显微镜、白光干涉测量法和激光多普勒测速仪等。重点关注了MEMS的尺寸测量（包括静态和动态测量），通过测量结构尺寸和尺寸变化来进行相应的应力和应变测量。

同时，该项目还与英国主要公司，包括AML, BAE Systems, Epigem, ETB, GE Sensing, MEMS-STAR, QinetiQ, CMF, STS, Tecan等，对MEMS的计量需求进行讨论，总结归纳了英国MEMS行业的计量要求：包括晶圆厚度/平整度、高深高比测

量、侧壁粗糙度、振动测量、残余压力、测量远距离的小特征、微尺度材料表征、高空间分辨率温度测量、硅断裂分析、测量抗粘连薄膜的磨损/硬度、无创压力测量等。

该项目和其他NPL正在进行的MEMS测量和表征工作一起，将有助于确保英国MEMS传感器行业克服当前制造阶段的一些计量问题，保持英国在全球MEMS传感器市场的份额。

#### 1.4 国际半导体技术发展路线图

50多年来，半导体行业一直按照摩尔定律的步伐前进，这一趋势使得投资需求不断增长，进而促进了相关工业联盟、研发机构、协会和其他形式合作的诞生。为了指导这些项目研发，1998年，由美国半导体工业协会提议，邀请了欧洲、日本、韩国和台湾等国家和地区共同参与，对美国国家半导体技术发展路线图进行了更新，最终形成了1999年的第一版国际半导体技术发展路线图（The International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS）。

2010年，ITRS成立了MEMS技术工作组（MEMS Technology Working Group, MEMS TWG），并于2011年发布了第一版ITRS路线图——《MEMS》，包括加速度计、陀螺仪、惯性测量单元、麦克风、射频MEMS谐振器、电流开关和变容二极管。2014年4月，ITRS委员会宣布重组ITRS路线图，将其转变为ITRS2.0，以更好地满足行业需求。2015年发布的ITRS2.0版中，MEMS TWG重点支持《Heterogeneous - Components》（异构组件）。

随着MEMS功能和性能的提升，测试成本持续上升，但系统集成商期望异构组件的价格保持不变或更低，这与预期相反。因为MEMS添加更多功能和提高性能需要额外的、更高精度的测试，还需要标准测试协议来定义器件的性能参数。目前因缺乏标准化导致系统集成商无法权衡制造商之间的成本和性能。在ITRS 2.0的“异构组件”中，针对MEMS的测试和标准的需求，MEMS和传感器行业组建立了标准部门来满足这一需求，专注开发设备参数性能术语和设备性能测试协议，还通过扩展当前的内置集成电路（Inter-Integrated Circuit, I<sup>2</sup>C）通信协议来开发设备通信的新标准。

#### 1.5 国际电工技术委员会

国际电工技术委员会（International Electrotechnical Commission, IEC）非常重视MEMS标准化工作，将MEMS器件的标准归口在半导体器件委员会（Technical Committee 47, TC47）下。2008年从IEC/TC47中独立出来一个新的MEMS分技术委员会—Sub-Technical Committee 47F，简称SC47F，负责制定MEMS器件标准<sup>[7]</sup>。

该分技术委员会负责制定MEMS的设计、制造、使用过程对环境无害的国际标准，包括术语和定义、字母符号、基本额定值和特性、测量方法、可靠性试验方法和材料测试方法等。下设三个工作组：术语和图形符号工作组、结构材料性能测试方法工作组、器件和封装工作组，还设有一个维护组。目前，该技术委员会已发布38项MEMS标准，内容涵盖了MEMS的术语和定义、通用规范、材料性能评价及测试方法等。已发布的标准见表1。

#### 1.6 半导体工艺和设备技术委员会

半导体工艺和设备技术委员会（Semiconductor Equipment and Materials International, SEMI）创立于1970年，是服务于微电子和纳电子行业制造供应链的全球高科技领域专业行业协会。自20世纪90年代后期以来，SEMI一直致力于开发用于制造MEMS器件材料的标准测试方法，包括应变、膜厚度、弹性模量和粘合强度的测量。SEMI设立了MEMS/NEMS全球技术委员会来从事MEMS标准的制定。目前在SEMI的标准中，有10项关于MEMS器件的标准，包括MEMS技术术语、封装和微流量器件等。由于SEMI在半导体设备材料方面具有强大的影响力，其标准多作为业内主流的生产工艺规范，被广泛应用在MEMS工艺线上指导产品的生产，标准目录见表2。

#### 1.7 美国国家航空航天局

美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）火箭发射中心针对MEMS可靠性问题发布了JPLPUB 99-1《宇航用MEMS可靠性保证指南》，该指南详细介绍了与MEMS相关的材料属性、故障机理、生产工艺技术、器件组织结构以及封装技术，并站在用户的角度提出了用于空间环境的MEMS器件质量和可靠性的评价方法，解决了空间环境应用的

表1 IEC已经发布的MEMS标准清单  
Tab.1 List of MEMS standards published by IEC

序号	标准号及标准名称
1	IEC 62047-1 术语和定义
2	IEC 62047-2 薄膜材料张力测试方法
3	IEC 62047-3 用于张力测试的薄膜标准测试样片
4	IEC 62047-4 MEMS通用规范
5	IEC 62047-5 RF MEMS开关
6	IEC 62047-6 薄膜材料轴向疲劳测试方法
7	IEC 62047-7 用于射频控制和选择的MEMSBAW滤波器和双工器
8	IEC 62047-8 薄膜张力特性测量的剥离弯曲试验方法
9	IEC 62047-9 MEMS芯片至芯片的键合强度测量
10	IEC 62047-10 MEMS材料微台柱抗压测试
11	IEC 62047-11 MEMS无支撑物时材料线性热膨胀系数测试方法
12	IEC 62047-12 采用MEMS结构谐振振动法的薄膜材料挠曲疲劳测试方法
13	IEC 62047-13 测量MEMS结构粘结强度的弯—剪式试验方法
14	IEC 62047-14 金属薄膜材料形成极限测量方法
15	IEC 62047-15 PDMS和玻璃间的粘结强度试验方法
16	IEC 62047-16 确定MEMS薄膜残余应力的试验方法之圆片曲率和悬臂梁挠度方法
17	IEC 62047-17 用于测量薄膜机械特性的膨胀试验方法
18	IEC 62047-18 薄膜材料弯曲测试方法
19	IEC 62047-19 电子罗盘
20	IEC 62047-20 陀螺仪
21	IEC 62047-21 薄膜MEMS材料波松比试验方法
22	IEC 62047-22 柔性结构上的传导薄膜机电拉伸试验方法
23	IEC 62047-25 硅基MEMS制造工艺-微粘结区域的剪切和拉按强度测量方法
24	IEC 62047-26 微沟道和针的描述与测量方法
25	IEC 62047-27 使用微雪伏龙测试(Micro-Chevron Test)玻璃粉粘结结构的强度试验
26	IEC 62047-28 振动驱动MEMS驻极体能量采集装置的性能测试方法
27	IEC 62047-29 在室温下独立导电薄膜的机电松弛试验方法
28	IEC 62047-30 MEMS压电薄膜机电转换特性的测量方法
29	IEC 62047-31 层状MEMS材料界面粘附能的四点弯曲试验方法
30	IEC 62047-32 MEMS谐振器的非线性振动试验方法
31	IEC 62047-33 MEMS压阻式压敏元件
32	IEC 62047-34 晶圆级MEMS压阻式压敏元件的测试方法
33	IEC 62047-35 柔性或可折叠机电装置抗弯曲变形的抗破坏坚固性的标准试验程序
34	IEC 62047-36 MEMS压电薄膜的环境和电介质耐受试验方法
35	IEC 62047-37 用于传感器的MEMS压电薄膜的环境试验方法
36	IEC 62047-38 MEMS互连中金属粉末膏粘附强度的测试方法
37	IEC 62047-40 MEMS惯性冲击开关阈值的试验方法
38	IEC 62047-41 RF MEMS环行器和隔离器

MEMS器件标准质量评价问题。《宇航用MEMS可靠性保证指南》推荐的合格评定方法如图3所示。

### 1.8 美国桑迪亚国家实验室

美国桑迪亚国家实验室(Sandia National Laboratories, SNL)在美国国防高级研究计划局

(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)支持下,详细研究了MEMS的可靠性问题,并发布了《MEMS可靠性:基本单元、测试结构、试验和失效模式》。该报告以失效分析为基础,建立MEMS的合格评定模式,如图4所示。同时,该报告阐述了在MEMS器件上开发测试结

表2 SEMI制定的MEMS标准清单

Tab.2 List of MEMS standards established by SEMI

序号	标准号及标准名称
1	SEMI MS1-0812 确定芯片—芯片粘结对准点目标的指南
2	SEMI MS2-1113 薄膜台阶高度测量试验方法
3	SEMI MS3-0307 MEMS技术术语
4	SEMI MS4-1113 基于梁的共振频率的薄反射膜杨氏模量测量标准试验方法
5	SEMI MS5-0813 使用微雪伏龙测试结构的芯片粘结强度测量试验方法
6	SEMI MS6-0308 微流控系统接口设计和材料指南
7	SEMI MS7-0708 电子器件微流控接口封装规范
8	SEMI MS8-0309 MEMS封装密封性评估指南
9	SEMI MS9-0611 微流控器件间高密度永久连接规范
10	SEMI MS10-0912 MEMS封装材料流体透过测量试验方法

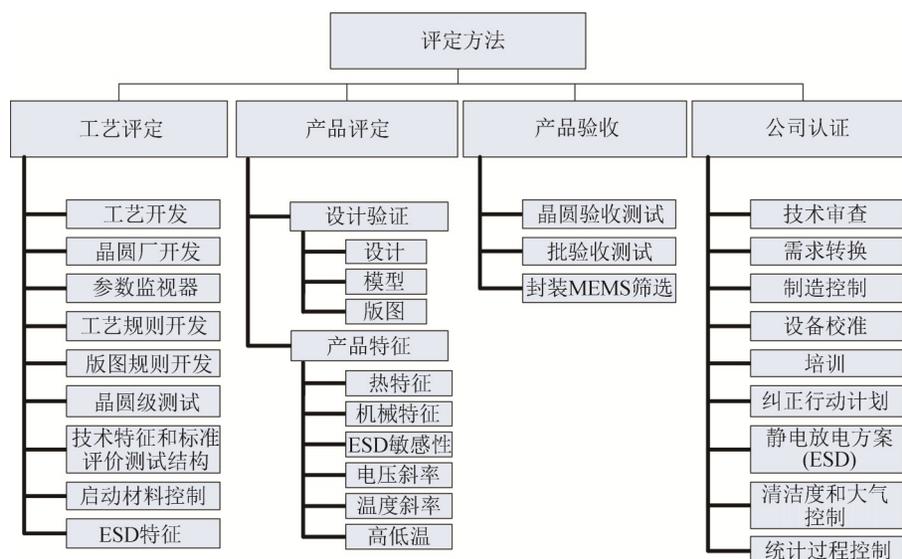


图3 《宇航用MEMS可靠性保证指南》推荐的合格评定方法

Fig.3 Recommended conformity assessment methods in "MEMS Reliability Assurance Guidelines for Space Application"

构进行可靠性试验的重要性，并设计、表征了可靠性测试结构。此外，该报告还研究了MEMS器件的失效模式，特别是在不同环境（湿度、温度、冲击、振动和储存）中的失效模式，建立了未来MEMS器件的可靠性设计规则。

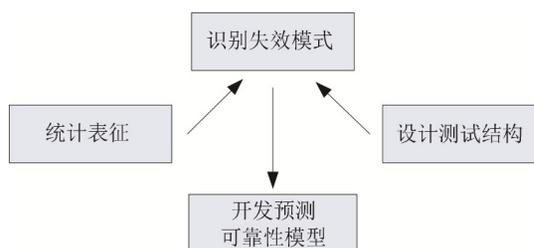


图4 基于失效分析的合格评定模式

Fig.4 Conformity assessment model based on failure analysis

## 2 我国MEMS计量测试的参考借鉴

### 2.1 计量测试规划方面

我国必须遵守IEC国际标准、SEMI标准等，目前，我国MEMS计量测试在发展规划方面可以从以下几个方面参考借鉴国外MEMS计量测试技术：

1) 国际计量组织和机构花费大量精力专注于MEMS计量测试技术研究，相应的资料可以为我们的参考借鉴；

2) 借鉴国外MEMS计量测试技术，结合我国MEMS计量测试建设的具体情况，加强MEMS计量测试技术的技术发展规划布局；

3) 参考EURAMET的“2015版MEMS/NEMS

计量路线图”，研究制定我国的“MEMS/NEMS 计量路线图”，建立适应我国 MEMS 计量测试技术发展的“MEMS 计量体系表”；

4) 结合我国现在快速发展的 MEMS 产业需求，对未来二十年内 MEMS 产品需要的微材料特性测量方法、微结构测量方法、标准物质等方面做出全面、详细的规划；

5) 结合国内 MEMS 产业现状和发展要求，制定一批具有指导意义的产品规范、测试方法和计量规范，有力支撑我国 MEMS 产业的发展。

## 2.2 计量测试技术方面

MEMS 计量测试技术的重点工作是跟踪国际 MEMS 计量测试技术的前沿动态，同时结合我国成熟的 MEMS 产品，及时对 MEMS 器件测试方法、规范进行修订，建立完善的 MEMS 器件计量测试技术体系。

在 MEMS 器件参数测试方面，借鉴 IEC, SEMI 等标准，研究 MEMS 器件微材料特性、微结构（微器件）特性的测量方法<sup>[8-9]</sup>，结合我国主导制定的 IEC62047-25, IEC62047-41 等，研究适用于 MEMS 器件的具体测量方法，分析微材料特性、微结构参数变化对 MEMS 器件性能和质量可靠性的影响，为 MEMS 器件产品质量评定标准、失效分析标准以及制造过程质量保证方法提供基础<sup>[10-11]</sup>。

在 MEMS 器件可靠性和寿命评价方面，借鉴 NASA, SNL 指南要求，研究基于失效分析的质量保证方法，开展 MEMS 器件失效机理研究，建立失效模型，研究动态环境（振动、冲击、高低温）下带电工作的 MEMS 器件实时性能测试方法，开展 MEMS 器件加速寿命试验方法研究等方面的寿命评价。

在 MEMS 器件晶圆级测试方面，借鉴 NIST 的五合一标准样片，尽快制定 MEMS 器件晶圆级的测试标准及纲要，尽快推进标准化进程。引导行业内部开发统一接口，统一测试方法，搭建通用 MEMS 器件晶圆级测试平台，完善模块化的标准测试平台手段，研制符合不同激励信号测试的标准物质，提升我国 MEMS 器件晶圆级测试的整体水平。

## 2.3 计量测试协同方面

MEMS 技术有许多共有特点，在进行军用 MEMS 计量测试技术研发的同时，也要积极促进相

关民用领域 MEMS 计量测试技术的进步，共同推进我国的 MEMS 计量测试技术的发展。在整个 MEMS 行业内充分发挥计量测试技术的基础作用，加快技术到应用的进程、缩短产品周期、提升产品质量、降低设计、生产等各个环节的成本，进而打破一些行业壁垒、提升产业生态环境、促进上下游协同创新，推动整个产业的健康发展。

借鉴 NIST, NPL 等计量机构的先进成果，积极推进我国 MEMS 计量测试技术研究，加强军工部门与高校、科研院所、民间计量机构的合作，推进 MEMS 计量基础技术的研究开发工作，同时加强产学研三方合力，共同推进 MEMS 计量测试技术的发展。

## 3 结论

MEMS 技术在国民生产和国防军工中的使用日益广泛，然而，MEMS 的计量测试技术仍然停留在后端测量，不能深入到 MEMS 器件的设计与生产环节，制约了其进一步发展。随着 MEMS 技术的使用，本文在跟踪和研究国外 MEMS 计量测试技术的基础上，探索新时期我国 MEMS 计量测试需求，提出我国 MEMS 计量测试技术发展建议，对提升我国 MEMS 计量测试技术具有广泛的借鉴作用。

### 参考文献

- [1] 张捍驰. 微电子机械系统(MEMS)及其在军事领域的应用研究[J]. 军民两用技术与产品, 2017, (20):80.  
ZHANG H C. MEMS and its application researches in the military field [J]. Dual use technologies & products, 2017, (20):80. (in Chinese)
- [2] 方震华, 黄慧锋. 微电子机械系统(MEMS)技术在军用设备中的应用现状[J]. 电子机械工程, 2010, 26(4): 1-4, 13.  
FANG Z H, HUANG H F. Application of MEMS technology in military-purpose equipment [J]. Electro-mechanical engineering, 2010, 26(4): 1-4, 13. (in Chinese)
- [3] 卞玉民, 胡英杰, 李博, 等. MEMS 惯性传感器现状与发展趋势[J]. 计测技术, 2019, 39(4): 50-56.  
BIAN Y M, HU Y J, LI B, et al. Research status and development trend of mems inertial sensor [J] Metrology & measurement technology, 2019, 39(4): 50-56. (in Chinese)
- [4] 乔玉娥, 刘岩, 程晓辉, 等. MEMS 晶圆级测试系统现状及未来展望[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(10): 1-3, 7.

- QIAO Y E, LIU Y, CHENG X H, et al. Present situation and future prospect of MEMS wafer level test system [J]. *Transducer and microsystem technologies*, 2016, 35(10): 1-3, 7. (in Chinese)
- [5] 蔡娟. 欧洲计量联合研究计划(EMRP)的发展与启示[J]. *中国计量*, 2011, (9): 52-55.
- CAI J. The development and enlightenment of EMRP[J]. *China metrology*, 2011(9): 52-55. (in Chinese)
- [6] 蔡娟. 从欧洲计量联合研究计划(EMRP)看计量前沿科技的发展[J]. *计量技术*, 2012, (12): 65-67.
- CAI J. Viewing the development of cutting-edge technology in metrology from the perspective of EMRP[J]. *Metrology technology*, 2012, (12): 65-67. (in Chinese)
- [7] 陈勤, 范树新, 张维波. MEMS传感器的标准化现状与发展对策[J]. *传感器与微系统*, 2007, 26(8): 3.
- CHEN Q, FAN S X, ZHANG W B. Status and countermeasure of MEMS sensors standardization [J]. *Transducer and microsystem technologies*, 2007, 26(8): 3. (in Chinese)
- [8] 国家质量监督检验检疫总局. 微机电系统(MEMS)技术微机械量评定总则: GB/T 26112-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- State Administration for Market Regulation. Micro-electromechanical system technology general rules for the assessment of micro-mechanical parameters: GB/T 26112-2010[S]. Beijing: China Standard Press, 2010. (in Chinese)
- [9] 国家质量监督检验检疫总局. 微机电系统(MEMS)技术微几何量评定总则: GB/T 26113-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- State Administration for Market Regulation. Micro-electromechanical system technology general rules for the assessment of micro-geometrical parameters: GB/T 26113-2010[S]. Beijing: China Standard Press, 2010. (in Chinese)
- [10] 陈勤, 曹赞, 李艳梅. MEMS传感器标准质量评定方法探讨[J]. *信息技术与标准化*, 2010(6): 3.
- CHEN Q, CAO Z, LI Y M. Research on the quality evaluation method of mems sensor[J]. *Information technology & standardization*, 2010(6): 3. (in Chinese)
- [11] 陈晓辉. MEMS微结构功能特征分析、评定关键技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- CHEN X H. Research on the major problems of the analysis and evaluation of functional characteristics of microstructures of MEMS [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)

(本文编辑: 郑燕)