

T/CIS

中国仪器仪表学会团体标准

T/CIS 25001—XXXX

智能微系统测试流程总则

General guideline for intelligent micro-system testing process

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中国仪器仪表学会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 智能微系统测试流程框架 3

5 晶圆级测试 5

 5.1 薄膜表征 5

 5.2 三维微结构特征 6

 5.3 片上测试 7

 5.4 晶圆级测试结果判据 8

6 芯片级测试 8

 6.1 力学测试 8

 6.2 电学测试 9

 6.3 芯片级测试结果判据 9

7 系统级测试 10

 7.1 结构测试 10

 7.2 性能测试 10

 7.3 功能测试 10

 7.4 电磁兼容性测试 11

 7.5 环境适应性测试 11

 7.6 系统级测试结果判据 12

附录 A（资料性） 典型智能微系统测试示例 14

参考文献 19

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国仪器仪表学会提出并归口。

本文件起草单位：启元实验室等。

本文件主要起草人：邢飞等。

智能微系统测试流程总则

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

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 26111-2023 微机电系统（MEMS）技术 术语
- GB/T 2423.43-2008 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 振动、冲击和类似动力学试验样品的安装
- GB/T 5095.2509-2020 电子设备用机电元件 基本试验规程及测量方法 第25-9部分：信号完整性试验 试验25i：外来串扰
- GB/T 6113.101-2021 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第1-1部分：无线电骚扰和抗扰度测量设备 测量设备
- GB/T 6113.102-2025 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第1-2部分：无线电骚扰和抗扰度测量设备 传导骚扰测量的耦合装置
- GB/T 6113.104-2025 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第1-4部分：无线电骚扰和抗扰度测量设备 辐射骚扰测量用天线和试验场地
- GB/T 10610-2009 产品几何技术规范（GPS）表面结构 轮廓法 评定表面结构的规则和方法
- GB/T 14141-2009 硅外延层、扩散层和离子注入层薄层电阻的测定 直排四探针法
- GB/T 15478-2015 压力传感器性能试验方法
- GB/T 17626.2-2018 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验
- GB/T 17626.3-2023 电磁兼容 试验和测量技术 第3部分：射频电磁场辐射抗扰度试验
- GB/T 17626.8-2006 电磁兼容 试验和测量技术 工频磁场抗扰度试验
- GB/T 17626.11-2023 电磁兼容 试验和测量技术 第11部分：对每相输入电流小于或等于16 A 设备的电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度试验
- GB/T 18220-2012 信息技术 手持式信息处理设备通用规范
- GB/T 22319.9-2018 石英晶体元件参数的测量 第9部分：石英晶体元件寄生谐振的测量
- GB/T 25188-2010 硅晶片表面超薄氧化硅层厚度的测量 X射线光电子能谱法
- GB/T 25898-2010 仪器化纳米压入试验方法 薄膜的压入硬度和弹性模量
- GB/T 26111-2023 微机电系统（MEMS）技术 术语
- GB/T 29024.3-2025 粒度分析 单颗粒的光学测量方法 第3部分：光阻法液体颗粒计数器
- GB/T 30904-2014 无机化工产品 晶型结构分析 X射线衍射法
- GB/T 31227-2014 原子力显微镜测量溅射薄膜表面粗糙度的方法
- GB/T 31838.6-2021 固体绝缘材料 介电和电阻特性 第6部分：介电特性（AC方法）相对介电常数和介质损耗因数（频率0.1Hz~10MHz）
- GB/T 33523.604-2022 产品几何技术规范（GPS）表面结构 区域法 第604部分：非接触（相干扫描干涉）式仪器的标称特性
- GB/T 33929-2017 MEMS高g值加速度传感器性能试验方法
- GB/T 34094-2017 信息技术设备功耗测量方法
- GB/T 34893-2017 微机电系统（MEMS）技术 基于光学干涉的MEMS微结构面内长度测量方法

- GB/T 34894-2017 微机电系统 (MEMS) 技术 基于光学干涉的MEMS微结构应变梯度测量方法
- GB/T 34900-2017 微机电系统 (MEMS) 技术 基于光学干涉的MEMS微结构残余应变测量方法
- GB/T 35086-2018 MEMS电场传感器通用技术条件
- GB/T 35099-2018 微束分析 扫描电镜-能谱法 大气细粒子单颗粒形貌与元素分析
- GB/T 38058-2019 民用多旋翼无人机系统试验方法
- GB/T 38341-2019 微机电系统 (MEMS) 技术 MEMS器件的可靠性综合环境试验方法
- GB/T 38447-2020 微机电系统 (MEMS) 技术 MEMS结构共振疲劳试验方法
- GB/T 40279-2021 硅片表面薄膜厚度的测试 光学反射法
- GB/T 42158-2023 微机电系统 (MEMS) 技术 微沟槽和棱锥式针结构的描述和测量方法
- GB/T 42895-2023 微机电系统 (MEMS) 技术 硅基MEMS微结构弯曲强度试验方法
- GB/T 42902-2023 碳化硅外延片表面缺陷的测试 激光散射法
- GB/T 46057-2025 微束分析 扫描电子显微术 CD-SEM评定关键尺寸的方法
- JB/T 12721-2016 固体材料原位纳米压痕/划痕测试仪 技术规范
- JJF 1535-2015 微机电 (MEMS) 陀螺仪校准规范
- JY/T 0573-2020 激光拉曼光谱分析方法通则
- JY/T 0586-2020 激光扫描共聚焦显微镜分析方法通则
- SJ/T 11433-2012 矢量网络分析仪通用规范
- YS/T 839-2012 硅衬底上绝缘体薄膜厚度及折射率的椭圆偏振测试方法

3 术语和定义

GB/T 26111-2023界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

智能微系统 intelligent micro-systems

以微纳制造技术为基础,集感知或执行、控制、通信等功能于一体,具备自主信息采集、处理与响应能力的微型化系统装置。

注1:智能微系统的具体功能可包括但不限于信号处理、数据计算、能量管理等。其通常包含微电子、微机电系统 (MEMS)、光电子等组件,并通过异构集成、三维堆叠等先进封装技术实现多功能融合。

注2:智能微系统的特征尺度通常在微米至毫米量级,可根据应用需求配置多种传感器、处理器、执行器和通信接口。

3.2

晶圆级测试 wafer level testing

针对未划片的完整晶圆上的芯片或结构所进行的测试。

注:晶圆级测试通常用于评估晶圆制造工艺的稳定性和一致性,判定芯片的基本性能是否符合设计规范。

3.3

芯片级测试 chip level testing

针对晶圆划片后、封装前或封装后的单个芯片所进行的测试。

注:芯片级测试通常用于验证单个芯片的电性能参数、功能正确性及可靠性,为芯片的分选和使用提供依据。

3.4

系统级测试 system level testing

在特定应用环境下,针对已集成或部分集成的智能微系统整体所进行的测试。

注:系统级测试通常涵盖整机的功能验证、技术性能评估及环境适应性考核,旨在确保系统在真实或模拟的工作场景下能够稳定、可靠地运行。

3.5

片上测试 on-chip testing

在晶圆上对芯片或测试结构进行的测试。

3.6

微机械量 micro-mechanical parameters

泛指一切与微机械性质和状态相关的物理量,包括几何量、流量、温度、声学、力学和运动等物理量;由于几何量、流量、温度、声学等物理量进行了专门的分类,因此微机械量是指位移、速度、加速度、振动等运动特性参量,以及与运动特性相关的力学参量。

[来源: GB/T 26112-2010, 3.1]

3.7

MEMS 片上测试结构 MEMS on-chip test structures

一种与MEMS器件在同一工艺步骤中同步制造,专门用于测量或监控工艺参数、薄膜材料的力学或电学性能的微型结构。

3.8

面内长度 in-plane length

表面有边缘结构特征的两点、点与线或者两条线之间的距离。

[来源: GB/T 34893-2017, 3.2]

3.9

残余应变 residual strain

存在于材料、结构内部因塑性变形、不均匀温度分布、不均匀相变而形成的并保持平衡的内应变。

[来源: GB/T 34900-2017, 3.1]

3.10

应变梯度 strain gradient

结构内部单位长度上的应变变化量。

[来源: GB/T 34894-2017, 3.1]

3.11

弹性模量 modulus of elasticity

杨氏模量 Young's modulus

E

低于比例极限的应力与相应应变的比值。

注: 杨氏模量为正应力和线性应变下的弹性模量特例。

[来源: GB/T 10623-2008, 2.9]

3.12

晶圆可接受测试 wafer acceptance test; WAT

在晶圆流片结束之后和品质检验之前,对晶圆上特定测试结构进行的电性能测试。

3.13

芯片探针测试 chip probing; CP

在晶圆制造完成后、芯片封装前,使用探针卡对晶圆上的每一个芯片进行电性能测试的过程。

3.14

电源完整性 power integrity; PI

电源来源端与目的端的电压及电流符合系统正常工作需求的程度。

3.15

信号完整性 signal integrity; SI

信号在电路中传输时,保持其幅度、边沿、时序等特性不发生畸变,从而能被接收端准确识别的能力。信号质量受反射、串扰、衰减、噪声等因素影响。

注: 信号完整性测试是一类用于评估上述能力的测量与分析过程,通常包括眼图、抖动、串扰、阻抗匹配等项目的测试。

3.16

功耗 power consumption

设备、器件或系统在指定工作条件下的输入功率。

注: 在能量转换器件(如电源模块)中,“功耗”特指输入功率与输出功率之差,即能量转换过程中损失的功率。

4 智能微系统测试流程框架

智能微系统测试流程体系由晶圆级、芯片级、系统级三个层级的测试模块构成,其结构关系见图1。每个层级的测试模块均包含一系列可独立或组合使用的子测试模块。其中,晶圆级测试包含的子模块命名为子模块 $W_1 \sim W_n$,芯片级测试包含的子模块命名为子模块 $C_1 \sim C_n$,系统级测试包含的子模块命名为子模块 $S_1 \sim S_n$ 。

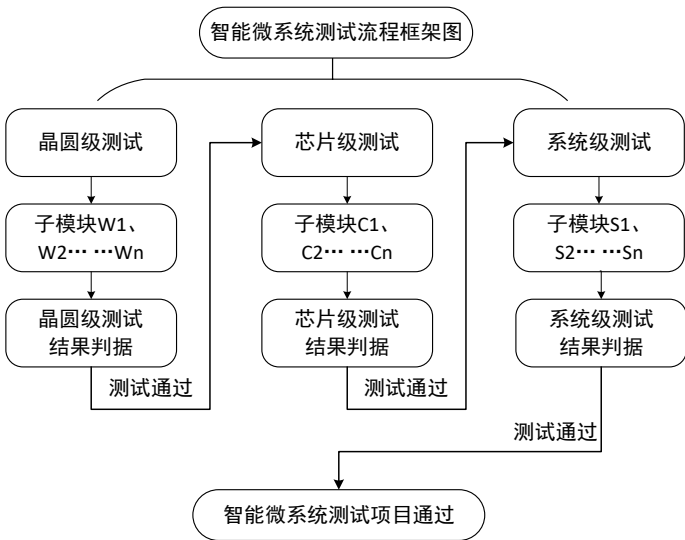


图1 智能微系统测试流程框架图

晶圆级测试（结构框图见图2）通过薄膜表征、三维微结构表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。芯片级测试（结构框图见图3）通过力学测试和电学测试等手段，评估芯片的功能和性能，验证其设计合理性与环境适应性。系统级测试（结构框图见图4）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、性能等多方面性能，以确保整机性能符合要求。

在制定测试方案时，可根据被测对象的具体要求，从三个层级的测试模块中灵活选取并进行组合，从而构建出定制化的测试项目集合，形成完整的测试方案。附录A给出了三种典型智能微系统测试流程的测试方案示例，供使用者参考。

注：对于集成多个功能模块的智能微系统，各层级测试宜覆盖所有模块。若多个模块的测试项目和判据相同，可采用抽样方式，但抽样方案宜在测试方案中明确。

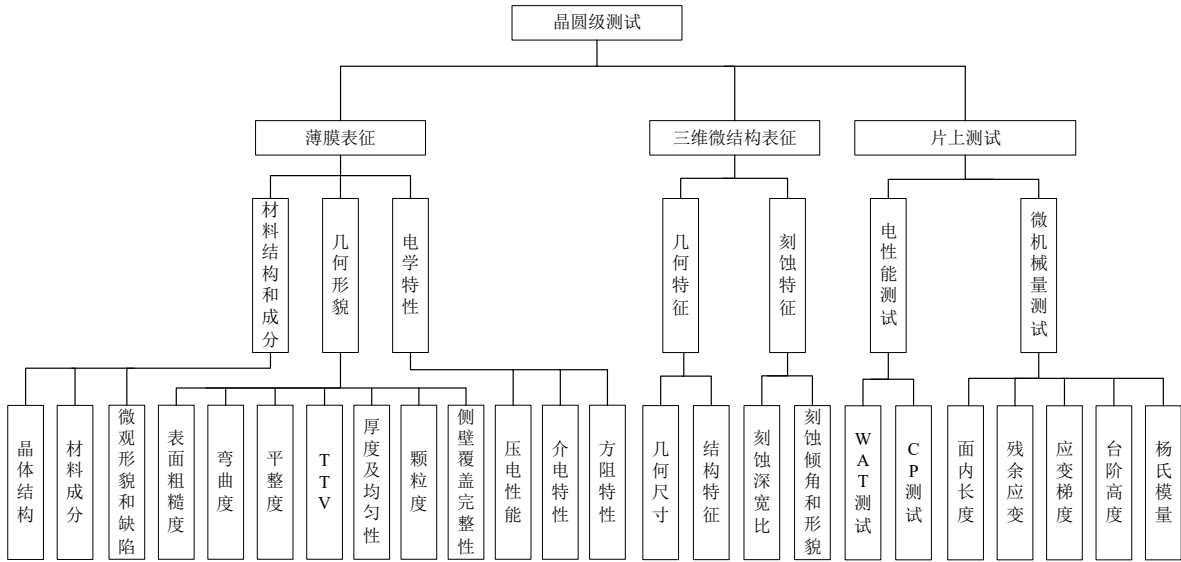


图2 晶圆级测试结构框图

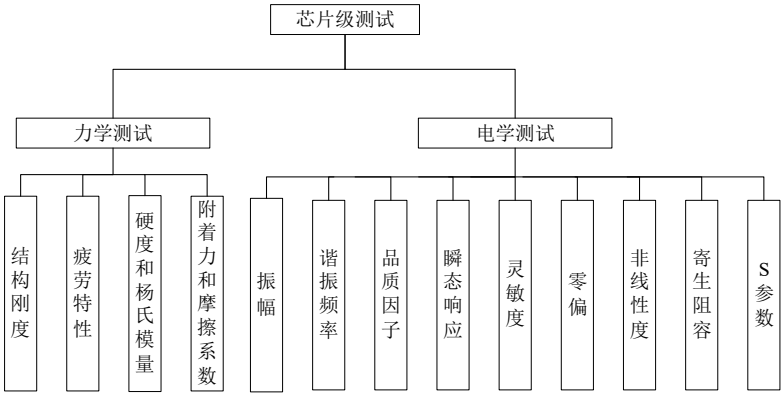


图3 芯片级测试结构框图

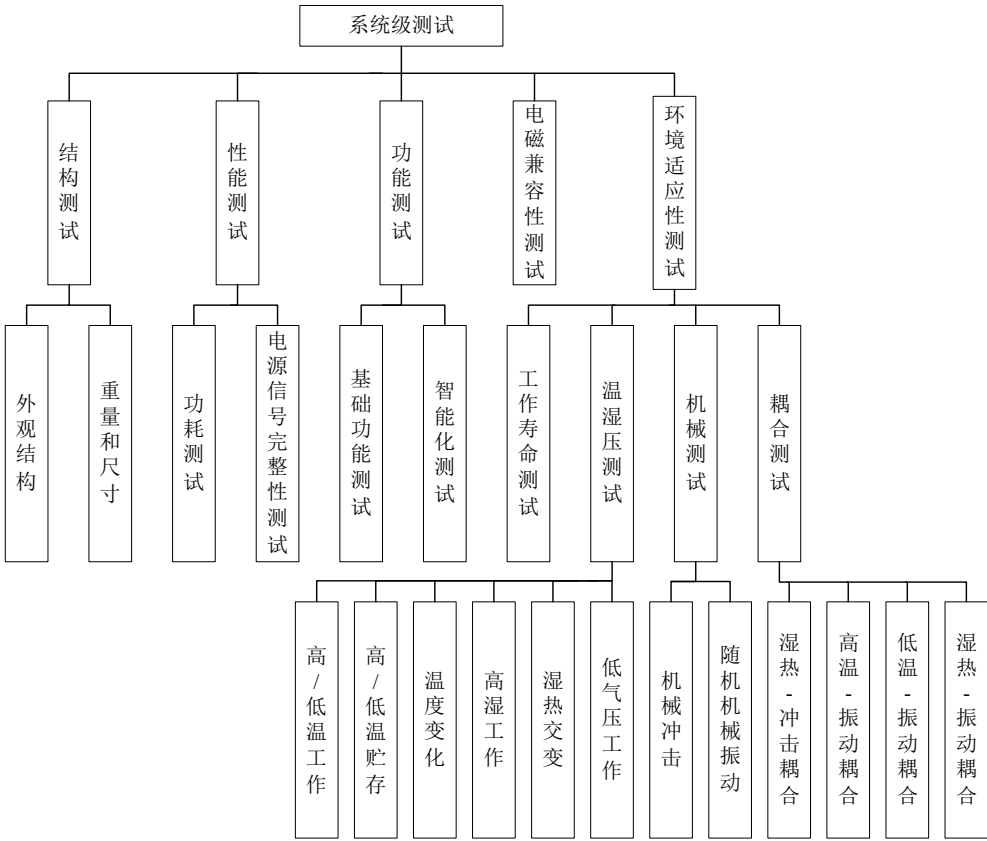


图4 系统级测试结构框图

5 晶圆级测试

5.1 薄膜表征

5.1.1 概述

薄膜表征用于测定MEMS与芯片制造过程中薄膜材料的物相组成、几何形貌和电学特性(如图5所示)，以评估薄膜生长质量，为工艺控制和材料选择提供依据。

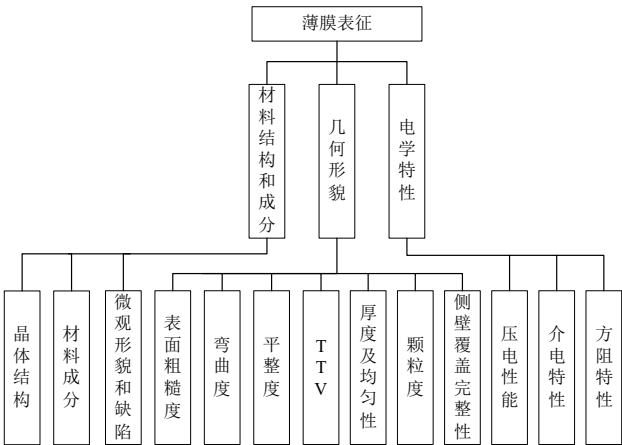


图5 薄膜表征测试

5.1.2 测试要求

表1给出了薄膜表征测试的典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法。其他适用的测试项目、测试对象、测试设备及方法可按相应标准执行。

表1 薄膜表征测试典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法

子模块Wn	测试对象	测试设备	测试方法
晶体结构	薄膜材料	X射线衍射仪	GB/T 30904-2014
材料成分		X射线光电子能谱仪或拉曼光谱仪或 X射线能谱仪	GB/T 25188-2010 JY/T 0573-2020 GB/T 35099-2018
微观形貌和缺陷		激光共聚焦显微镜	形貌：JY/T 0586-2020 缺陷：GB/T 42902-2023
表面粗糙度		原子力显微镜	GB/T 31227-2014
弯曲度		光学干涉显微镜或轮廓仪	GB/T 33523. 604-2022
平整度			
TTV			
厚度及均匀性	薄膜材料（透明/半透明或绝缘体）	膜厚仪或椭偏仪	透明膜：GB/T 40279-2021 绝缘膜：YS/T 839-2012
颗粒度	薄膜材料	颗粒度分析仪	GB/T 29024. 3-2025
侧壁覆盖完整性	经薄膜覆盖工艺处理的微结构	扫描电子显微镜	按产品规格书执行
压电性能	压电薄膜材料	压电力显微镜	施加交流电压，检测逆压电效应引起的振动，获取幅度与相位，计算纵向压电应变常数 d_{33}
介电特性	薄膜材料	阻抗分析仪或LCR测试仪	GB/T 31838. 6-2021
方阻特性		四探针电阻测试仪或半导体分析仪	GB/T 14141-2009

5.2 三维微结构特征

5.2.1 概述

三维微结构特征测试用于监测MEMS器件生产过程中微结构的几何尺寸和刻蚀特征等参数（如图6所示），以评估薄膜生长及微结构加工的工艺符合性。

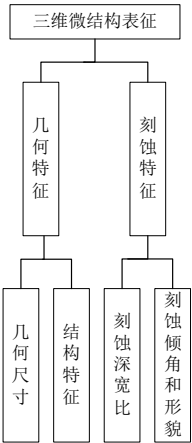


图6 三维微结构特征测试框图

5.2.2 测试要求

表2给出了三维微结构特征测试的典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法。其他适用的测试项目、测试对象、测试设备及方法可按相应标准执行。。

表2 三维微结构特征测试典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法

子模块Wn	测试对象	测试设备	测试方法
几何尺寸	晶圆上光刻、刻蚀形成的关键尺寸图形等	白光干涉仪或激光共聚焦显微镜或扫描电子显微镜	GB/T 46057-2025、GB/T 10610-2009或JY/T 0586-2020
结构特征	晶圆上微结构的形貌缺陷、套刻对准偏移、侧壁粗糙度等		
刻蚀深宽比	刻蚀工艺形成的深沟槽、通孔等垂直结构	扫描电子显微镜	GB/T 42158-2023
刻蚀倾角及形貌	刻蚀工艺形成的沟槽、通孔的侧壁形貌		

5.3 片上测试

5.3.1 概述

片上测试在晶圆流片结束之后、品质检验之前进行，利用晶圆上的测试结构对完成全部制程工艺后的硅片进行电性能测试和微机械量测试（如图7所示），以评估制程工艺的稳定性 and 一致性，并在封装前剔除失效芯片。

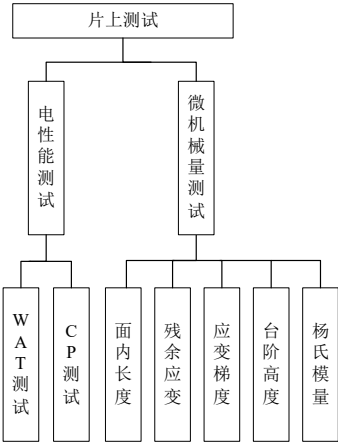


图7 片上测试结构框图

5.3.2 测试要求

表3给出了片上测试的典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法。其他适用的测试项目、测试对象、测试设备及方法可按相应标准执行。

表3 片上测试典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法

子模块Wn	测试对象	测试设备	测试方法
WAT测试	完成全部制程工艺后的晶圆	测试机台（测试机+测试板卡）、探针台	按产品规格书或供需双方约定的测试规范执行。包括但不限于间距测试、连续性隔离测试、薄层电阻测试、接触电阻测试、开尔文结构电阻测试、栅氧完整性测试、扩展规则检查、关键尺寸测试和漏电流测试等
CP测试	整片晶圆上所有芯片	自动测试设备（ATE），包括测试机、探针卡、探针台、测试软件	按产品规格书或供需双方约定的测试规范执行。包括扫描测试、边界扫描、存储器测试、直流/交流测试、射频测试和其他功能测试等
面内长度	具有MEMS片上测试结构的晶圆	光学干涉显微镜	GB/T 34893-2017
残余应变			GB/T 34900-2017
应变梯度			GB/T 34894-2017
台阶高度			按产品规格书或供需双方约定的测试规范执行
杨氏模量		频闪干涉仪或光学干涉显微镜和显微式激光测振仪	按产品规格书或供需双方约定的测试规范执行

5.4 晶圆级测试结果判据

晶圆级测试完成后，各项参数的判定依据如下。具体合格判据应在测试方案中明确，并在测试报告中注明。

- a) 薄膜厚度测量值宜在标称值的±5%范围内。
- b) 方块电阻测量值宜在标称值的±10%范围内。
- c) 表面粗糙度 R_a 宜不大于 5 nm（或按产品规格书要求）。
- d) 几何尺寸（线宽、间距等）测量值宜在设计值的±10%范围内。
- e) 刻蚀深宽比宜不低于 10:1。
- f) 接触电阻测量值宜不大于 1 kΩ。
- g) 漏电流宜不大于 10 nA。
- h) 其他测试项目宜符合产品设计规范或供需双方约定的技术要求。

6 芯片级测试

6.1 力学测试

6.1.1 概述

力学测试用于测定MEMS微结构的结构刚度、疲劳特性、硬度和杨氏模量、附着力和摩擦系数等力学参数，以评估微结构在设计和使用过程中的力学可靠性。力学测试结构框图见图8。

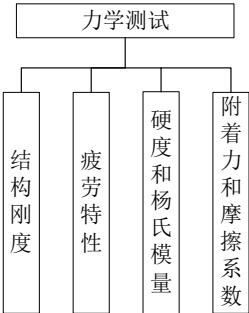


图8 力学测试结构框图

6.1.2 测试要求

表4给出了力学测试的典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法。其他适用的测试项目、测试对象、测试设备及方法可按相应标准执行。

表4 力学测试典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法

子模块Cn	测试对象	测试设备	测试方法
结构刚度	划片后单个芯片上的悬臂梁、梳齿结构、质量块、悬膜、空腔等MEMS微结构	微纳力学测试仪	GB/T 42895-2023
疲劳特性			GB/T 38447-2020
硬度和杨氏模量	划片后单个芯片上的薄膜材料或微结构（悬臂梁、固支梁等）	纳米压痕仪	GB/T 25898-2010
附着力和摩擦系数	划片后单个芯片上的多层薄膜材料	纳米划痕仪	JB/T 12721-2016

6.2 电学测试

6.2.1 概述

电学测试用于测定典型MEMS器件（如MEMS核心芯片等）的电学关键参数（如图9所示），以表征器件设计的合理性，并为后续设计优化与工艺改进提供依据。

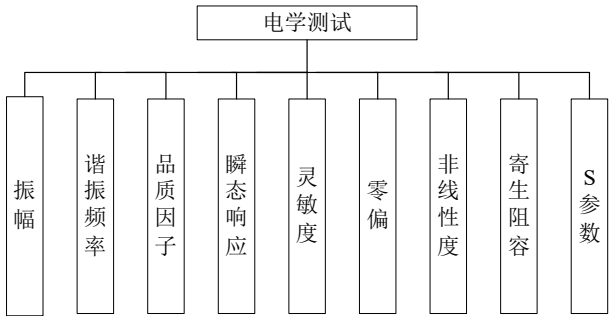


图9 电学测试结构框图

6.2.2 测试要求

表5给出了电学测试的典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法。其他适用的测试项目、测试对象、测试设备及方法可按相应标准执行。

表5 电学测试典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法

子模块Cn	测试对象	测试设备	测试方法
振幅	陀螺仪、加速度计、磁力计、压力传感器等芯片	电学源表+动态位移测量设备（带频闪功能的白光干涉仪、激光多普勒测振仪或激光多普勒显微镜）	GB/T 33929-2017、JJF 1535-2015、GB/T 35086-2018
谐振频率			
品质因子			
瞬态响应			
灵敏度	加速度计、磁力计、压力传感器等芯片	离心机、亥姆霍兹线圈、压力控制器、温箱等	GB/T 15478-2015
零偏	陀螺仪、加速度计等芯片	精密转台、离心机、温箱	JJF 1535-2015
非线性度			
寄生阻容	芯片（引脚或互连线）	阻抗分析仪或LCR测试仪	GB/T 22319.9-2018
散射参数（S参数）	射频芯片	矢量网络分析仪	SJ/T 11433-2012

6.3 芯片级测试结果判据

芯片级测试完成后，各项参数的判定依据如下，具体合格判据应在测试方案中明确，并在测试报告中注明。

- a) 结构刚度测量值宜在设计值的±20%范围内。
- b) 疲劳寿命宜不低于设计规定的最低循环次数（如 10⁶ 次），试验后样品无结构失效。
- c) 硬度测量值宜在标称值的±15%范围内。
- d) 杨氏模量测量值宜在标称值的±15%范围内。
- e) 谐振频率测量值宜在设计值的±5%范围内。
- f) 品质因子宜不低于设计值（或按产品规格书要求）。
- g) 寄生阻容测量值宜在设计值的±20%范围内。
- h) 其他测试项目宜符合产品设计规范或供需双方约定的技术要求。

7 系统级测试

7.1 结构测试

7.1.1 概述

结构测试用于测定智能微系统在结构完整性和基本功能方面的符合性，包括外观结构检查、重量及外形尺寸测量等项目，以验证系统的功能指标是否满足设计要求，评估其稳定性、安全性和可操作性，确保系统在使用过程中不发生超荷载或结构裂解等可靠性问题。

7.1.2 测试要求

表6给出了结构测试的典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法。其他适用的测试项目、测试对象、测试设备及方法可按相应标准执行。

表6 结构测试典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法

子模块Sn	测试对象	测试设备	测试方法
外观结构	智能微系统整机	具备尺寸测量功能及电信号（电流、电压）读取能力的测试设备	GB/T 38058-2019
重量及尺寸		游标尺、千分尺、千分表、标准规、投影仪、测量显微镜、天平	GB/T 2423. 43-2008

7.2 性能测试

7.2.1 概述

性能测试用于测定智能微系统的功耗、电源完整性及信号完整性等性能指标，评估系统在不同工作状态下的能耗水平，验证供电质量与信号传递的可靠性，为能源优化设计、散热设计及系统可靠性评估提供依据。

7.2.2 测试要求

表7给出了性能测试的典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法。其他适用的测试项目、测试对象、测试设备及方法可按相应标准执行。

表7 性能测试典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法

子模块 Sn	测试对象	测试设备	测试方法
功耗测试	智能微系统整机	电压表、功率计	GB/T 34094-2017
电源与信号完整性测试		电压表、示波器	GB/T 5095. 2509-2020

7.3 功能测试

7.3.1 概述

功能测试用于验证智能微系统的基础功能和智能化水平，包括系统基本操作、数据交互、通信协议、自检、故障诊断、自适应调节等能力，以评估系统是否满足设计任务要求。

7.3.2 测试要求

表8给出了功能测试的典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法。其他适用的测试项目、测试对象、测试设备及方法可按相应标准执行。

表8 功能测试典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法

子模块 Sn	测试对象	测试设备	测试方法
基础功能	智能微系统整机	系统控制终端、信号发生器、数据采集卡、通信分析仪等	按产品规格书或供需双方约定的测试规范执行。逐项验证系统的启动、停止、参数设置、数据采集、存储、传输、显示等基本功能是否正常；检查各接口通信协议符合性
智能化测试		模拟环境输入设备（温湿度、压力、光、声等）、故障注入装置、数据记录仪	按产品规格书或供需双方约定的测试规范执行。测试系统自检、自校准、故障诊断与隔离、自适应调节、阈值报警、决策输出等智能化功能；在规定激励条件下检查系统响应正确性和实时性

7.4 电磁兼容性测试

7.4.1 概述

电磁兼容性测试用于测定设备或系统在电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。电磁兼容性包括电磁发射（EMI）和电磁抗扰度（EMS）两部分，评估其在复杂电磁环境下的工作可靠性及对周围设备的影响。

7.4.2 测试要求

表9给出了电磁兼容性测试的典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法。其他适用的测试项目、测试对象、测试设备及方法可按相应标准执行。

表9 电磁兼容性测试典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法

子模块 Sn	测试对象	测试设备	测试方法
电磁发射（EMI）	智能微系统整机	测量接收机、天线、微波暗室、电磁干扰测量仪	GB/T 17626.2-2018 和 GB/T 17626.3-2023、
电磁抗扰度（EMS）		群脉冲发生器、雷击浪涌发生器、静电放电发生器、电压跌落发生器	GB/T 17626.8-2006 或 GB/T 17626.11-2023 等

7.5 环境适应性测试

7.5.1 概述

环境适应性测试通过模拟各类环境应力，验证MEMS器件及智能微系统在综合环境条件下的耐受能力与功能维持能力，评价其整体可靠性水平。测试内容包括温湿度测试（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）以及工作寿命测试等。环境适应性测试结构框图见图10。

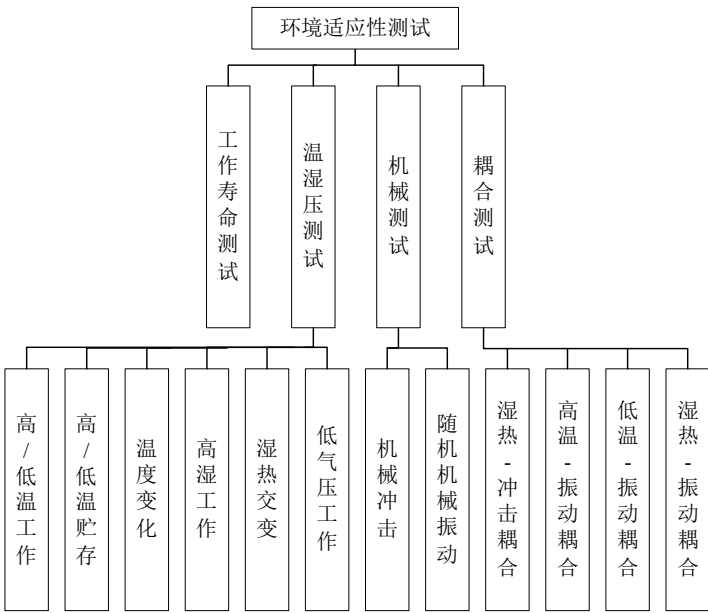


图10 环境适应性测试结构框图

7.5.2 测试要求

表10给出了环境适应性测试的典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法。其他适用的测试项目、测试对象、测试设备及方法可按相应标准执行。

表10 环境适应性测试典型测试项目、测试对象、测试设备及测试方法

子模块Sn	测试对象	测试设备	测试方法
工作寿命测试	智能微系统整机	高温老化试验箱或可靠性寿命试验系统	GB/T 18220-2012或GB/T 38341-2019
高/低温工作		高低温试验箱	GB/T 38341-2019
高/低温贮存			
温度变化		恒温恒湿试验箱	
高湿工作			
湿热交变		高低温低气压试验箱	
低气压工作		冲击台	
机械冲击		振动台	
随机机械振动		温度/湿度/振动综合环境试验系统	
湿热-冲击耦合			
高温-振动耦合			
低温-振动耦合			
湿热-振动耦合			

7.6 系统级测试结果判据

系统级测试完成后，各项参数的判定依据如下，具体合格判据应在测试方案中明确，并在测试报告中注明。

- a) 外观结构宜无可见损伤、连接可靠。
- b) 重量测量值宜在标称值的±5%范围内。
- c) 外形尺寸测量值宜在设计图纸公差范围内。
- d) 功耗测量值宜不大于设计规格上限值。
- e) 电源纹波宜不大于标称电压的±5%。
- f) 信号完整性（眼图张开度、抖动等）宜满足接口规范要求。
- g) 基础功能测试宜正常。

- h) 数据采集、存储、传输、显示功能宜正确无误。
- i) 智能化功能（自检、自校准、故障诊断、自适应调节等）宜响应正确、实时性满足要求，目标检测、深度估计、重识别等智能算法的性能指标（如召回率、精确率等）宜不低于产品规格书或供需双方约定的阈值。
- j) 辐射发射和传导发射限值宜符合 GB/T 6113.101-2021、GB/T 6113.102-2025、GB/T 6113.104-2025 中相应限值的规定。
- k) 静电放电、辐射抗扰度、工频磁场抗扰度等宜满足 GB/T 17626.2-2018、GB/T 17626.3-2023、GB/T 17626.8-2006 中相应性能判据（A 级或 B 级）的规定。
- l) 电压暂降、短时中断抗扰度宜满足 GB/T 17626.11-2023 中相应性能判据的规定。
- m) 高温工作、高温贮存、低温贮存、温度循环试验后，器件功能宜正常，性能参数漂移宜在允许范围内，且满足 GB/T 38341-2019 中相应试验条件及性能判据的规定。
- n) 恒定湿热、高压湿热试验后，绝缘电阻、漏电流等宜满足规格要求，且满足 GB/T 38341-2019 中相应试验条件及性能判据的规定。
- o) 机械冲击、随机振动试验后，结构宜无损坏，电气连接宜正常，且满足 GB/T 38341-2019 中相应试验条件及性能判据的规定。
- p) 耦合试验（湿热-冲击、高/低温-振动等）后，样品宜无失效，性能宜符合设计要求，且满足 GB/T 38341-2019 中相应试验条件及性能判据的规定。
- q) 其他测试项目宜符合产品设计规范或供需双方约定的技术要求。

附录 A
(资料性)
典型智能微系统测试示例

本附录给出了三种典型智能微系统测试流程的典型测试示例，旨在帮助标准使用者理解第5章、第6章、第7章中各测试模块的实施方法，实际测试宜根据产品设计和工艺要求确定具体参数和判据。示例中仅展示部分核心功能模块的测试结果，其他模块的测试可参考使用。

A.1 缩略语

下列缩略语适用于本附录。

TSV 硅通孔 (Through Silicon Via)

TMV 塑封通孔 (Through Molding Via)

LCR 电感电容电阻 (Inductance Capacitance Resistance)

PZT 锆钛酸铅 (Lead Zirconate Titanate)

IMU 惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit)

mAP 平均精度均值 (mean Average Precision)

abs_rel 绝对相对误差 (absolute relative error)

delta1 相对误差小于1.25倍的像素比例 (proportion of pixels with relative error less than 1.25)

ReID 行人重识别 (person Re identification)

Rank-1 首次命中率 (Rank-1 Accuracy)

FPS 每秒处理帧数 (frames per second)

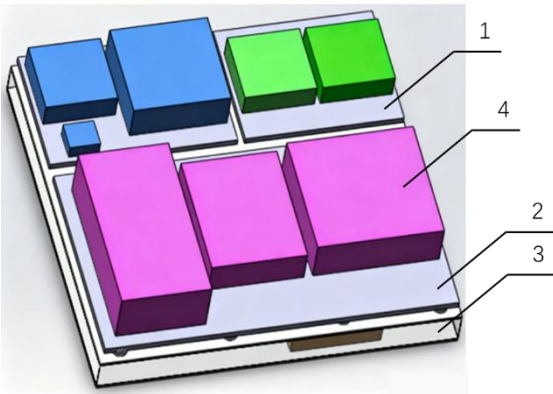
FPGA 现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array)

CMOS 互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconductor)

A.2 装备监测微系统测试流程

A.2.1 测试对象

装备监测微系统由3个TSV微单元和1个TMV微单元组成 (如图A.1所示)，集成了三轴加速度计、三轴磁力计、气压计和温湿度传感器，并内置控制单元与无线通信模块，具备环境状态监测、数据处理与远程通信能力。



标引序号说明：

1——TSV微单元；

2——TMV微单元；

3——控制单元与无线通信模块；

4——传感模块，包括温度、湿度、压力和红外等。

图A.1 装备监测微系统组成示意图

A.2.2 晶圆级测试

表A.1给出了装备监测微系统中晶圆级测试的相关信息。

表A.1 装备监测微系统晶圆级测试相关信息

子模块Wn	测试设备	测试结果	判定
晶体结构	X射线衍射仪	测得Si(100)单晶衍射峰，半高宽0.15°，无其他杂峰	合格
材料成分	X射线光电子能谱仪	检测到Si、N、O元素，Si 2p峰位99.5 eV，为氮化硅薄膜	合格
表面粗糙度	原子力显微镜	Ra = 0.8 nm	合格
厚度及均匀性	椭偏仪	标称值1.2 μm，实测1.18 μm~1.22 μm	合格
方阻特性	四探针电阻测试仪	Rs = 320 Ω/□（标称值300 Ω/□~340 Ω/□）	合格
几何尺寸	扫描电子显微镜	TSV孔径设计值50 μm，实测49.2 μm；TSV间距设计值100 μm，实测99.5 μm	合格
刻蚀深宽比	扫描电子显微镜	深宽比12:1，侧壁倾角88°	合格
WAT测试	测试机	桥臂电阻标称值5 kΩ，实测4.85 kΩ~5.12 kΩ	合格
面内长度	光学干涉显微镜	悬臂梁长度设计值150 μm，实测149.3 μm	合格

A.2.3 芯片级测试

表A.2给出了装备监测微系统中芯片级测试的相关信息。

表A.2 装备监测微系统芯片级测试相关信息

子模块Cn	测试设备	测试结果	判定
结构刚度	微纳力学测试仪	加速度计悬臂梁刚度测量值22 N/m（设计20 N/m~24 N/m）	合格
硬度和杨氏模量	纳米压痕仪	氮化硅膜硬度14.5 GPa，杨氏模量180 GPa	合格
谐振频率	激光多普勒测振仪	加速度计一阶谐振频率 12.3 kHz（设计12 kHz~12.8 kHz）	合格
品质因子	激光多普勒测振仪	Q = 110	合格
寄生阻容	LCR测试仪	寄生电容0.8 pF，寄生电阻0.3 Ω	合格

A.2.4 系统级测试

表A.3给出了装备监测微系统中系统级测试的相关信息

表A.3 装备监测微系统系统级测试相关信息

子模块Sn	测试设备	测试结果	判定
外观结构	高倍率光学显微镜	TSV与TMV单元无裂纹、无脱落；焊点完好，无桥接；塑封体无分层	合格
重量及尺寸	游标卡尺	整体重量≤50 g，外形尺寸公差≤±0.2 mm	合格
电源与信号完整性测试	半导体特性测试仪	导通性测试和绝缘性测试符合要求	合格
基础功能	测试板卡、上位机、振动台、温控箱	三轴加速度计灵敏度50 mV/g，非线性度0.2%FS；温度测量精度±0.5℃；振动传感器频率响应10 Hz~1 kHz；声发射传感器阈值可调。无线传输正常	合格
智能化测试	上位机电脑及测试软件	振动特征识别准确率≥95%；温度超限报警响应时间<0.5 s；数据存储与回放功能正常	合格
高/低温贮存	恒温恒湿试验箱	在温度-40℃和+85℃ 各贮存 48 h 后，样品功能正常，性能漂移<1%	合格

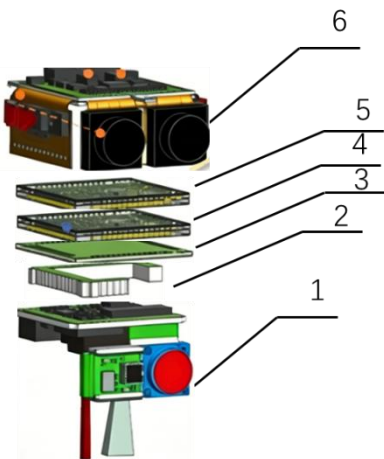
A.2.5 测试结论

该装备监测微系统在晶圆级、芯片级和系统级三个层级的测试结果均符合产品规范要求，判定为合格。

A.3 环境感知微系统测试流程

A.3.1 测试对象

环境感知微系统由6个功能模块组成（如图A.2所示），集成了三轴磁力计、气压计、磁力计、可见光相机等传感器模块，具备运动感知、高度测量和距离探测等能力。



- 标引序号说明：
- 1——传感模块B，包括气压计、光流传感器等；
 - 2——惯性传感单元，包括六轴IMU等；
 - 3——智能计算单元，包括智能计算芯片等；
 - 4——飞行控制单元，包括蓝牙芯片和飞控芯片等；
 - 5——传感模块A，包括三轴磁力计、可见光相机等；
 - 6——无线通信单元，包括通信模块等。

图A.2 环境感知微系统组成示意图

A.3.2 晶圆级测试

表A.4给出了环境感知微系统中晶圆级测试的相关信息。

表A.4 环境感知微系统晶圆级测试相关信息

子模块Wn	测试设备	测试结果	判定
材料成分	X射线光电子能谱仪	压电薄膜：检测到PZT元素组成，Pb 4f、Zr 3d、Ti 2p峰位与标准谱吻合	合格
表面粗糙度	原子力显微镜	Ra = 0.6 nm（标称≤1 nm）	合格
厚度及均匀性	椭圆仪	标称值2.0 μm，实测1.96 μm~2.03 μm	合格
方阻特性	四探针电阻测试仪	Rs = 285 Ω/□（标称270 Ω/□~310 Ω/□）	合格
几何尺寸	扫描电子显微镜	设计值15 μm，实测14.8 μm	合格
刻蚀深宽比	扫描电子显微镜	深宽比15:1，侧壁倾角89°	合格
WAT测试	测试机台	电容值标称10 pF，实测9.8 pF~10.2 pF	合格
面内长度	光学干涉显微镜	设计值200 μm，实测199.2 μm	合格

A.3.3 芯片级测试

表A.5给出了环境感知微系统中芯片级测试的相关信息。

表A.5 环境感知微系统芯片级测试相关信息

子模块Cn	测试设备	测试结果	判定
结构刚度	微纳力学测试仪	刚度测量值105 N/m（设计100 N/m~115 N/m）	合格
硬度和杨氏模量	纳米压痕仪	PZT薄膜硬度5.2 GPa，杨氏模量110 GPa	合格
谐振频率	激光多普勒测振仪	一阶谐振频率 18.5 kHz（设计18 kHz~19kHz）	合格
品质因子	激光多普勒测振仪	Q = 145	合格
寄生阻容	LCR测试仪	寄生电容2.1 pF，寄生电阻0.5 Ω	合格

A.3.4 系统级测试

表A.6给出了环境感知微系统中系统级测试的相关信息。

表A. 6 环境感知微系统系统级测试相关信息

子模块Sn	测试设备	测试结果	判定
外观结构	高倍率光学显微镜	元器件无丢失、错位、破损；焊点外观光亮、饱满，无虚焊、锡珠；植球均匀、完整；注塑表面无裂纹、分层、污染	合格
重量及尺寸	游标卡尺	各微单元外形尺寸公差-0.15mm~+0.15mm。	合格
电源与信号完整性测试	半导体特性测试仪	导通性测试和绝缘性测试符合要求	合格
基础功能	测试板卡 and 上位机	各单元电学功能正常；图像数据正常；测距误差>0.2m；测速误差<0.3m/s；静止零偏<0.05rad/s；静态气压波动<10Pa	合格
智能化测试	上位机电脑及测试软件	目标检测：人体、门窗、建筑物及无人机小目标检测，召回率、精确率与mAP 均≥90%；深度估计：abs_rel<10%，delta1>90%；ReID：Rank-1与mAP 均≥90%，推理速度达 10 FPS	合格
高/低温贮存	恒温恒湿试验箱	在温度（23±3）℃、湿度 40%~60% RH 条件下贮存 72 h 后，样品外观、电气性能和功能正常	合格

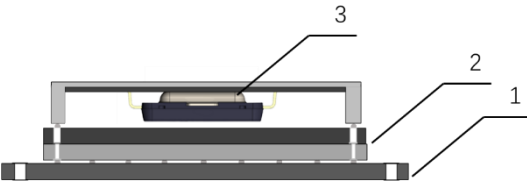
A. 3. 5 测试结论

该环境感知微系统在晶圆级、芯片级和系统级三个层级的测试结果均符合产品设计规范要求，判定为合格。

A. 4 导航制导微系统测试流程

A. 4. 1 测试对象

导航制导微系统由视觉惯性模组、多核处理模组和可编程接口模组等组成（如图A. 3所示），集成了CMOS视觉传感器、MEMS陀螺仪和MEMS加速度计等，具备高精度导航、自主定位与姿态解算的能力。



标引序号说明：
1——可编程接口模组，包括FPGA等；
2——多核处理模组，包括处理芯片等；
3——视觉惯性模组，包括CMOS视觉传感器和惯性传感器等。

图A. 3 导航制导微系统组成示意图

A. 4. 2 晶圆级测试

表A. 7给出了导航制导微系统中晶圆级测试的相关信息。

表A. 7 导航制导微系统晶圆级测试相关信息

子模块Wn	测试设备	测试结果	判定
材料成分	X射线光电子能谱仪	检测到Au元素，Au 4f5/2和4f7/2峰位分别为88.0 eV、84.2 eV，为金单质	合格
表面粗糙度	原子力显微镜	Ra = 0.5 nm（标称≤1 nm）	合格
厚度及均匀性	椭圆仪	硅结构层标称值30 μm，实测29.5 μm~30.2 μm	合格
方阻特性	四探针电阻测试仪	Rs = 250 Ω/□（标称230 Ω/□~270 Ω/□）	合格
几何尺寸	扫描电子显微镜	MEMS陀螺敏感结构设计值500 μm，实测498 μm	合格
刻蚀深宽比	扫描电子显微镜	深宽比20:1，侧壁倾角89.5°	合格
WAT测试	测试机台	电容值标称5 pF，实测4.9 pF~5.1 pF	合格
面内长度	光学干涉显微镜	设计值200 μm，实测199.5 μm	合格

A. 4. 3 芯片级测试

表A. 8给出了导航制导微系统中芯片级测试的相关信息。

表A.8 导航制导微系统芯片级测试相关信息

子模块Cn	测试设备	测试结果	判定
结构刚度	微纳力学测试仪	MEMS陀螺敏感结构刚度测量值85 N/m（设计80 N/m~90 N/m）	合格
硬度和杨氏模量	纳米压痕仪	硅结构层硬度12 GPa，杨氏模量160 GPa	合格
谐振频率	激光多普勒测振仪	陀螺驱动模态一阶谐振频率 12 kHz（设计11.8 kHz~12.2 kHz）	合格
品质因子	激光多普勒测振仪	Q = 130	合格
寄生阻容	LCR测试仪	寄生电容1.2 pF，寄生电阻0.4 Ω	合格

A.4.4 系统级测试

表A.9给出了导航制导微系统中系统级测试的相关信息。

表A.9 导航制导微系统系统级测试相关信息

子模块Sn	测试设备	测试结果	判定
外观结构	高倍率光学显微镜	各模组堆叠对齐，焊点无桥接，塑封体完整	合格
重量及尺寸	游标卡尺	重量≤50 g，外形尺寸公差<±0.2 mm	合格
电源与信号完整性测试	半导体特性测试仪	导通性测试和绝缘性测试符合要求	合格
基础功能	上位机、电源、数据采集卡、转台、平行光管	视觉惯性模组图像输出正常；陀螺仪零偏稳定性0.5°/h，加速度计零偏稳定性2 mg；测角误差三倍标准差<0.05°（3σ）；通信接口正常	合格
智能化测试	上位机电脑及导航解算软件	实时位姿解算精度0.1°，轨迹跟踪误差<0.5 m；自主路径规划成功率≥95%；障碍物识别准确率≥90%；导航信息更新频率≥100 Hz	合格
高/低温贮存	恒温恒湿试验箱	-40℃~+85℃范围内功能正常，性能漂移<1%	合格

A.4.5 测试结论

该导航制导微系统在晶圆级、芯片级和系统级三个层级的测试结果均符合产品设计规范要求，判定为合格。

参 考 文 献

- [1] GB/T 10623-2008 金属材料 力学性能试验术语
 - [2] GB/T 33252-2016 纳米技术激光共聚焦显微拉曼光谱仪性能测试
 - [3] GB/T 31228-2014 仪器化纳米压入试验 术语
 - [4] GB/T 2900.104-2021 电工术语 微机电装置
 - [5] GB/T 4365-2024 电工术语 电磁兼容
 - [6] GB/T 26262-2010 通信产品节能分级导则
 - [7] SEMI MS2 Test Method for Step Height Measurements of Thin Films
 - [8] SEMI MS4 Test Method for Young's Modulus Measurements of Thin, Reflecting Films
Based on the Frequency of Beams in Resonance
 - [9] GB/T 26112-2010 微机电系统（MEMS）技术 微机械量评定总则
-