

T/CIS 25001-XXXX 《智能微系统测试流程总则》编制说明

（征求意见稿）

一、工作简况

1、任务来源

本项目根据中国仪器仪表学会“（智能微系统测试流程总则）标准制定工作组成立的通知”（仪学秘字【2025】060号文），项目编号 T/CIS 25001-XXXX，项目名称“智能微系统测试流程总则”进行制定。主要起草单位：启元实验室、清华大学等，计划完成时间 2026 年。

2、制定背景

智能微系统是指集传感、处理、执行、通信等功能于一体，具备微型化、集成化、智能化特征的复杂系统。其核心在于通过微纳制造技术将硬件（如传感器、执行器、电路）与软件（如算法、控制系统）深度融合，实现自主感知、分析决策和精准操作的能力。例如，MEMS（微机电系统）是智能微系统的最重要的组件之一，智能微系统是 MEMS 技术向多功能、多学科交叉方向的演进形态。

智能微系统的测试技术近年来发展迅速，从单一物理量（如压力、温度）测试向多物理场耦合（如光-机-电-热联合测试）方向快速发展，测试设备也日益专业化，高精度探针台、纳米级运动平台、片上测试等专用工具逐渐普及。然而，不同行业（如医疗、军工、消费电子）对测试标准和可靠性的需求差异显著，导致测试要求多样化。

目前，国际上的一些标准组织（包括 ISO、IEC、IEEE、ASTM 等）针对智能微系统测试领域等制定了一些相关标准，但标准多局限于组件级性能验证或单点测试环节的局部性要求，尚未构建覆盖系统全生命周期、贯通多层次测试要素的测试体系。国内有关智能微系统测试的要求也零散分散在电子、传感器和医疗等应用领域的产品标准中，尚未形成专门针对智能微系统测试的统一标准体系和统一的测试标准化流程，导致产品质量参差不齐、测试成本高、效率低，阻碍了技术交流和产品推广。制定涵盖测试对象、测试指标、测试设备、测试标准等内容的通用测试流程规范，是智能微系统产业发展的必然要求，需要产学研用各方共同

努力，为行业的持续发展奠定基础。

3、主要编制过程

3.1 立项及起草

2025 年 3 月，考虑到智能微系统测试流程在智能微系统领域的重要作用及当前相关标准空白的现实，启元实验室向中国仪器仪表学会标准化工作委员会（SCIS）提出团体标准立项申请。SCIS 在经过专家论证及秘书处初审后进行立项公示。2025 年 7 月，SCIS 秘书处发出“（智能微系统测试流程总则）标准制定工作组成立的通知”（仪学秘字【2025】060 号），该标准项目正式立项。该项目标准制定工作组（以下简称工作组）由启元实验室牵头，清华大学、国防科技大学、中科院空天信息创新研究院、西安交通大学、中电科思仪科技股份有限公司、中国航天科技集团公司九院 704 所、中机生产力促进中心有限公司、赛莱克斯微系统科技（北京）有限公司、汉威科技集团等单位组成。

该标准项目正式立项后，工作组立即开展标准的研制工作。工作组通过走访调研及资料查阅工作，深入了解了当前国内关于智能微系统测试流程的需求，并着手开展标准文本的编制工作。期间工作组对标准文本的条款及表述进行了反复的沟通和论证。2026 年 4 月，工作组确定最终的标准初稿并提交 SCIS 秘书处。

2026 年 4 月 20 日，由 SCIS 主办，在中国仪器仪表学会第一会议室召开了本项目的工作组成立暨标准初稿讨论会，共有近 20 名工作组成员单位代表参加了本次会议。与会工作组成员就本标准的框架和内容进行了逐字逐句的研讨，确定了修改的重点和后续标准推进工作进度及规划。会后，工作组组长单位根据工作组成员的意见对文本和编制说明进行了认真修改，并于 2026 年 6 月形成标准征求意见稿提交 SCIS 秘书处。

4、主要参加单位和工作组成员及其所做的工作等

本标准由启元实验室牵头，清华大学、国防科技大学、中科院空天信息创新研究院、西安交通大学、中电科思仪科技股份有限公司、中国航天科技集团公司九院 704 所、中机生产力促进中心有限公司、赛莱克斯微系统科技（北京）有限公司、汉威科技集团等单位共同参与起草。各成员单位分工详见表 1。

表 1 参加单位及分工

序号	单位名称	主要工作内容
----	------	--------

1	启元实验室	组织工作组和设备性能测试工作，包括召开标准制定启动会和工作会，对性能指标进行试验，提出设备电磁环境及安全等性能要求并进行测试；性能指标、试验方法的确定。
2	清华大学	标准的总体框架设计和性能指标、试验方法的确定。
3	国防科技大学	应用场景指导与建议。
4	中科院空天信息创新研究院	标准验证和提供意见建议。
5	西安交通大学	标准验证和提供意见建议。
6	中电科思仪科技股份有限公司	标准验证和提供意见建议。
7	中国航天科技集团公司九院704所	标准验证和提供意见建议。
8	中机生产力促进中心有限公司	标准验证和提供意见建议。
9	赛莱克斯微系统科技（北京）有限公司	标准验证和提供意见建议。
10	汉威科技集团	标准验证和提供意见建议。

二、标准编制原则和主要内容

（一）编制原则

本标准格式依据 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》等要求进行编制。以规范性、科学性、先进性、实用性、可靠性、标准化、安全至上为原则。在确保高质量安全的前提下，本标准注重先进技术与资源节约的统一：鼓励采用多种等效的测试设备和方法，避免对特定设备的排他性要求；通过允许采用抽样测试的策略，有效减少不必要的测试样品消耗和能源开支，降低研发与制造成本。本标准内容全面，覆盖了从晶圆级到系统级全流程的测试项目，每个测试模块均给出“概述—测试要求—结果判据”的完整结构；规定具体，测试项目、测试对象、测试设备、测试方法均以表格形式明确列出，判据给出量化的宜值；语言通俗，条款表述采用标准化的助动词，易于不同背景的使用者理解和实施。

（1）规范性

规范性是标准编制的核心要求，强调严格遵循国家法律法规及标准化体系框架。标准的结构需按 GB/T 1.1-2020 规定的层次编排（如封面、前言、范围、术语等），条款表述采用“应”“不应”等规范措辞，避免模糊性语言。技术内容需引用现行有效的标准文件，确保与上下游标准协调一致。例如，术语定义需优先采用 GB/T 20001《标准编写规则》中的表述，计量单位必须使用法定计量单位。

通过统一的格式和逻辑性条款设计，保证标准在发布、实施和监督过程中无歧义，便于跨行业、跨地区推广。

（2）科学性

科学性要求标准内容基于充分的技术验证和客观数据支撑。编制过程中需系统分析国内外技术现状，通过实验、统计或案例研究确定技术参数的合理性。标准条款需体现技术逻辑的严谨性，如优先采用 ISO、IEC 等国际标准中的成熟方法。同时，需建立动态修订机制，根据新技术发展及时更新内容，避免因技术滞后影响标准效力。

（3）先进性

先进性强调标准需适度超前于当前技术水平，引导行业创新。编制时应吸纳国内外最新科研成果，参考国际标准（ISO、IEC）。例如，在能效指标上可设定高于现行行业平均值的门槛，推动产业升级。但需平衡技术可行性与成本，避免过度超前导致实施困难。定期跟踪技术发展趋势，通过附录或修改单形式补充新兴领域内容，确保标准的持续引领作用。

（4）实用性

实用性要求标准内容可操作、易落地，兼顾不同规模企业的实施条件。技术条款需明确具体步骤（如检测方法需详细描述仪器配置和操作流程），避免抽象理论。语言简洁直白，辅以流程图、表格等直观表达，减少专业术语障碍，便于标准使用方直接采用。

（二）主要内容的说明

1、范围

本文件给出了智能微系统测试流程框架，规定了晶圆级、芯片级、系统级三个层级的具体测试模块及测试结果判据。

本文件适用于智能微系统及其核心组件（如 MEMS（微机电系统，Micro-Electro-Mechanical System）芯片、传感器、控制器、执行器等）在研发、工艺验证、质量评估及验收过程中的测试与评估。

2、规范性引用文件

3、术语和定义

为了便于标准使用者准确地理解本标准，参考了国内外有关的国标和行标界

定了“智能微系统”、“晶圆级测试”、“芯片级测试”、“系统级测试”和“片上测试”等术语的定义。

4、智能微系统测试流程体系

设置了智能微系统测试流程框架章节，将智能微系统测试流程体系分成晶圆级、芯片级、系统级三个层级的测试模块，每个层级包含一系列可独立或组合使用的子测试模块。在制定测试方案时，可根据被测对象的具体要求，从各层级中灵活选取子模块进行组合，从而构建出定制化的测试项目集合，形成完整的测试方案，并对评估对象性能作出更精确和更全面的描述。

5、晶圆级测试

晶圆级测试通过薄膜表征、三维微结构特征及片上测试等手段，评估晶圆在材料、工艺及电性能方面的特性，综合判定其整体性能与质量一致性。

薄膜表征：包括晶体结构、材料成分、微观形貌和缺陷、表面粗糙度、弯曲度、平整度、总厚度变化（TTV）、厚度及均匀性、颗粒度、侧壁覆盖完整性、压电性能、介电特性、方阻特性等。

三维微结构特征：包括几何尺寸、结构特征、刻蚀深宽比、刻蚀倾角及形貌等。

片上测试：包括 WAT 测试（晶圆可接受测试）、CP 测试（芯片探针测试）以及面内长度、残余应变、应变梯度、台阶高度、杨氏模量等微机械量测试。

6、芯片级测试

芯片级测试通过力学测试和电学测试，评估芯片及封装后器件的功能、性能及可靠性，验证其设计合理性与环境适应性。

力学测试：包括结构刚度、疲劳特性、硬度和杨氏模量、附着力和摩擦系数等。

电学测试：包括振幅、谐振频率、品质因子、瞬态响应、灵敏度、零偏、非线性度、寄生阻容、散射参数（S 参数）等动态特性及性能指标。

7、系统级测试

系统级测试通过结构测试、性能测试、功能测试、电磁兼容性测试及环境适应性测试等手段，评估智能微系统在集成状态下的功能、性能与环境适应

性，确保整机性能符合要求。

结构测试：包括外观结构、重量及尺寸，用于验证系统结构完整性。

性能测试：包括功耗测试、电源与信号完整性测试，评估能耗水平及供电质量。

功能测试：包括基础功能（启动、停止、参数设置、数据采集等）和智能化测试（自检、自校准、故障诊断、自适应调节等）。

电磁兼容性测试：包括电磁发射（EMI）和电磁抗扰度（EMS），评估系统在复杂电磁环境下的工作可靠性。

环境适应性测试：包括温湿度测试（高低温工作、高低温贮存、温度循环、湿热交变等）、机械测试（机械冲击、随机振动）、耦合测试（湿热-冲击、高温-振动、低温-振动、湿热-振动）以及工作寿命测试，评价系统在综合环境条件下的耐受能力。

三、主要试验（或验证）情况

本标准已在启元实验室微纳系统设计集成与测试平台上完成了多型微系统的测试验证。

一方面，启元实验室自研的装备监测微系统、环境感知微系统和导航制导微系统等三型微系统，已按照本标准完成全面测试，具体测试结果参见标准中的附录 A。

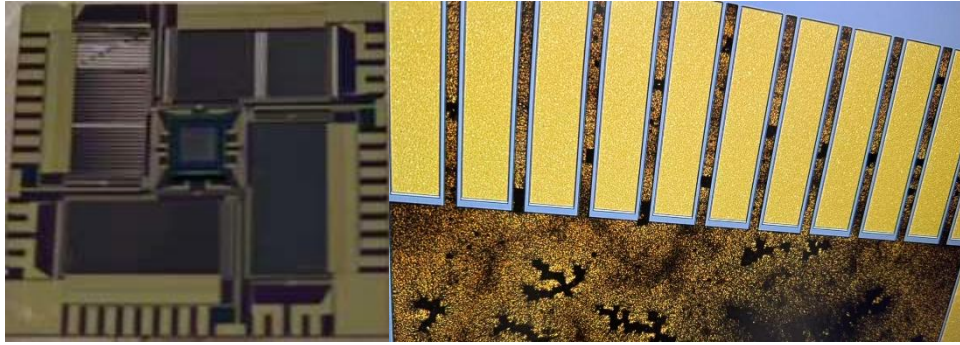
另一方面，2025 年 12 月用华芯拓远（天津）科技有限公司型号为 VP100 压力计和执行器产品基于该标准，在启元实验室微纳系统设计集成与测试平台进行了系统表征测试，对产品晶体结构、材料价态、元素分布、薄膜力学和晶圆级电气性能等方面进行了全面的测试，测试结果数据详实完整，全面支撑了产品的研发工作，该标准具有一定的指导意义，具有较好的应用推广前景。详细测试结果如下：

1、晶体结构测试

（1）测试设备

设备名称	生产厂家	型号	设备编号
X 射线衍射仪	日本理学	D/max-2500/PC	10000516

（2）测试前样品照片：



- (3) 参考标准：《智能微系统测试流程总则》 5.1
- (4) 测试条件：扫描范围 10-90°
- (5) 测试结果：测得结果为金，为多晶薄膜，存在 Au(111)、(200)、(220)、(311)等晶面。

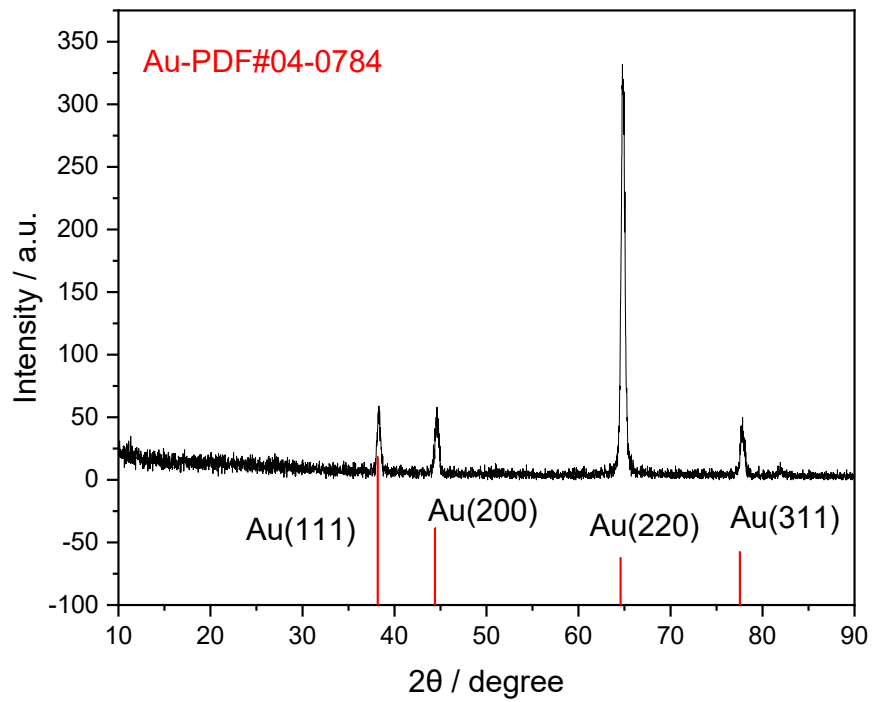


图 1：压力计器件 xrd 图

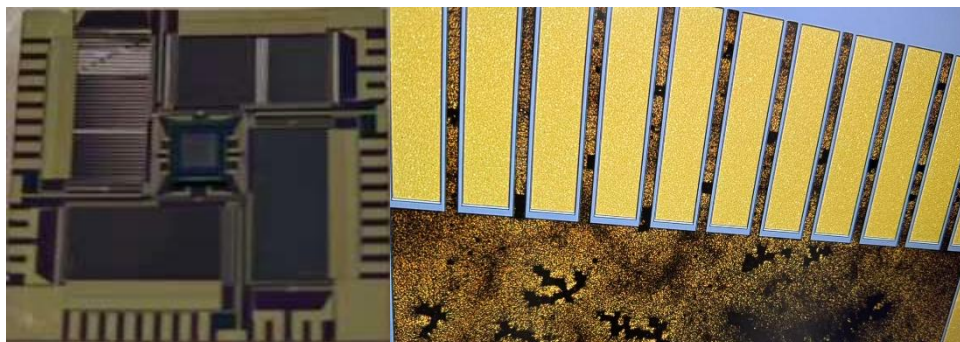
2、材料价态

(1) 测试设备

设备名称	生产厂家	型号	设备编号
------	------	----	------

X 射线能谱仪	赛默飞	250XI	11024532
---------	-----	-------	----------

(2) 测试前样品照片：



(3) 参考标准：《智能微系统测试流程总则》 5.1

(4) 测试条件： 表面 XPS 扫描。

(5) 测试结果：测得表面元素为 Au，C/O 峰的存在为表面污染物，Au 4f5/2 和 4f7/2 分别在 88eV、84.2eV 表明为金单质。

表 1：各元素含量

元素	C1s	O1s	Au4f
Atomic %	39.81	23.08	37.11

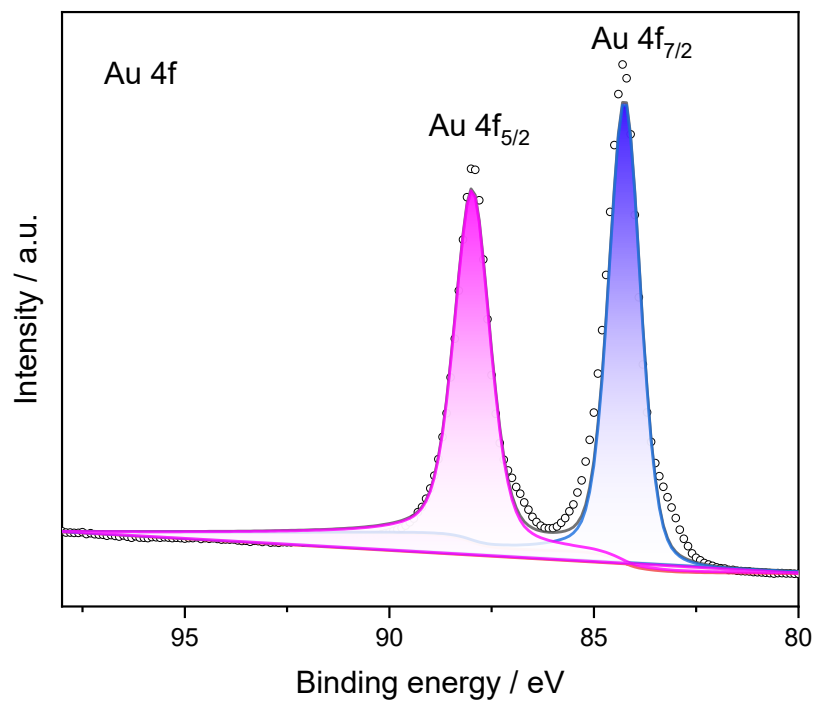


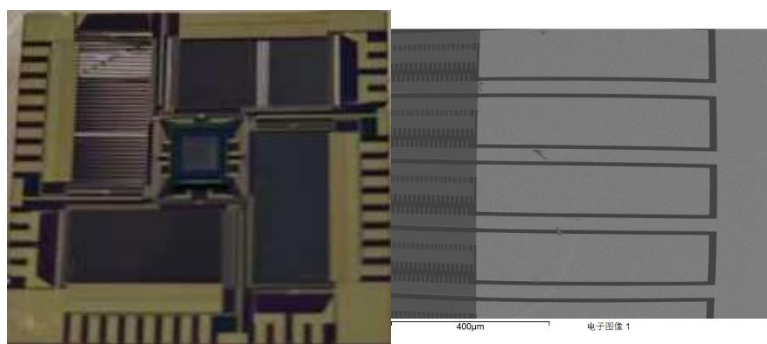
图 2: Au 的 XPS 图谱

3、元素分布

(1) 测试设备

设备名称	生产厂家	型号	设备编号
扫描电子显微镜	蔡司	GeminiSEM 360	/
能谱仪	牛津	AZtecLiveLite UltimMax 40	/

(2) 测试前样品照片：



(3) 参考标准：《智能微系统测试流程总则》5.1

(4) 测试条件：EHT=10kV，WD=8.7mm，SE2 模式

(5) 测试结果：样品主要成分为 Au、Si、O、N 及微量 C 元素，具体含量见表 X。各元素分布情况如图 2 所示，其中 Au、Si、O 元素的分布均匀，且其空间位置关系与器件预设的 Au 电极及 Si/SiO 结构完全吻合。检测到的 C/N 元素可归因于表面常见污染。综上所述，样品元素组成与分布均符合设计与工艺要求。

表 2：各元素含量百分比

元素	C	N	O	Si	Au
重量百分比%	3.48	2.31	8.69	4.89	80.63
原子百分比%	18.34	10.44	34.34	11.00	25.88

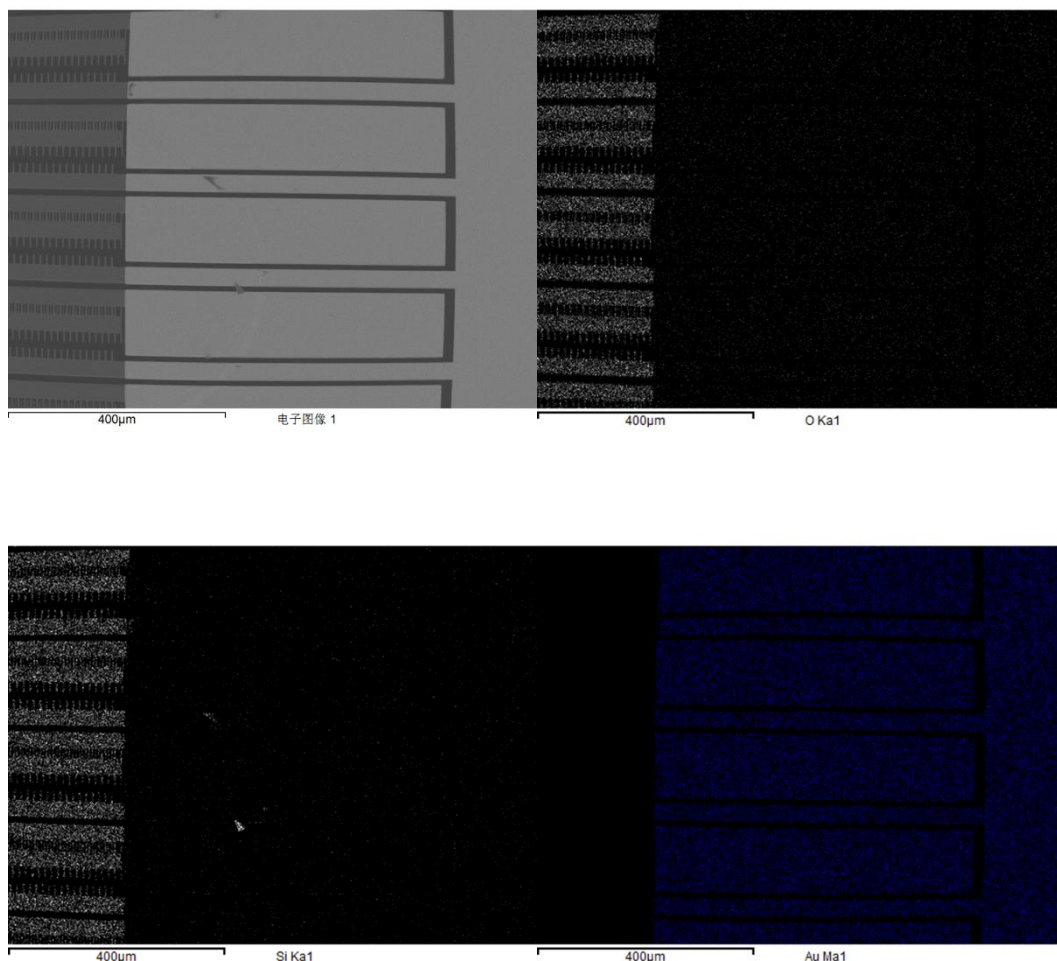


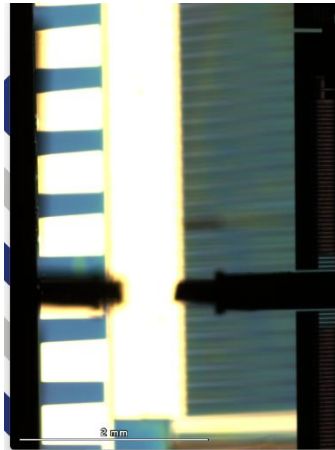
图 3：测试区域图和各元素面分布图

4、薄膜力学

(1) 测试设备

设备名称	生产厂家	型号	设备编号
微纳力学测试仪	FemtoTools	FT-MTA03	/

(2) 测试前样品照片：



(3) 参考标准： 《智能微系统测试流程总则》 6.1

(4) 测试条件： 划痕长度 25 μm ，最大力 20000 μN

(5) 测试结果： 金薄膜的附着力为 4399.96 μN 。

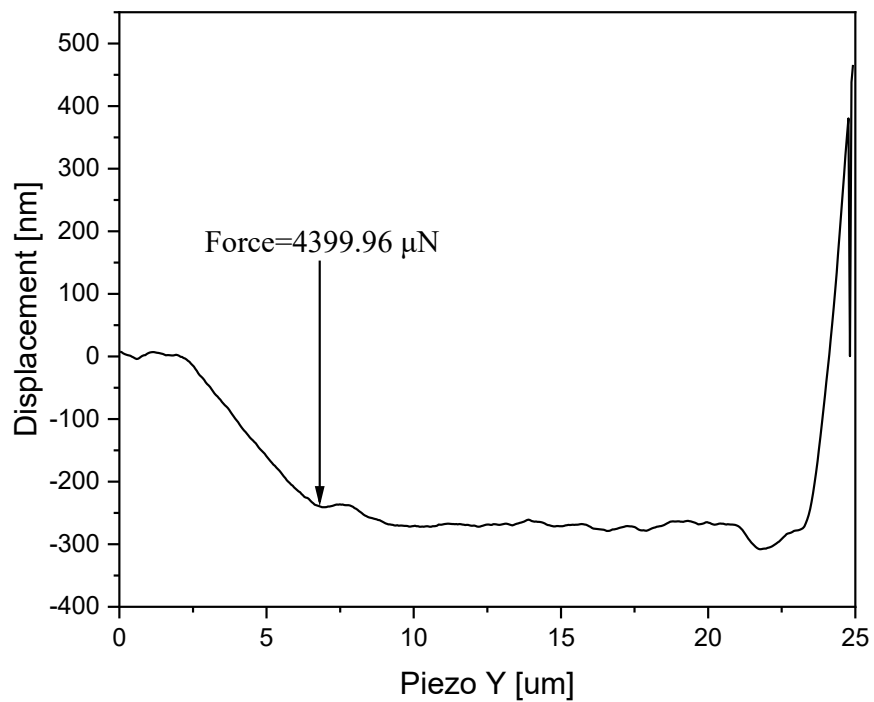


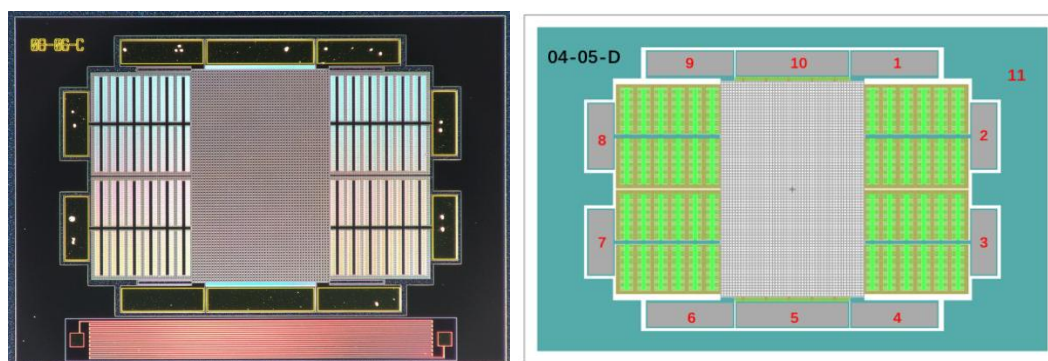
图 4: 纳米划痕测试图

5、晶圆级综合测试能力

(1) 测试设备

设备名称	生产厂家	型号	设备编号
半自动探针台	泰码思	TR1000	/

(2) 测试前样品照片：



(3) 参考标准： 《智能微系统测试流程总则》 6.2

(4) 测试条件：任意挑选 1、4、9、6pad 中的一对作为短路电阻，记录对应阻值，若出现以下不合格项，则判定器件不合格。不合格器件判据如下：a) 1-4、1-6、1-9 之间电阻应小于 1000 欧、若高于 1000 欧，判定不合格。b) 1-2、1-3、1-7、1-8 之间电阻应大于 1G 欧（对应万用表显示 overload 即开路状态），若低于，则判定不合格。c) 短路电阻应小于 1000 欧、若高于 1000 欧，判定不合格。

(5) 测试结果：电阻通过率 49.7%。

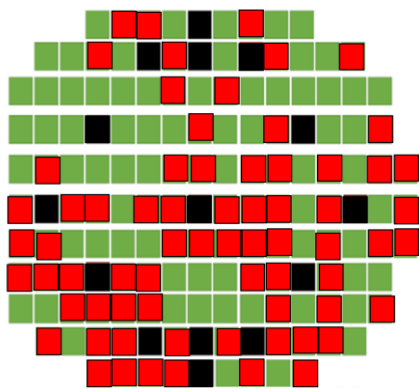


图 5：电阻通过率测试

四、预期的经济效益、社会效益和生态效益

智能微系统作为多学科交叉的前沿领域，是未来智能化、微型化装备的核心载体。然而，长期以来行业缺乏统一的测试标准化流程，导致产品质量参差不齐、测试成本高企、效率低下，严重阻碍了技术交流和产品推广。本标准是我国首个针对智能微系统测试流程的综合性技术规范，填补了国内相关标准体系的空白，旨在推动测试技术从“经验驱动”转向“标准驱动”。制定涵盖测试对象、测试指标、测试设备、测试标准等内容的科学规范，不仅是技术发展的必然需求，更是产业生态构建和全球化竞争的战略基石。

在经济方面，本标准的实施可避免企业在测试环节的重复投入，缩短研发周期，提升产品良率和一致性，降低质量损失和售后成本。统一的测试规范有利于产业链上下游的技术对接与结果互认，降低交易成本，提升整体运行效率，并为国产高端产品开拓国际市场提供技术支撑。

在社会方面，智能微系统广泛应用于航空航天、医疗健康、汽车电子等关键

领域，本标准将有效保障产品的可靠性与安全性，降低因产品失效引发的安全隐患，保护人民生命财产安全。同时，标准的实施将促进学科交叉融合与技术创新，推动测试技术人才培养，为行业可持续发展提供依据和支撑。

在生态方面，标准化的测试流程可减少重复测试造成的样品、耗材和能源消耗，降低资源浪费。通过提高产品可靠性和使用寿命，可减少电子废弃物产生，符合绿色制造和可持续发展的要求，助力实现“双碳”目标。

五、与国际、国外对比情况

本标准制定过程中未查到同类国际、国外标准。

本标准制定过程中未测试国外样品、样机。

六、以国际标准为基础的起草情况

无。

七、与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

本标准与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准相协调。

八、重大意见分歧的处理经过和依据

无。

九、标准中涉及到的专利和知识产权的说明

本标准不涉及专利和知识产权。

十、贯彻标准的要求和措施建议

无。

十一、其他应予说明的事项

无。

《智能微系统测试流程总则》

标准起草工作组

2026年6月2日