


INNOVATION ROADMAP FOR METROLOGY  
AND TESTING TECHNOLOGY OF  
CHINA IC INDUSTRY

# 中国集成电路检测和 测试产业技术创新路线图

集成电路测试仪器与装备产业技术创新联盟◎编

INTEGRATED  
CIRCUIT

 中国工信出版集团

 电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

# 中国集成电路检测和测试产业技术创新路线图

集成电路测试仪器与装备产业技术创新联盟 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书就集成电路检测与测试需求、技术和产品进行了阐述和说明,以促进中国集成电路产业更快更好地发展。全书共6章,系统分析了国内测试产业实现产业技术链创新发展和追赶国际相关产业的主要方向,包括集成电路工艺控制检测、自动化测试和电力电子测试技术与产品,另外介绍了测试服务的创新发展和主要趋势,以及军用与民用集成电路测试差异性与技术发展,最后对封装测试的市场格局进行总结。

本书可供各级政府部门、企事业单位作为参考资料使用,供集成电路相关领域的管理者、科技工作者阅读和参考,也可供高等院校相关专业研究生和高年级本科生参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

中国集成电路检测和测试产业技术创新路线图/集成电路测试仪器与装备产业技术创新联盟编. —北京:电子工业出版社,2019.3

ISBN 978-7-121-36058-9

I. ①中… II. ①集… III. ①集成电路产业—技术革新—研究—中国 IV. ①F426.63

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第035348号

策划编辑:徐蔷薇

责任编辑:徐蔷薇 文字编辑:王群

印刷:北京天宇星印刷厂

装订:北京天宇星印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开本:720×1000 1/16 印张:10.75 字数:188千字

版次:2019年3月第1版

印次:2019年3月第1次印刷

定价:69.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltts@phei.com.cn](mailto:zltts@phei.com.cn),盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式: [xuqw@phei.com.cn](mailto:xuqw@phei.com.cn)。

# 编委会

指导委员会主任：叶甜春

指导委员会成员：李立功 华克路 王蔚 夏鑫

主 编：雷瑾亮

副 主 编：陈鲁 朱小荣 张志勇 于文震

张波 黄子河 王文武 由春娟

袁宇峰 刘洪春

编 委：（以姓氏笔画为序）

马创新 马鸿健 王钢 刘伟平

刘涛 冯仁迪 朱玉萍 祁建华

余琨 肖志强 何纪法 张海峰

张波 杨乐 罗斌 徐丰

徐勇 高巍 黄有为 章慧彬

郭良权 曹立强 康劲 程卫华

韩立 雷震霖 蔡琳 颜志耀

# 前 言

集成电路是信息时代的核心基石，其发展水平已经成为衡量一个国家现代化水平和综合实力的重要因素。当前，随着云计算、大数据、物联网、人工智能、5G 通信、智能制造等新兴技术和领域的出现，市场驱动要素发生重大变化，集成电路产业迎来了新一轮发展高峰。

受益于国家对集成电路产业的大力支持，以及全球集成电路产业向中国加快转移的趋势，中国的集成电路发展迎来了历史性的机遇。国家科技重大专项的确立及《国家集成电路产业发展推进纲要》的实施，极大地带动了我国集成电路产业的技术创新、产业投资与竞争能力的提升，逐步形成良性发展的产业格局。

检测与测试是集成电路设计与制造过程中不可或缺的关键环节，其贯穿芯片制造全过程，包括设计过程中的可靠性分析与验证、制造过程中的工艺品质检测、封装过程中的产品功能与性能测试等。集成电路检测与测试的技术与设备为新材料、新结构和新工艺的研发提供了重要支撑，在提高集成电路行业整体制造水平方面具有重要意义。然而，在中国的集成电路产业链中，检测与测试属于薄弱环节，市场仍由海外制造商绝对主导，全行业发展处于摸索阶段。伴随着后摩尔时代的来临，集成电路整体解决方案日趋复杂，失效故障测试模型不断演化，集成电路检测与测试的重要性日益凸显。

“十九大”明确提出“加快建设制造强国，加快发展先进制造业，推动互联网、大数据、人工智能和实体经济深度融合”，习近平总书记近期多次

强调大国重器必须掌握在自己手中。在此背景下，在国家科技部重大专项司的支持下，在集成电路产业技术创新联盟的指导下，集成电路测试仪器与装备产业技术创新联盟牵头，联络发动我国集成电路检测与测试核心力量，自2017年7月开始，经过多方努力，组织撰写形成了本书。本书借鉴国际集成电路测试技术的新趋势，面向中国集成电路检测与测试产业链的发展和创新发展需求，以国内集成电路检测与测试产业发展为主要对象，提出了中国集成电路检测与测试产业链技术创新发展路线，主要内容为集成电路检测与测试需求、技术和产品，力求务实并具有针对性，希望引起读者，特别是集成电路从业人员和学者的重视和思考，对我国集成电路产业健康、良性发展有所推动和裨益。

叶甜春

2019年3月

# 目 录

<b>第一章 集成电路工艺品质控制检测技术与产品</b> .....	<b>1</b>
一、集成电路产业中的工艺品质控制概况.....	1
(一) 集成电路产业链与工艺品质控制检测布局.....	1
(二) 工艺品质控制检测技术和设备发展趋势.....	2
(三) 工艺品质控制检测设备市场整体情况.....	4
二、硅制程(前道)中的关键工艺品质控制检测技术与设备.....	4
(一) 图形化表面检测技术与设备.....	7
(二) 无图形表面检测技术与设备.....	20
(三) 光刻套刻对准测量技术与设备.....	23
(四) 其他分析及检测技术与设备.....	25
(五) 前道制程中的工艺品质控制检测的整体发展趋势.....	26
三、晶圆级封装(中道)中的关键工艺品质控制检测技术与设备.....	29
(一) 三维表面形貌测量技术与设备.....	30
(二) 自动光学检测技术与设备(中道).....	35
(三) 无图形表面检测技术与设备.....	37
(四) 中道制程中的工艺品质控制检测的整体发展趋势.....	37
四、基板与传统封装测试(后道)中的关键工艺品质控制检测技术与设备.....	38

(一) 自动光学检测技术与设备(后道)	38
(二) 自动 X 射线检测技术与设备	41
(三) 后道制程中的工艺品质控制检测的整体发展趋势	42
<b>第二章 自动化测试设备技术与产品</b>	<b>43</b>
一、芯片/模组测试市场需求及发展趋势	43
(一) 电源管理类芯片的测试需求及趋势	47
(二) CIS 芯片的测试需求及趋势	47
(三) 逻辑/混合信号芯片的测试需求及趋势	49
(四) 存储器芯片的测试需求及趋势	52
(五) LCD Driver 芯片的测试需求及趋势	54
二、ATE 自动测试机械手的现状及发展方向	56
三、模拟及电源管理芯片 ATE 设备发展现状及趋势	58
四、逻辑/混合信号 ATE 测试系统的发展现状及趋势	59
五、存储器 ATE 测试系统的发展现状及趋势	61
六、LCD Driver 测试系统的发展现状及趋势	62
七、其他定制化专用集成电路测试设备发展的方向及趋势	64
八、SLT 测试技术的特点及行业发展前景	66
九、指纹芯片/模组的测试发展趋势	68
十、MEMS 芯片的测试发展趋势	70
十一、与芯片可测性设计结合的 ATE 设备一体化方案路线	72
<b>第三章 测试服务</b>	<b>74</b>
一、测试服务——平台技术	76
(一) 整体技术需求	76
(二) 发展趋势	76
(三) 重点方向	77
二、测试服务——共性技术	82
(一) 整体技术需求	82
(二) 重点方向	82
(三) 发展趋势	84



三、测试服务——产品测试解决方案	85
(一) 先进工艺 IP 核测试解决方案	85
(二) 先进封装测试解决方案	87
(三) 先进核心产品测试解决方案	90
<b>第四章 军用与民用集成电路测试差异性研究与技术发展</b>	<b>102</b>
一、整体技术需求	102
二、发展趋势	103
三、重点方向	105
(一) 宽温测试技术	105
(二) 抗辐照测试技术	107
(三) 电磁环境效应测试技术	110
(四) 全参数、全功能测试技术	113
(五) 故障及失效测试技术	115
(六) 老炼试验技术	117
(七) 可测性设计与验证技术	119
<b>第五章 电力电子的测试技术与产品</b>	<b>125</b>
一、电力电子产品技术现状	125
(一) 功率二极管技术发展及产品	127
(二) 功率 MOSFET 技术发展及产品	129
(三) IGBT 技术发展及产品	130
二、功率半导体器件测试技术	132
(一) 功率半导体器件稳态参数测试	132
(二) 动态参数测试	134
(三) 功率半导体器件 UIS 雪崩耐量测试技术	146
(四) 功率半导体器件热阻测试技术	150
三、功率半导体器件测试发展趋势及路线图	153
<b>第六章 市场发展格局</b>	<b>155</b>
一、全球封装测试业	156
(一) 行业规模	156

(二) 产业布局·····	157
(三) 重点企业排名·····	157
二、我国封装测试业·····	158
(一) 行业规模·····	158
(二) 产业布局·····	159
(三) 重点企业排名·····	159

# 第一章

## 集成电路工艺品质控制检测 技术与产品

### 一、集成电路产业中的工艺品质控制概况

集成电路制造流程中的工艺品质控制（Process Control）是指在集成电路生产线中，通过设置于制备工艺步骤之后的各类检测步骤获取检测结果，分析检测结果的数值规律，监测生产线工艺品质状态和变化趋势，反馈调整生产线工艺参数，保证整体高生产良品率的控制机制。由于集成电路量产制造的工艺复杂、生产成本低且吞吐量大，及时发现并调整工艺品质问题是保障芯片制造厂效益的核心机制。常见的关键集成电路制备工艺包括光刻（Lithography）、刻蚀（Etch）、化学机械抛光（Chemical-Mechanical Planarization, CMP）、薄膜沉积（Film Deposition）、光罩（Mask）制造、出入厂检测等，这些工艺必须设立在线检测环节。

#### （一）集成电路产业链与工艺品质控制检测布局

工艺品质控制检测具体可分为物性量测（Metrology）和缺陷检测（Defect

Inspection) 两大类。

(1) 物性量测：指对被测对象的结构尺寸和材料特性做出的量化描述。例如，关键尺寸 (Critical Dimension, CD)、刻蚀深度、侧壁坡度、薄膜厚度、材料 N&K 常数、表面粗糙度等物性参数的量测，也指针对单一被测目标进行的绝对量化测量。

(2) 缺陷检测：指相对于一个正常的参考样本，检测出待测样本中出现的异质情况。通常以一片晶圆中的若干芯片为对象建立参考样本；再对整片晶圆中所有的待测芯片进行扫描，与参考样本进行比对分析，才能完成一片晶圆的缺陷检测。缺陷主要包括颗粒污染、表面划伤、开短路等特征结构损伤。

除了从三个工艺段角度区分，在材料和设备供应商的工作流程中也包括相关的检测环节，以便对材料和设备类产品的品质进行评测，主要包括硅晶圆的检测、光刻光罩的检测和设备工艺开发中的检测。鉴于其检测技术和设备与面向“前道制程”的相关领域重合度极高，此部分不做特殊阐述。

工艺品质控制在各工艺段的整体情况如图 1-1 所示，该图只标注了其中重要的品质控制检测点。



图 1-1 工艺品质控制在各工艺段的整体情况

## (二) 工艺品质控制检测技术和设备发展趋势

集成电路品质控制检测的基本要求是满足非接触、无损伤、无污染、高速的需求，同时对在线产品产生几乎可忽略的影响。在主要的工艺品质控制

检测技术中，只有光学原理或者低能电子束原理能做到与被测样品的无接触检测。

集成电路工艺品质控制检测技术与设备通常包括以下四个关键领域：检测的物理过程建模、仿真及图像和参数提取算法，高精度、高速度、高平整度精密运动晶圆承载平台，多维调控模式的高空间分辨率、高信噪比的照明和精密集光光学系统，高宽度数据传输和高性能人工智能学习和分析系统。

随着集成电路节点进入更高的摩尔定律阶段及更丰富的后摩尔领域，集成电路的四个核心发展趋势对工艺品质控制检测提出了新的要求。随着集成电路器件物理尺度的缩小，需要检测的缺陷尺度和测量的物理尺度也在不断缩小。在核心关键指标检测领域，集成电路测量与检测的整体发展目标和技术方案如表 1-1 所示。

表 1-1 集成电路测量与检测的整体发展目标和技术方案

	2020 年	2025 年	2030 年
前道图形化检测 (图形缺陷检测、CD 测量)	(1) 缺陷灵敏度达 5nm; (2) 采用单电子束成像技术、深紫外光学图像技术和深紫外光学尺度量测技术	(1) 缺陷灵敏度达 3nm; (2) 采用单/多电子束成像技术和真空紫外光学尺度量测技术; (3) 将 Actinic 光学技术应用于极紫外光刻光罩检测	(1) 缺陷灵敏度达 1nm; (2) 采用多电子束成像技术和 X 射线光学尺度量测技术; (3) 将 Actinic 光学技术应用于光罩检测
前道无图形化检测 (颗粒检测、膜厚检测)	(1) 缺陷灵敏度达 5nm, 采用深紫外光学技术; (2) 膜厚分辨率为 0.1Å, 采用深紫外光学技术	(1) 缺陷灵敏度达 3nm, 采用真空紫外光学技术; (2) 膜厚分辨率为 0.05Å, 采用深紫外光学技术	(1) 缺陷灵敏度达 1nm, 采用真空紫外光学技术; (2) 膜厚分辨率为 0.02Å, 采用紫外光学技术/X 射线反射技术
前道光刻套刻	采用深紫外光学技术	采用真空紫外光学技术	采用真空紫外光学技术
中道检测	目标: 1μm 线对和三维结构检测, 可见光/紫外光学技术	目标: 0.5μm 线对和三维结构检测, 紫外光学技术	目标: 0.2μm 线对和三维结构检测, 深紫外光学技术
后道检测	可见光及 X 射线检测技术	紫外光及 X 射线检测技术	紫外光及 X 射线检测技术

具体体现在以下三个方面。

(1) 随着集成电路器件逐渐向三维结构发展，对于缺陷检测和尺度测量的要求也从二维平面检测逐渐拓展到三维空间检测。

(2) 高速度、高灵敏度、高准确度、高重复性、高性价比是对检测的长

期要求；集成电路制造商对于检测的重要考量因素是成本控制，而对于检测设备，其成本主要体现为设备购置成本。

(3) 大数据和人工智能分析手段的深入应用。基于深度学习的方法，可对当前尚存的部分人工缺陷检测过程进行大数据挖掘和机器学习分析及智能化分拣，从而逐渐完全替代人工检测。

### (三) 工艺品质控制检测设备市场整体情况

根据信息网（The Information Network）研究报告，通常检测设备市场占集成电路制造设备市场的比例为 13% 左右。据 Gartner 介绍，2016 年晶圆检测市场达 15.2 亿美元；2016 年光学检测设备市场达 12.8 亿美元，电子束检测设备市场达到 2.358 亿美元。2016 年晶圆级检测设备的市场比例如图 1-2 所示。

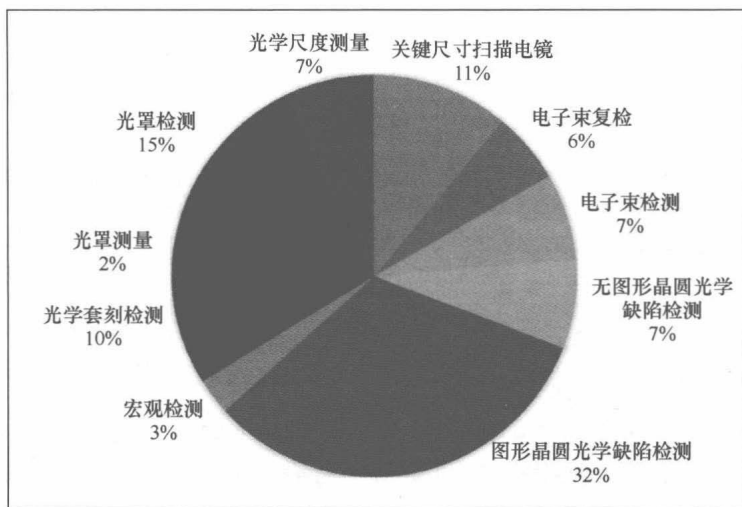


图 1-2 2016 年晶圆级检测设备的市场比例

## 二、硅制程（前道）中的关键工艺品质控制检测技术与设备

芯片前道制程指芯片制造中实现纳米尺度栅极关键器件的制造工艺，具体包括浅槽隔离工艺、注入工艺、栅制程工艺、源漏掺杂工艺及互连工艺等。

工艺节点通常以栅极尺度定义，如 7nm、10nm、14nm、16nm、22nm、28nm、32nm、40nm、45nm、55nm、65nm、90nm 等。

在芯片前道制程中，影响良品率的主要因素包括缺陷、错误、工艺漂移和设计方案等。影响因素涵盖诸如离子注入、刻蚀、沉积、平坦化、光刻、清洗、扩散等主要工艺流程。例如，空气中的分子污染或由环境（或工具）引起的有机物或无机物颗粒；工艺过程引起的缺陷，如划痕、裂纹和颗粒、覆盖层缺陷和应力；产生不同掺杂分布或层厚度的工艺变化；在从掩模到晶片的图形转移过程中，由于设计偏差导致的布局 and 关键尺寸的偏差和变化；原子通过层和半导体散装材料的扩散。图 1-3 给出了芯片前道制程中的主要缺陷。

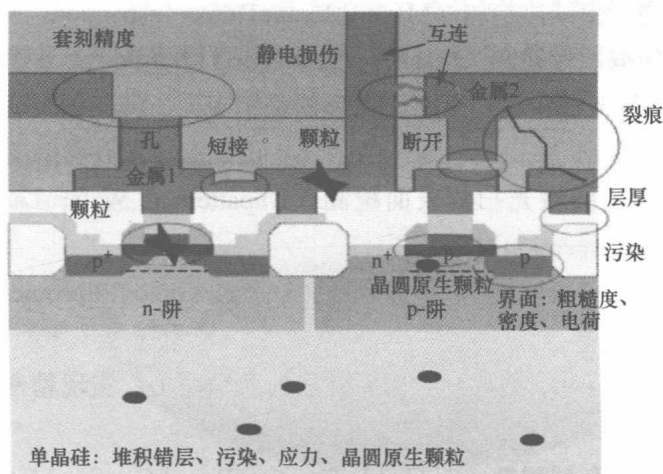


图 1-3 芯片前道制程中的主要缺陷

资料来源：ITRS 2015。

前道工艺品质控制检测设备需要具有超高的灵敏性、结果重复性、设备间匹配性和运行可靠性，能够及时捕获影响产品性能的轻微工艺变化和外来污染。前道制程中的工艺品质控制检测按照使用对象和方式，可以分为四类。以下对四类关键检测技术和设备进行具体介绍。

(1) 图形化表面检测：针对具有图形的晶圆表面或者光罩表面的检测，包括：

- 图形晶圆光学明场缺陷检测（Patterned Wafer Optical Bright Field Defect Inspection，简称 BFI）。

- 图形晶圆暗场缺陷检测 (Patterned Wafer Laser Scanning Dark Field Defect Inspection, 简称 DFI)。
- 图形晶圆电子束缺陷检测 (Patterned Wafer E-Beam Defect Inspection, 简称 EBI)。
- 图形晶圆光学关键尺寸测量 (Patterned Wafer Optical Critical Dimension Metrology, 简称 OCD), 其中包括通用光学散射测量和穆勒矩阵光学散射测量。
- 图形晶圆电子束关键尺寸测量 (Scanning Electron Microscopy Critical Dimension Metrology, 简称 CD-SEM)。
- 光罩光学缺陷检测 (Mask Optical Defect Inspection, MODI)。
- 光罩电子束缺陷检测 (Mask E-Beam Defect Inspection, MEDI)。
- 光罩空间成像检测 (Mask Aerial Imaging Metrology, AIMS)。

(2) 无图形表面检测: 针对无图形的晶圆表面、薄膜晶圆表面或者光罩表面的检测, 包括:

- 无图形晶圆激光扫描表面检测 (Unpatterned Wafer Laser Scanning Surface Inspection)。
- 光谱椭偏薄膜厚度和折射率测量 (Spectroscopic Ellipsometry Thin Film Metrology)。

(3) 光刻套刻对准测量: 对需要叠加的两个图形, 实现精密的空间平面对准的检测。

- 光学衍射套刻测量 (Optical Diffraction Based Overlay Metrology)。

(4) 其他分析及检测:

- 缺陷复检扫描电镜 (E-Beam Defect Review and Analysis Technology, 简称 DR-SEM)。

芯片前道制程的主要检测设备供应商如下。

国际供应商: KLA-Tencor、Applied Material、Nanometrics、HermesMicrovision、ASML、Hitachi HighTech、Nova Measuring Instruments、Lasertec、Carl Zeiss、ASML、Rudolph Technology。

国内供应商: 深圳中科飞测科技有限公司 (以下简称中科飞测)、睿励科学仪器 (上海) 有限公司 (以下简称上海睿励)、中科晶源微电子技术 (北京) 有限公司 (以下简称中科晶源)、上海微电子装备有限公司 (以下简称上海微电子) 等。



## （一）图形化表面检测技术与设备

### 1. 图形晶圆光学明场缺陷检测技术和设备

图形晶圆光学明场缺陷检测（BFI）主要对集成电路图形晶圆上的纳米尺度缺陷进行检测和识别，并向集成电路生产厂商报告图形硅片上的产品缺陷问题。其主要应用工艺包括鳍式场效应晶体管逻辑器（FinFET Logic Devices）、动态随机存取存储器（Dynamic Random Access Memory, DRAM）、3D 闪存（NAND）、双重和四重图形曝光（Double and Quadruple Patterning）等。

BFI 技术以高分辨率光学成像方法为主要信号获取手段，基本原理为：对晶圆表面重复区域进行快速成像扫描，通过将每个芯片（Die）的图像信号与参考 Die 的图像信号比较，获得缺陷的尺度、分布和分类信息。图形晶圆光学明场缺陷检测技术示意如图 1-4 所示。

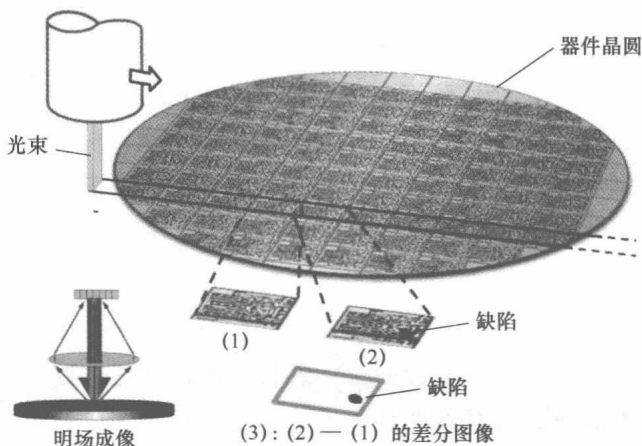


图 1-4 图形晶圆光学明场缺陷检测技术示意

资料来源：Hitachi。

在对晶圆表面的扫描成像过程中，分辨率极限 $>$ 像素空间分辨率 $>$ 可检测的缺陷尺度；在无法对缺陷和晶圆表面的特征进行清晰成像的情况下，可实现对纳米级缺陷的检测。图形晶圆光学明场缺陷检测中的图像示意如图 1-5 所示。