

基于虚拟仪器的微波芯片 MPW 测试系统设计

俞利国, 虞书铭, 张 邓, 陈 浩

(南京国博电子股份有限公司, 南京 211111)

摘要: 为解决微波芯片多项目测试功能复杂、测试效率低、测试稳定性差等问题, 设计了一种基于虚拟仪器的 MPW 测试系统; 采用虚拟仪器作为软件工具编程语言, 设计以多项目测试为核心的探针台动作控制、仪器测试控制、数据采集与分析处理等功能, 并对测试硬件进行柔性化集成以实现微波芯片 MPW 测试系统; 经实验结果表明该测试系统可通过晶圆绘制分析软件工具制作 Wafer Map 下发至晶圆测试软件工具进行多项目位置识别, 按照设计的测试流程控制仪器与探针台, 可实现微波芯片的多项目晶圆测试任务; 该测试系统可柔性化应用于各类型的 MPW 测试场景, 相比常规晶圆测试系统无法高效完成多项目测试的局限性, 可大幅度提升微波芯片的多项目晶圆测试效率, 降低测试成本。

关键词: 微波芯片; 虚拟仪器; 多项目晶圆; 测试系统; 软件工具

Design of Microwave Chip MPW Testing System Based on Virtual Instrument

YU Ligu, YU Shuming, ZHANG Deng, CHEN Hao

(Nanjing Guobo Electronics Co., Ltd., Nanjing 211111, China)

Abstract: In order to solve the problems of complex test function, low test efficiency and poor test stability in multi-project testing of microwave chips, a multi-project wafer (MPW) testing system based on virtual instrument is designed, which uses virtual instrument as programming language of software tool, achieving functions such as probe station action control, instrument test control, data acquisition and analysis processing with multi-project test as the core. The testing hardware is flexibly integrated to achieve the MPW testing system for microwave chips. Experimental results show that the testing system can make the Wafer Map by the wafer drawing software tool and send it to the wafer test software tool for multi-project location identification. According to the designed testing process, the instrument and probe table can be controlled to realize the multi-project wafer test task of microwave chips. The testing system can be flexibly applied to different MPW testing scenes. Compared with the conventional wafer testing system, this system can efficiently complete multi-project testing, greatly improving multi-project wafer testing efficiency of microwave chips, and reducing testing costs.

Keywords: microwave chip; virtual instrument; multi-project wafer; testing system; software tool

0 引言

微波芯片是通信、雷达、传感器等配套的核心器件, 其性能优劣直接影响整个系统的综合性能。由于前道半导体工艺制程无法保证 100% 的成品率, 流片后需要对晶圆上每颗微波芯片进行在片性能与功能测试以剔除不良品^[1]。在产品研制阶段, 晶圆级测试主要用于验证器件正常工作和一致性, 可以获得器件早期特性以及可靠性数据分析, 相比产品设计定型后再进行产品可靠性和失效验证, 晶圆测试能够早期介入, 极大节约开发时间和成本, 例如台积电的多项目晶圆 (MPW, multi-project wafer) 服务, 将多客户芯片设计样品汇整到同

片测试晶圆投片, 可分摊晶圆成本, 快速完成芯片试产和验证, 减少初期投片成本最高 95%, 大幅度降低了 IC 设计公司成本; 艾迈斯欧司朗的面向全球开发的 MPW 服务, 将不同客户的多种设计需求集成到单片晶圆设计上, 由于晶圆和掩膜的成本由各个多项目晶圆客户均摊, 有效降低了代工厂客户的成本^[2]。而随着微波集成电路复杂度的增加, 降低集成电路开发的成本已经成为发展趋势。而 MPW 可降低企业研发成本, 加速微波芯片产品迭代, 促进微波特性的技术创新, 同时避免了因成本高昂导致的化合物晶圆闲置或浪费现象, 以此贯通设计公司、制造厂商、封装测试企业、科研机构等, 形成更完善的产业生态系统。MPW 的诞生是为了

收稿日期: 2025-04-10; 修回日期: 2025-06-05。

作者简介: 俞利国 (1987-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 俞利国, 虞书铭, 张 邓, 等. 基于虚拟仪器的微波芯片 MPW 测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(7): 130-138.

更有效地降低设计芯片新品的制版费用, 即在一块晶圆上制作多项目芯片从而降低芯片制造成本的方式, 但 MPW 的流片同时也提高了在片测试难度及成本, 因此对测试系统可实现多项目柔性化测试提出了更高要求。

同时业界主流的射频探针台供应商有美国的 Cascade、台湾的 MPI、国内的森美协尔等, 其探针台集成的晶圆 Map 图绘制软件支持的多项目 sub die 的编辑功能, 需设置多张 Map 图进行拼接测试, 无法实现柔性化多项目选择性自动测试。为解决该问题, 晶圆测试系统自身也需具备 Map 图编辑功能, 以主机的方式发送位置信息控制射频探针台进行多项目测试。而常规的晶圆测试系统以从机的方式接收射频探针台发送的芯片位置信息进行被动控制测试, 仅适用于单项目或少项目微波芯片测试, 以及人工进行多次介入操作从而实现微波芯片的多项目测试, 大大降低了测试效率, 且无法保证晶圆长期测试的稳定性、一致性等要求^[3-4]。由此对比分析在测试效率方面, MPW 测试中多种芯片项目共享晶圆, 常规测试系统针对单一或少数项目设计, 测试不同项目时, 常需要调整参数和配置流程, 导致测试时间长; 在兼容性方面, 不同 MPW 项目对测试系统的硬件和软件要求各异, 常规测试系统硬件架构和软件算法通常针对特定项目开发, 对多项目测试存在硬件部匹配、软件不兼容的问题; 数据管理方面, MPW 测试产生大量不同类型、不同项目的数据, 常规测试系统的数据管理模块相对简单, 难以对这些复杂多样的数据进行有效存储、管理和分析, 不利于数据追溯、对比以及产品质量评估, 难以及时发现生产问题和优化工艺; 在灵活性方面, 常规测试系统功能和架构固定, 难以快速适应 MPW 中市场需求变化或新产品测试要求。当需要增加新测试项目或改变流程时, 可能需大规模改造或升级系统, 影响正常生产进度。

以上存在的测试问题最终导致无法及时为芯片开发提供准确的反馈信息, 不利于快速发现芯片设计和制造过程中的问题, 增加了开发的迭代次数和时间成本, 影响微波芯片的性能优、产品质量提及成本大幅度增加。因此本文提出了基于虚拟仪器的微波芯片 MPW 测试系统设计方案。利用图形化编程软件开发平台 LabVIEW, 开发针对 MPW 测试所需的软件工具包, 作为整个测试系统的控制枢纽, 配合仪器设备控制探针台完成微波芯片的多项目晶圆测试任务^[5]。既能满足单项目微波芯片稳定测试, 又能实现微波芯片多项目高效测试。在加强测试系统的鲁棒性情况下, 提升各类型微波芯片组合测试效率, 降低了晶圆测试成本。

1 总体设计

本文提出的 MPW 测试系统主要解决微波芯片的多项目晶圆高效自动测试需求, 同时设计自动匹配控制指

令集功能以兼容大部分类型的半自动和全自动射频探针台交互, 与 MES、云数据库进行无缝对接, 实现了生产测试流程开报工、分布数据源的远程追溯与 Online 可视化分析, 相比本地或局域测试更具有自动化、安全稳定等特点。以此对 MPW 测试系统进行总体设计, 为满足微波芯片多项目测试、晶圆 Map 图管理、测试数据管理等层面的需求^[6]。以测试流程为基础, 集成了以多项目测试为核心的探针台动作控制、仪器测试控制、后端数据采集分析处理等功能, 形成了一个综合测试系统平台^[7]。按组成部分主要分为探针台设备、测试硬件集成、测试软件工具, 相互之间的交互关系如图 1 所示。

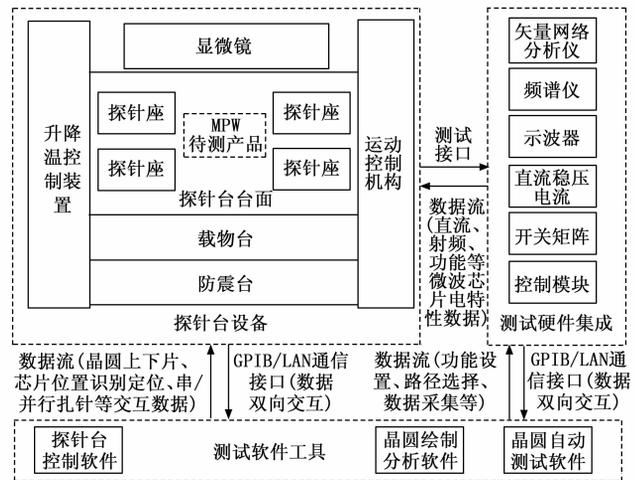


图 1 MPW 测试系统组成示意框图

其中探针台设备与测试软件工具之间通过 GPIB/LAN 等总线通信接口进行数据双向交互, 主要负责根据测试软件工具下发的控制功能需求, 解析并处理协议信息实现晶圆装载的自动上下片、载物台水平/垂直较平、微波芯片多项目位置识别定位、串/并行扎针等任务^[8]; 测试硬件集成包括测试仪器、开关矩阵模块、控制模块等, 与测试软件工具之间通过 GPIB/LAN 等总线通信接口进行数据双向交互, 主要根据测试软件工具下发的测试功能需求, 解析并处理协议信息控制测试硬件, 实现微波芯片晶圆的各项指标参数的一体化测试任务; 测试硬件集成与探针台设备间通过直流与射频测试接口, 实现了微波芯片的直流、射频、功能等电特性数据的传输; 而测试软件工具作为整个 MPW 测试系统的核心部分, 包括了晶圆绘制分析软件、晶圆自动测试软件以及探针台控制软件等工具包, 实现 Map 文件的制作、多项目芯片位置信息与控制指令下发、数据采集与信息交互、测试结果分析与处理以及最终报表的生成等任务^[9]。

2 硬件集成设计

硬件集成是基于微波芯片测试所需配备的测试仪器、开关矩阵模块、控制模块以及测试附件进行集成化

设计, 以实现一体化快速微波测试, 如图 2 所示。

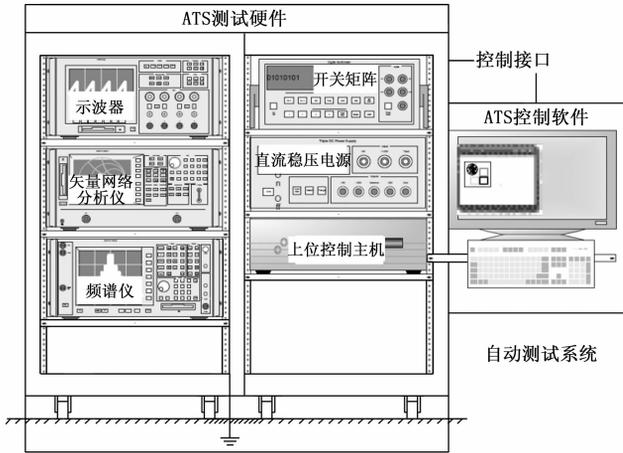


图 2 测试硬件集成框图

测试仪器主要涉及矢量网络分析仪、频谱仪、示波器、直流稳压电源等, 构成了测试系统高精度测试所需的核心部件; 开关矩阵模块主要实现微波芯片的端口与各测试仪器端口建立连接, 经过程序控制, 建立相应微波通路, 实现各参数对应所需仪器测试, 减少了工位间的传递和测试多次操作时间^[10]; 控制模块主要控制微波芯片按照制定的工作条件进行测试, 并控制开关矩阵的微波链路与仪器设备之间的关系; 测试附件主要包含射频线缆, 仪器通信接口及接线、射频转接器或射频探针卡、衰减器、耦合器等。因此各测试仪器的端口, 经开关矩阵模块的输入与输出连接后实现了唯一测试路径的收发传输端口, 同时通过控制模块来实现各仪器功能设置与微波传输路径的切换, 以及配套测试附件构成一体化的测试硬件集成的协同工作。整个测试系统硬件集成搭建后, 经晶圆测试软件一次点击测试, 相关控制指令经控制功能模块设置测试仪器所需微波芯片测试条件, 快速控制开关矩阵模块切换各参数对应仪器测试的唯一测试路径并进行数据采集上传至晶圆测试软件进行分析处理、结果显示、报表生成、数据存储等, 即可完成微波芯片的全参数自动测试。

3 软件工具设计

3.1 晶圆绘制分析软件

晶圆一般会分为拼版和单版晶圆, 其中拼版晶圆内包含多个种类的芯片, 又称多项目芯片晶圆 (MPW), 每种芯片的筛选测试条件、尺寸和 pad 等可能都不一样, 需要分多次切换才能完成测试, 主要应用于微波芯片的小批量试生产阶段。经过多次改版, 定型后会转为单版即为生产版, 整片晶圆内全部为同项目定型芯片, 单次配置后可连续测试, 不要进行切换测试。因此为兼容两种类型晶圆测试, 满足微波芯片的多项目晶圆高效柔性化自动测试需求, 需设计可编辑多项目 sub die 的

晶圆绘制功能的软件, 同时为解决测试生成的晶圆 Map 结果文件涉及的多项目处理功能需求, 需设计具有多项目晶圆结果分析的软件。因此结果绘制和分析两种需求, 设计了晶圆绘制分析软件。考虑软件工具的多样化需求, 因此在软件程序的编写语言选取上相比文本编程语言更注重图形化编程语言的开发效率和适用性。而 LabVIEW 是一种基于虚拟仪器技术是面向工程测试的开发环境, 内置大量的工具和函数可用于数据采集、分析处理、显示及存储, 大大缩短开发周期, 而且便于设计友好的人机交互界面。其核心为“软件及仪器”, 在不涉及硬件的改变情况下, 可以灵活定义所需的测试功能, 且集成了 VISA 库兼容各种接口总线, 便于与各类仪器设备进行握手通信^[11]。

本文基于 LabVIEW 的图形化编程语言设计了以满足通用化 Map 图分类绘制的晶圆绘制分析软件。该软件的绘制功能可以实现各类晶圆参数编辑, 关键参数包括: 晶圆尺寸、平边/缺口角度、边缘宽度; Die 尺寸, Die 内芯片分布; Sub Die 尺寸、数量等, 这些参数经晶圆绘制分析软件的功能界面输入相关信息, 进内部各功能程序解析成整个 Map 图所需包含的晶圆尺寸、单芯片尺寸及位置、以及各类芯片的分类布局等数据信息, 并与晶圆图控件的各属性进行绑定, 最终以晶圆中心为原点, 以极坐标方式将数据参数转换成各微波芯片着色区分的可视化 Map 图, 同时输出探针台设置可识别的文件格式, 即实现 Map 图的生成设置^[12]。在同一个版图里可设置微波芯片多项目种类坐标、尺寸, 实现一整张拼版。该拼版 Map 图文件信息可下发至自动测试软件, 根据各类微波芯片的坐标信息进行位置识别, 控制探针台实现多项目选择性测试, 解决需多次人工介入导入不同晶圆 Map 图及重新定位扎针, 实现多项目测试的难点, 其晶圆绘制功能界面如图 3 所示。

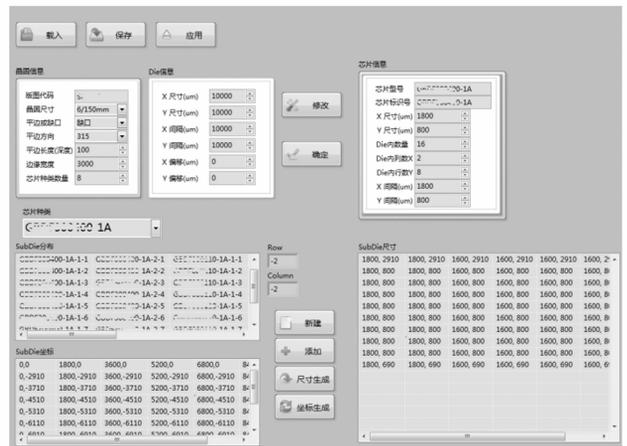


图 3 晶圆绘制功能界面

同时该软件的分析功能可以实现对测试生成的晶圆 Map 结果文件进行分析处理, 包含测试结果数据分析

处理、自定义结果 Map 图修改, Map 文件格式转换, Map 结果扩图、Map 外圈打点、多项目芯片指定坐标挑片、大数据文件拆分及合并等功能, 以此设计的晶圆分析功能界面如图 4 所示。

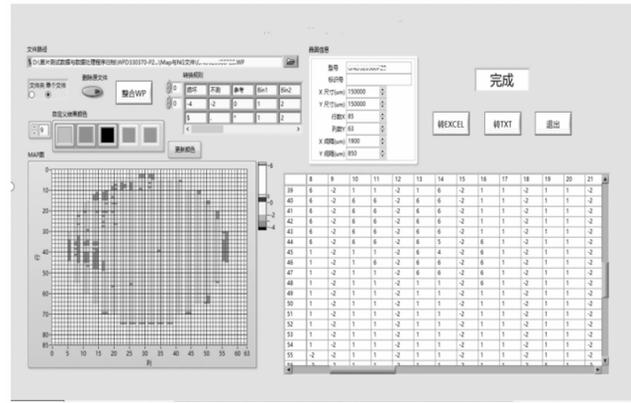


图 4 晶圆分析界面

该软件可以根据测试的多类型微波芯片的应用需求进行重新分档。根据自定义筛选条件, 自动对指标测试数据进行处理、分析, 最终按要求输出结果与 Map 图生成结果文件进行匹配对应。可重新划分 bin 及修改标识, 以满足晶圆划、挑设备文件分 bin 格式要求, 兼顾解决多项目的高效挑片难点。

3.2 探针台控制软件

探针台的常规和拓展功能程控, 是整个晶圆测试最关键的部分。主要包括探针台的上下片操作、接触分离、Die&SubDie 移动、XYZ 轴移动、辅助盘移动、真空开关、晶圆参数载入或调用、校准晶圆起伏等^[13]。不同型号探针台类型具备相似的晶圆测试流程, 为实现通用控制设计, 需将不同型号探针台的主要操作对应的程控指令编入指令集内。通过软件界面选择探针台类型来实现不同功能自动匹配控制指令, 控制功能的增加也会更加便捷, 部分指令集如表 1 所示。

为实现 MPW 自动测试, 需将探针台控制的主要功能集成设计标准的探针台控制软件, 晶圆自动测试软件可以通过该探针台控制软件来实现微波芯片多项目子 die 的移动定位及扎针, 以及控制探针台实现常规和扩展功能。可以通过软件程控对晶圆的多项目芯片进行单步测试调试, 以分阶段验证自动测试流程的准确性, 保证微波芯片多项目晶圆测试的稳定性。基于各功能控制需求设计探针台控制软件如图 5 所示。

该软件打开运行时后台程序会自动与探针台进行握手通信交互以匹配对应机型的控制指令。握手通信成功后, 可以通过点击探针台控制软件界面的上下片操作、接触分离、Die 移动等控制功能按钮, 即可触发对应控制指令集下发给探针台设备完成相应动作控制, 以解决不同探针台远程控制与简化单步程控测试芯片的难点。

表 1 探针台主要指令集

指令名称	MPI 机型	CASCADE 机型
接触	move_chuck_contact	:mov;cont 2
分离	move_chuck_separation	:mov;sep 2
下个 Die	map:step_next_die	/
上个 Die	map:step_previous_die	/
第一个 Die	map:step_first_die	/
最后一个 Die	map:step_last_die	/
下个子 Die	map:subsite:step_next	/
上个子 Die	map:subsite:step_previous	/
设置晶圆直径	map:set_diameter%s	/
设置参考点	map:set_prop die_reference,%s	/
设置 homeDie 索引	map:set_home_die%s	/
设置 homeDie 坐标	status:set_prop home,chuck,wafer,%s	/
设置 Die 参数	map:set_grid_params%s	/
获取 Die 参数	map:get_grid_params	/
选择测试 Die	map:path:select_dies%s	/
移动到指定 Die	map:step_die%s	/
移动到指定子 Die	map:subsite:step%s	/



图 5 探针台控制软件界面

3.3 晶圆自动测试软件

针对晶圆测试可通过晶圆绘制分析软件和探针台控制软件组合, 实现多项目芯片晶圆的 MAP 图绘制和探针台的功能控制, 满足人工操作的微波芯片的多项目单步测试。而实现自动测试, 则需要进行自动测试软件整体架构设计。

本文基于 LabVIEW 的图形化编程语言的用户事件处理器模式, 设计人机交互方式的晶圆自动测试软件界面。该软件内部通过控制接口总线将测试仪器与计算机相连, 发送命令, 接收数据, 控制系统中各仪器切换测试路径完成测试工作。而 MPW 自动测试机理则为自动测试软件接收晶圆绘制分析软件下发的 Wafer Map 文件所包含的多项目位置的配置信息。识别同项目芯片的位置信息, 进行扎针完成整个测试流程。当该晶圆上同项目的芯片结束测试后, 程控探针台的 Chuck 盘中心

复位到 Home Die 位置。根据下个项目的首颗微波芯片的 die 位置进行识别定位并扎针测试, 持续循环进行移动→扎针→测试动作, 直到完成该项目的微波芯片测试。以此进行多项目连续测试, 实现微波芯片的 MPW 测试功能。而按照自动测试软件涉及的功能模块, 结合实际晶圆单项目微波芯片自动测试要求, 兼容不同类型半自动或全自动探针台的自动测试步骤^[14]如表 2 所示。

表 2 晶圆自动测试步骤

测试步骤	功能分类	功能实现
晶圆参数载入	人工操作/设备控制	载入晶圆尺寸, Die 与 Sub-Die 信息等
校准	人工操作/设备控制	对参数测试的误差模型进行修正
上片	设备控制	晶圆上片, 设置或调用晶圆参数信息
调平	人工操作/设备控制	校准晶圆 X 轴水平
定位	设备控制	定位 HomeDie
校准测试区域	设备控制	晶圆偏移校准
校准晶圆起伏	设备控制	晶圆起伏校准
首次扎针	人工操作/设备控制	选择合适的接触高度进行扎针
测试	仪器采集	控制测试仪器进行数据采集
移动→扎针→测试	设备控制	控制晶圆上下片、Chuck 移动、扎针
清针	设备控制	选择合适的测试次数及接触高度进行清针操作
实时结果显示	软件显示	实时显示当前测试数量, 合格率, Map 图信息等
多项目切换	设备控制	可自定义微波芯片多项目组合测试方式, 项目测试结束后 Chuck 盘中心自动复位到 Home Die 启动下个项目测试
NG 复测	设备控制	根据测试结果可指向性对某些芯片进行复测
生成结果文件	软件处理	整片晶圆测试完成后, 生成划片用 .wp 文件; 挑片用 .txt 格式 map 文件

1) 晶圆参数载入:

经晶圆绘制分析软件形成了微波芯片 MPW 的 Map 图信息载入到晶圆测试软件中, 识别晶圆参数配置: 芯片型号, 晶圆尺寸, 缺口/平边角度, 边缘宽度, Index XY 值 (Die 尺寸), Group XY 值和分布 (Sub Die 尺寸和 Sub Die 分布) 等。

2) 校准:

在测试前对射频探针需要进行校准, 目的是确保高频测试的准确无误, 这一点十分重要。软件需要能够提供多种可供选择的方法, 从简单的校准到非常复杂的校

准, 范围十分宽泛。校准越复杂, 批量测试中的测量结果也将越精确。对微波芯片 S 参数测试最准确的是采用 TRL 的校准方法, 它不仅解决了标准 50 Ω 负载难以制备的问题, 更通过测量传输标准和反射标准件来决定多项误差模型。因该 S 参数校准的过程较为繁琐, 时间较长, 若对测试精度不敏感的情况下, 本系统也可调用相关的自动校准软件, 采用去嵌式的方式进行快速自动校准, 大大地减少了测试前的校准时间。

3) 上片:

不同的探针台的上片模式有所区别, 其中半自动探针台一般是前门手动上片, 且载物盘一次仅可装载 1 片。测试程序通过程控上片, 同时可识别 Chuck 盘有无圆片状态 (自动禁用上下片按钮), 避免重复操作; 全自动探针台是侧边载物架自动上片, 且载物架一次可装载多片。测试程序通过程控进行连续上下片, 直到全部晶圆测试完成。

4) 调平:

调平是把上片后的晶圆角度调整至 X 轴水平, 只有在该情况下, Chuck 盘才能按照固定步进移动而不产生偏移。半自动探针台提供了两种调平方法: 一是两点调平, 人工操作先后定位晶圆同一 X 轴水平的两个具有一定间距的参考点, 利用直线三角形斜边与直角边计算角度偏移角度, 间距越大, 角度计算越精准; 二是图像识别自动调平, 人工操作框选晶圆较为标志且易识别的区域图像, 探针台根据预设的晶圆尺寸进行 XY 轴水平垂直移动校准, 其原理与一类似, 校准精度取决于框选图像的独特性和图像识别率^[15]。此外, 设备提供了快速直线调平, 人工可拖动一条拟合直线实现显示区域的快速调平, 主要用于校准或快速的扎针试验。无论哪种方式, 半自动探针台调平都需要人工介入; 全自动探针台在上片后, 无需人工操作, 设备自动识别划片道等图像, 直接实现调平。

5) 定位与校准测试区域:

部分晶圆其内部 Die 的分布并非是完全中心对称的, 会存在一定程度的偏移, 但同型号的晶圆偏移是一致的。因此首片上片后 Map 图测试区域的校准非常关键, 前提条件是需要设置边缘宽度并定位 Home Die, 确保晶圆内芯片的总测试数量和成片率。半自动探针台需要人工定位 Home Die, 调整 Chuck 盘的 XY 轴偏移, 同时框选待测 Die 和 Sub Die。同型号晶圆上片后人工无需再校准, 但需重新调平和定位; 全自动探针台仅首片晶圆需要人工操作框选识别用图像, 定位边缘芯片, 生成待测 Map 图, 仅能承载一种芯片的数据。针对拼版晶圆, 则需要多次设置晶圆参数、定位和测试区域校准^[16]。

6) 校准晶圆起伏:

晶圆在出厂时, 都会存在一定程度的翘曲, 因此为

避免测试过程中仅使用同一个扎针深度导致晶圆的测试性能丢失或偏差, 需要进行晶圆起伏校准。

半自动探针台通过显微镜在分离状态下对晶圆几个角度的点进行分别的高度对焦, 可以拟合出整片晶圆的翘曲率, 该功能可通过程控实现, 如图 6 所示。全自动探针台含侧面 CCD 可自动判断扎针高度, 无需人工干预^[17]。

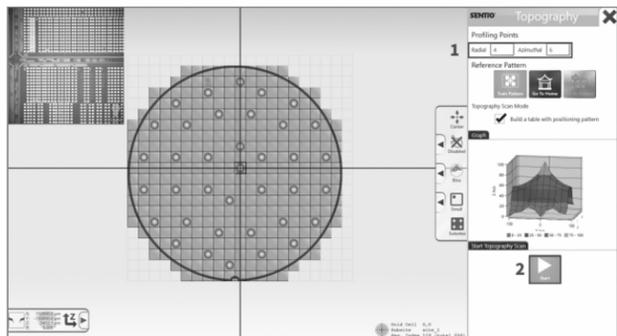


图 6 晶圆起伏校准示意图

7) 扎针测试:

测试开始前, 探针台移动到第一个待测 SubDie, 并处于接触状态(即 Z 轴抬升状态, 该状态下几乎所有探针台都有移动保护功能, 避免人工误操作导致晶圆划伤或探针损坏), 此时人工操作探针进行扎针, 后续芯片扎针依靠 Chuck 盘“分离—移动—接触”实现。在该环节需要注意的是, Chuck 盘是严禁移动的, 操作人员只能调整探针和显微镜位置来对准第一颗被测芯片^[18]。扎针具有软接触功能, Chuck 盘即将接触时抬升速率降低, 可以保证扎针的稳定。若为提升测试效率, 可关闭软接触功能。

8) 测试结果实施显示:

点击开始测试后, 软件提示输入测试文件存储地址, 测试结果会实时显示在左下角表格和右侧框图内。表格内会显示包括芯片序号, 测试分 Bin, 各项测试指标合格与否; 框图则依次显示测试总量、Pass、Fail、合格率和单片测试时间, 如图 7 所示。单片测试完成后 Chuck 盘分离→移动→接触, 执行完成后设备返回移动结束信息, 主机执行测试模块, 执行完成后继续上述操作直到全部芯片测试结束。

9) 清针:

反复扎针情况下, 探针带起 pad 点金属, 可能导致探针状态不稳定, 影响测试结果, 因此定期清针是必要的。半自动探针台需通过程控实现清针操作, 扎针次数达到预设值(例如 1 000 次)后, 设备移动至辅助载物台(固定好清针片), 根据预设高度反复扎针分离(3 次或更多), 回到 Chuck 盘清针前位置继续测试; 全自动探针台为设备内预设功能, 可直接设置高度和清针次



图 7 晶圆自动测试软件界面

数等, 无需外部程控^[19]。

10) 多项目切换:

自动测试软件根据 Map 图导入的信息对不同项目的微波芯片进行了标记, 当完成该晶圆上同项目的芯片测试后, 自动切换下个项目的首颗微波芯片的 die 位置进行识别定位并扎针测试, 持续循环进行移动→扎针→测试动作, 直到完成该项目的微波芯片测试流程, 并继续切换至下个项目, 最终完成整个晶圆全部项目的测试。

11) NG 复测:

在测试过程中, 有时会因为探针表面有污染、晶圆某一块较薄等原因导致探针不能完美的接触到芯片的 Pad 点上, 这使得测试数据不准确, 达不到工艺合格条件。若不进行再次测试这些芯片会误判不合格, 产生大量的浪费。但由操作人员对这些芯片手动再次进行测试又会降低晶圆测试效率。所以 NG 复测功能对于晶圆自动测试流程是必不可少的。NG 复测模式下操作人员将初测时生成的结果文件导入, 系统根据结果文件中芯片的分 bin 情况对性能不合格的芯片进行复测。根据每条数据中芯片的位置信息, 程控探针台移动到相应位置, 对该位置的芯片进行重新测试。在所有性能不合格的芯片复测完成后, 复测产生的新数据会将初测结果文件中对应的数据进行替换, 生成最终结果文件提供给下一步工序。

12) 结果文件生成和数据重筛:

单片晶圆测试完成后, 除生成常规测试结果“.csv”格式文件和 Map 图文件, 也可转换为对应后道工序所需的划片用“.wp”格式文件与挑片用“.txt”格式文件。同时在测试结果生成后, 会根据芯片分布情况重新划定筛选要求, 此时芯片需重新定义条件进行分档。该情况下更改条件重新测试过于繁琐, 因此针对结

果数据的重筛是不可避免的^[20]。

晶圆测试软件提供了测试结果数据重筛模块，测试人员根据程序的引导填写芯片、晶圆的的基本信息并导入要进行筛选的测试结果数据、各个档位的筛选条件。程序会对每一条数据进行筛选验证，识别出该条数据是否合格、分到哪个档位的的结果文件。结果文件中会生成各个测试项判断频段内的极大值与极小值数据方便相关人员核验。在筛选完成后，程序会生成相关的筛选结果报表显示各档位的芯片个数、占比以及总合格数和合格率。

4 实验结果与分析

本测试系统实现的核心关键在于微波测试硬件集成与晶圆软件工具，其中测试硬件集成可满足各类微波芯片的测试项目；晶圆软件工具可实现探针台动作控制、仪器测试控制、数据采集与分析处理。以此实验晶圆绘制分析软件工具制作 Wafer Map 下发至晶圆测试软件工具进行多项目位置识别，按照设计的测试流程控制器与探针台，实现微波芯片的多项目晶圆测试任务。

基于虚拟仪器的微波芯片 MPW 测试系统的工作原理和各组成部分的硬件集成、软件工具设计要求，根据涉及到的微波芯片种类及测试指标项如表 3 所示，对测试系统进行了柔性化集成，以满足各类微波芯片通用化测试所需。

表 3 微波芯片测试项

芯片种类	测试项目	仪器类型
功率放大器	I/V、S 参数、P-1、饱和输出功率、饱和 S 参数等	矢网、前置驱动、开关矩阵、电源
低噪声放大器	I/V、S 参数、P-1、噪声等	矢网、电源
移相器/时延器	S 参数、移相、时延、寄生调幅等	矢网、电源
衰减器	S 参数、衰减、寄生调相等	矢网、电源
幅相多功能	I/V、S 参数、P-1、噪声、移相、寄生调幅、衰减、寄生调相、时延、饱和和功率等	矢网、电源
收发多功能	I/V、S 参数、P-1、噪声、移相、寄生调幅、衰减、寄生调相、发射小信号 S 参数、饱和 S 参数、饱和输出功率、时延等	多端口矢网、电源
分频器/倍频器/混频器	变频 S 参数、基波抑制、输出功率、隔离度等	多端口矢网、电源
功分器/耦合器	S 参数、耦合度、通道间幅相一致性等	多端口矢网
开关/限幅器	S 参数等	矢网
滤波器	S 参数、带内平坦度、阻带抑制等	矢网

整个测试系统组成主要包含：探针台、矢量网络分析仪（集成了噪声、交调、频谱等选件）、电源、测试工装、测试附件和计算机，最终完成实物集成设计如图

8 所示。



图 8 MPW 测试系统实物图

采用该 MPW 测试系统对某型的微波芯片多项目晶圆进行测试验证，以判定是否满足 MPW 测试场景的使用需求。

对 MPW 测试系统的自动测试软件进行操作，载入某型微波芯片的多项目晶圆信息、Die 信息、芯片信息，以及 Die 与 Sub Die 分布、坐标和尺寸，如图 9 所示。



图 9 晶圆参数载入示意图

导入参数后，为确保晶圆测试结果的准确性，需对 MPW 测试系统配套测试仪器进行校准，针对矢量网络分析仪的 S 参数、噪声、交调、频谱等测试功能在对应微波芯片的测试频点、测试带宽、测试激励等条件下进行设置后进行逐项校准。测试仪器设置校准后，对 MPW 测试系统配套的自动探针台进行功能设置，并按照 MPW 测试系统的测试流程方式执行，具体扎针测试如图 10 所示。

该实验表明了 MPW 测试系统的测试硬件集成可满足微波芯片的测试项目，其软件工具可以实现对探针台动作控制、仪器测试控制。可通过软件自行导入多芯片参数，并控制探针台识别不同芯片位置信息进行自动扎针。因此针对多芯片 Map 图导入的测试效率、人工介入扎针的测试稳定性的实验结果，与常规测试系统进行对比情况如表 4 所示。

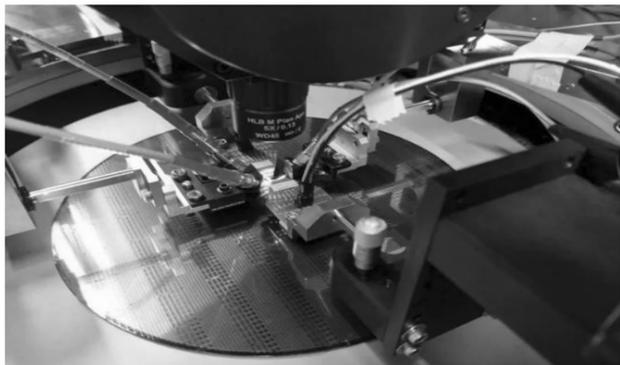


图 10 晶圆探针测试示意图

表 4 测试效率、测试稳定性实验结果对比表

类型(例如 10 种不同项目芯片)	测试效率(Map 图导入)/次数	测试稳定性(扎针人工介入)/次数
常规测试系统	10	10
MPW 测试系统	1	1
提升情况	90%	90%

从以上数据可知, MPW 测试系统相比常规测试系统在微波芯片多项目晶圆类型情况下只需进行一次导入多芯片 Map 图和一次人工介入扎针定位, 后续通过软件来实现自动识别和扎针完成整个测试流程, 大大提升了微波芯片多项目晶圆的导入测试效率和扎针测试稳定性。

点击开始测试, 自动测试软件对测试过程情况进行实时显示, 测试框图依次显示同项目测试总量、Pass、Fail、合格率和单片测试时间; Map 图实时显示标记对应坐标测试结果, Pass 为绿, Fail 为红。当完成该晶圆上同项目的芯片测试后, 程控探针台的 Chuck 盘中心复位到 Home Die 位置。根据下个项目的首颗微波芯片的 die 位置进行识别定位并扎针测试, 持续循环测试动作, 直到完成该项目的微波芯片测试。以此进行多项目连续测试, 实现微波芯片的 MPW 测试功能, 如图 11 所示。

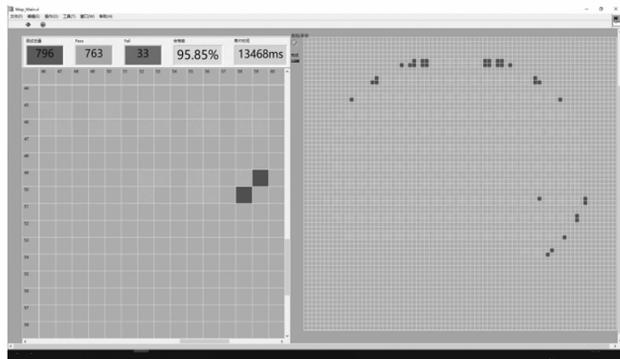


图 11 测试过程实时显示示意图

测试结束后, MPW 测试系统的自动测试软件会自

动生成本地存储测试结果的“.csv”格式文件。同时会主动与 MES、云数据库进行源数据对接上传相关测试结果, 并依据 Map 图文件自定义转换生成以适配划片机的“.wp”格式与挑片机的“.txt”格式的文件。

该实验表明了 MPW 测试系统的软件工具可以实现数据采集与分析处理。可通过软件完成多芯片自动切换测试, 对数据进行采集与分析处理, 并生成可兼容不同机型的划挑设备的 Map 图格式。因此针对多芯片切换测试效率、不同 Map 图格式转换的兼容性的实验结果, 与常规测试系统进行对比情况如表 5 所示。

表 5 测试效率、测试兼容性实验结果对比表

类型(例如 10 种不同项目芯片)	测试效率(测试切换人工介入)/次数	测试兼容性(MAP 图文件格式)/类数
常规测试系统	10	1
MPW 测试系统	1	多类型
提升情况	90%	自定义

从以上数据可知, MPW 测试系统相比常规测试系统在在微波芯片多项目晶圆类型情况下只需进行一次人工介入切换芯片测试和多类型的 Map 图格式输出, 后续通过软件来实现自动切换测试和自定义 Map 图生成, 大大提升了微波芯片多项目晶圆的切换测试效率和 Map 图的测试兼容性。

通过实验结果表明该 MPW 测试系统可以按照设计的测试流程, 配合仪器设备控制探针台完成微波芯片的多项目晶圆测试任务。同时相比常规晶圆测试系统无法高效完成多项目测试的局限性, 该测试系统可柔性化应用于各种类型的 MPW 测试场景。

5 结束语

本文针对微波芯片的多项目晶圆高效测试需求, 设计了一种基于虚拟仪器的 MPW 测试系统, 并详细介绍了测试系统的工作原理、硬件集成、软件工具的设计与实现, 以及自动测试流程涉及的各个步骤。对该 MPW 测试系统进行了测试验证, 结果表明该系统设计包含的晶圆绘制分析软件工具可以自定义制作 MPW 测试所需的 Wafer Map 文件, 经晶圆自动测试软件加载信息后进行多项目位置识别, 可按照设计的测试流程完成微波芯片的多项目晶圆测试任务。解决了微波芯片 MPW 测试复杂、效率低, 以及多项目测试人工操作影响测试稳定性、一致性问题, 在降低测试成本的同时也提升 MPW 测试质量, 具有很好的工程应用价值。

参考文献:

[1] 丁旭, 王志宇. 一体化晶圆级 MMIC 自动测试技术研究[J], 国外电子测量技术, 2020, 39 (12): 95 - 103.
 [2] WU A, FU X, LIU C, et al. Optional design of passive de-

vices for verifying on wafer noise parameter measurement systems [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69 (6): 2837 - 2844.

[3] 蔡晓峰, 余凯, 邓敏, 等. 浅谈 AI 智能技术在晶圆测试生产中的应用 [J]. 中国集成电路, 2024, (303): 76 - 80.

[4] 陈兴, 樊渝, 李梦琪. 一种 9 端口微波多功能收发芯片在片测试技术 [J]. 封装、检测与设备, 2022, 47 (4): 332 - 335.

[5] 徐天琪, 杜磊, 张殿龙. 基于虚拟仪器技术的 77GHz 毫米波雷达项目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.

[6] 白海斌, 孙玉伟. 微波设备自动测试系统设计 [J]. 软件, 2021, 42 (8): 129 - 131.

[7] 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, (295): 82 - 83

[8] 吕磊. 自动真空探针台技术研究 [J]. 电子工业专用设备, 2020, 49 (3): 66 - 70.

[9] 陈金远, 焦芳, 王逸铭, 等. GaAs 多功能 MMIC 在片测试系统设计 [J]. 电子与封装, 2021, 21 (3): 030204.

[10] 祝军生, 胡顺平, 李明军, 等. 微波开关自动测试系统 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32 (5): 31 - 37.

[11] 黄彬, 张春, 王乐平. 基于 LabVIEW 的座椅耐久性可视化测试系统 [J]. 电子测量技术, 2022, 45 (10): 33

- 38.

[12] 吕磊, 胡晓霞, 郑如意. 晶圆级微波测试工艺研究 [J]. 电子工业专用设备, 2021, (287): 46 - 51.

[13] 韩笑, 鲍军其, 张新, 等. 晶圆探针台结构振动模态分析研究 [J]. 微纳电子与智能制造, 2022, 4 (1): 88 - 93.

[14] 王金萍. 集成电路工程化测试方法研究 [J]. 电子与封装, 2020, 20 (1): 11 - 13.

[15] 李斌. 基于数字孪生技术的晶圆级测试平台 [J]. 电子工业专用设备, 2020, (296): 32 - 35.

[16] 谷帆, 詹永卫, 唐昱龙. 一种微波探针可靠性测试系统设计 [J]. 电子制作, 2023, (11): 54 - 56.

[17] 唐彩彬. 基于 ATE 的 USB PD 快充协议芯片晶圆测试 [J]. 电子与封装, 2022, 22 (3): 030203.

[18] 李明远, 董亚宁, 王威, 等. 基于晶圆测试的探针卡设计及测试方法研究 [J]. 电子元器件与信息技术, 2023, (7): 7 - 11.

[19] QIN A, WU L S, SHI L Y, et al. Impact of on-wafer probe on radiation measurement of a filtering antenna-in-package [J]. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 2021: 1201 - 1203.

[20] DOU B F, LIU Y, ZHU C M, et al. Design of fan-out wafer level packaging for 5G CMOS transceiver chip [J]. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 2021: 481 - 483.

(上接第 129 页)

[6] 魏瑀皓, 黄松, 黄亚妮. 基于改进 YOLOv7 的卫星遥感影像多尺度目标检测方法 [J]. 航天返回与遥感, 2024, 45 (2): 153 - 162.

[7] 郭健, 王得成, 张宏钢, 等. 基于孪生 Transformers 的遥感目标多元变化检测方法 [J]. 火力与指挥控制, 2023, 48 (5): 130 - 137.

[8] 熊风光, 董彪, 张鑫, 等. 基于改进 Mask RCNN 算法的遥感建筑物检测 [J]. 计算机工程与设计, 2023, 44 (1): 218 - 223.

[9] 张洋, 夏英. 多尺度特征融合的遥感图像目标检测方法 [J]. 计算机科学, 2024, 51 (3): 165 - 173.

[10] 兰旭婷, 郭中华, 石甜甜, 等. 融合 SPP 与 FPN 的光学遥感图像飞机目标检测 [J]. 电光与控制, 2023, 30 (4): 6 - 11.

[11] 吴奇鸿, 张斌, 段功豪, 等. 改进 DETR 的高分辨率遥感影像建筑物检测方法 [J]. 遥感信息, 2024, 39 (1): 146 - 156.

[12] 张善文, 邵彧, 李萍, 等. 基于多尺度 U-Net 与 Transformer 特征融合的航空遥感图像飞机检测方法 [J]. 弹箭与制导学报, 2024, 44 (3): 51 - 58.

[13] 张顺, 赵倩, 赵琰. 基于多分支融合网络的遥感飞机检测算法 [J]. 电光与控制, 2023, 30 (3): 107

- 111.

[14] 陈立, 张帆, 郭威, 等. 面向遥感图像的多阶段特征融合目标检测方法 [J]. 电子学报, 2023, 51 (12): 3520 - 3528.

[15] 谢涛, 陈施施, 瞿建华, 等. 结合自适应形态属性剖面与决策融合的高分遥感变化检测 [J]. 遥感技术与应用, 2024, 39 (3): 536 - 546.

[16] 张正, 马渝博, 柳长安, 等. 面向遥感图像旋转目标检测的双向衰减损失方法研究 [J]. 电子与信息学报, 2023, 45 (10): 3578 - 3586.

[17] 杨雨迪, 葛海波, 辛世澳, 等. 融合超分辨率和特征增强的轻量化遥感图像小目标检测 [J]. 计算机工程, 2024, 50 (11): 284 - 296.

[18] 韦少凡, 张琼. 无人机激光雷达遥感图像显著性目标检测方法 [J]. 机械设计与研究, 2024, 40 (2): 69 - 72.

[19] 杨桃, 金椿柏, 任春颖, 等. 面向目标检测的视觉注意力机制波段选择研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44 (1): 266 - 274.

[20] 孙得耀, 朱明, 王佳荣. 遥感图像目标检测的相似目标替换增广算法 [J]. 液晶与显示, 2024, 39 (6): 813 - 821.