

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.01.17

用于集成电路制造中良率监控的国产化 电子束缺陷检测设备

蒋俊海^{1,2}, 孙伟强^{1*}, 王振¹, 韩春营¹, 孟庆浪¹, 俞宗强¹

(1. 东方晶源微电子科技北京有限公司, 北京 100176; 2. 复旦大学微电子学院, 上海 200433)

摘要: 电子束缺陷检测设备是集成电路制造中不可或缺良率监控设备。其基本原理是结合扫描电镜成像技术、高精度运动控制技术、高速图像数据处理和自动检测分类算法等, 在集成电路制造环节对晶圆及集成电路的物理缺陷和电性缺陷进行检测。为填补此类设备国产化空白, 通过自主研发, 突破了高分辨力大视场扫描成像、三维高精度定位补偿、智能化缺陷检测和分类等技术难点, 研发了国产化电子束缺陷检测设备并应用于集成电路产线, 填补了国内空白, 为推动我国集成电路领域检测技术的发展起到了重要作用。

关键词: 集成电路制造; 电子束显微成像; 缺陷检测

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2023)01-0169-06

Localized electron beam inspection equipment for yield monitoring in integrated circuits manufacture

JIANG Junhai^{1,2}, SUN Weiqiang^{1*}, WANG Zhen¹, HAN Chunying¹, MENG Qinglang¹, YU Zongqiang¹

(1. Dongfang Jingyuan Electron Ltd., Beijing 100176, China; 2. School of Microelectronics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Electron beam inspection equipment plays an important role in the yield monitoring of integrated circuits (IC) manufacture. Combining technologies of scanning electron microscopy, high-precision motion control, high-speed image processing and automatic defect classification, this equipment can inspect physical and electrical defects on IC wafers in IC manufacturing processes. In order to fill in the blank of localization, our team has independently developed the equipment. Key technical breakthroughs in high-resolution large field scanning imaging, 3D high-precision positioning with compensation, AI-assisted defect capture and classification have been made. The localized electron beam inspection equipment have already been developed and used in IC manufacture. This will accelerate the development of IC inspection technology in China.

Key words: integrated circuits manufacture; electron beam microscopy; defect inspection

0 引言

集成电路 (Integrated Circuits, IC) 产业是国家战略性新兴产业, 是国民经济和社会信息化的重要基础。

目前, 集成电路量产技术已经进入 14 nm 及以下工艺节点。在芯片集成度提高的同时, IC 芯片结构和制造工艺的复杂度进一步提升, 这给集成电路的设计、制造提出了更多的技术挑战。在集成电路的生

收稿日期: 2023-02-03; 修回日期: 2023-02-06

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2018ZX02201)

引用格式: 蒋俊海, 孙伟强, 王振, 等. 用于集成电路制造中良率监控的国产化电子束缺陷检测设备[J]. 计测技术, 2023, 43 (1): 169-174.

Citation: JIANG J H, SUN W Q, WANG Z, et al. Localized electron beam inspection equipment for yield monitoring in integrated circuits manufacture[J]. Metrology and measurement technology, 2023, 43 (1): 169-174.



产制造过程中，关键工序的技术水平与稳定性，决定了集成电路产品的性能与良率。而对于集成电路良率的监控，缺陷检测设备不可或缺：缺陷检测设备能够快速而准确地对纳米尺度工艺的芯片进行缺陷在线检测，并通过精准地分析检测结果，为IC芯片的设计优化和在线监控提供依据。

随着集成电路工艺制程节点尺寸的减小，缺陷尺寸减小，缺陷密度增加，漏检的风险越来越大。而电子束成像技术具有纳米级分辨力，灵敏度更高；且对于电性缺陷具有独特的识别能力。因此，在超大规模集成电路的研发和制造过程中，电子束缺陷检测设备（Electron Beam Inspection Equipment, EBI）发挥着愈加重要的作用^[1-2]。

然而，长期以来电子束缺陷检测设备一直严重依赖进口。在目前的科技战和贸易战背景下，此类设备以及相关技术、零部件也都在出口管控范围内，属于“卡脖子”范畴。而国产化电子束缺陷检测装备发展滞后，存在技术和市场空白，制约我国集成电路装备的整体发展水平。

为实现电子束缺陷检测设备的国产化，需要规避已有的专利壁垒，通过自主研发寻求突破。在技术层面，需要攻克扫描电镜成像技术、高精度运动控制技术、高速图像数据处理和自动检测分类算法等方面的关键技术。研发的重点集中于三个主要方向：降低硅片传输过程中的三维位置偏差，提高传输和定位速度；实现大束流下电子束高分辨力成像，在大视场条件下补偿电子光学像差、保持成像均一度；提升大量图像数据处理速度，实现自动化缺陷检测和分类算法。在突破关键技术的同时，通过集成测试、应用开发，保障产品符合集成电路制造产线的实际需求。

本文将对电子束缺陷检测设备的特点和应用进行介绍与分析，明确此类设备在国产化实现路径中需要攻克的核心技术问题；并阐述在该设备国产化开发过程中，通过引入先进工程技术和创新方法，所实现的技术突破，以及通过设备产线应用验证所形成的产品技术特点和优势。

1 电子束缺陷检测设备特点及应用

EBI的主要用途为实现集成电路制造过程中的良率监控，其核心成像原理与扫描电镜类似，都

是利用控制电子束扫描样品，通过二次电子、背散射电子获取样品表面的形貌、成分、电性等信息^[3-4]；主要差异在于需要满足集成电路产线自动化检测的需求，具备更高的稳定性、更快的速度、自动化的检测及结果分析能力。以下将主要从设备基本结构、技术特点、应用等角度进行阐述。

1.1 电子束缺陷检测设备基本结构

根据功能实现划分，EBI主要分为三大部分：用于晶圆样品传输、定位的设备平台；用于电子束扫描成像的电子光学系统；用于实现图像数据处理和分析的软件算法系统。

图1为电子束缺陷检测设备的硬件结构示意图，由设备前端模组（EFEM）、主框架、主腔体、隔振器、工件台组成了设备平台的主体部分；电子光学镜筒以及其他相关电控模组构成电子光学系统；电柜中的超级计算机阵列和配套装置是存储及处理图像数据、运行软件与算法的硬件部分。

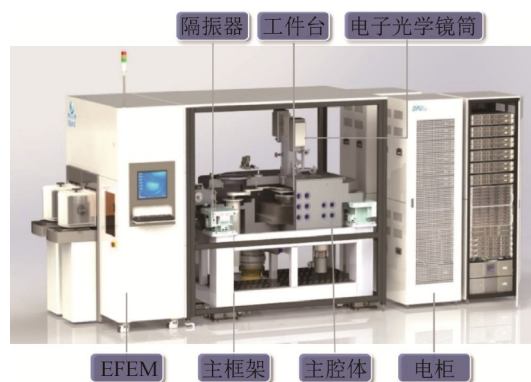


图1 电子束缺陷检测设备硬件结构示意图

Fig.1 Hardware structure diagram of EBI equipment

在设备平台中，EFEM是集成电路制造和检测设备中最常见的模组之一，其中的机械臂将待检测样品晶圆转移至主腔体内的工件台上。工件台承载待测的晶圆移动至电子光学镜筒下方，由电子束扫描特定区域进行成像。主腔体及配套真空获取系统（一般为两级真空获取）将腔体内环境维持在高真空水平。另有隔振器（主动或被动）隔绝振动，保持传片和检测过程的稳定度。

1.2 电子束缺陷检测设备技术特点

为了适应集成电路制造产线对于产能、精度、稳定性的需求，电子束缺陷检测设备需要在系统、模组等不同层级依据相关标准，追求速度、精度和稳定度的提升并统筹兼顾。

被检测的样品晶圆的传输定位精度一般需要达到亚微米至十纳米量级，通常要求使用精度较高的光学定位装置（误差不高于±10 nm）。为了兼顾运动速度，还需要通过先进的运动控制方法引入定位补偿机制。

电子光学系统又称为电子束扫描成像系统，是硬件系统的核心。根据电子束缺陷检测设备的应用需求，需要采用较大的成像束流 10 ~ 100 nA 量级，以及较大的成像视场（Field of View, FOV），减少图像采集花费的时间，有助于产生电压衬度（Voltage Contrast）图像。在较大视场下，由于电子光学轴外像差的存在，还需要引入补偿机制，以保证图像的均匀度。

在图像处理过程中，由于每秒钟可以产生高达几个 Gbit 量级的图像数据，一方面需要高速的图像数据传输；另一方面需要尽可能采用分布式并行处理方法，提升数据带宽。

在图像数据初步处理后，图像数据处理平台上的算法系统将根据预设的检测算法将图像数据进一步进行提取、对比等操作，捕捉图像中的异常信息，并筛选出缺陷。之后算法系统再将缺陷进行进一步分类，根据数据量的多少、训练数据的完备程度等多种因素，可以按照倾向于人工经验规则或倾向于模型训练的自动化缺陷分类，最终形成缺陷检测报告。

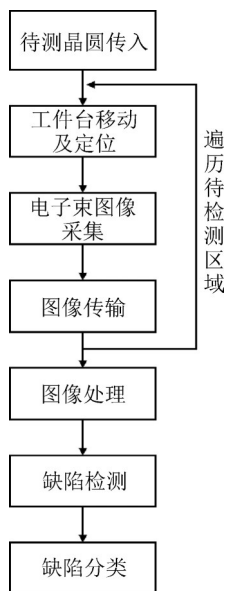


图2 简化版的缺陷检测流程图

Fig.2 Simplified version of defect inspection flow chart

图2为简化的缺陷检测执行流程。为了保证设备产能，图像处理、缺陷检测和分类等步骤与硬件部分的定位和图像采集一般采取并行执行，以节约时间。

1.3 电子束缺陷检测设备应用

电子束缺陷检测设备捕捉的缺陷主要分为物理缺陷和电性缺陷。前者主要指集成电路结构形貌上的异常点，后者主要指集成电路器件电学性质状态（如：是否导通）的异常。

暗电压衬度（Dark Voltage Contrast, DVC）缺陷的图像如图3所示，其中被红色圈出的缺陷部分相比正常状态亮度偏低，说明纵向连通状态异常。

图4为局部凸出（Protrusion）的物理缺陷示意图，其中被红色圈出的缺陷部分相比正常周期性条带图形成像凸出，说明前置工艺过程中引入异常。

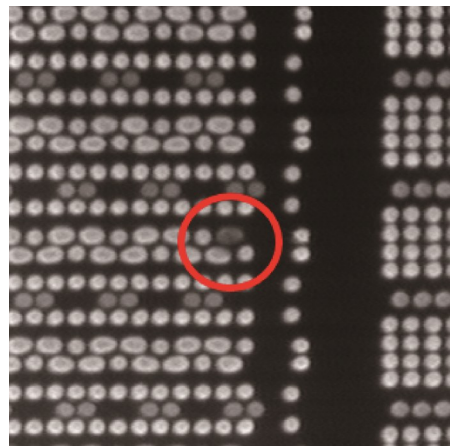


图3 暗电压衬度缺陷(DVC)图像示例

Fig.3 Image of DVC defect

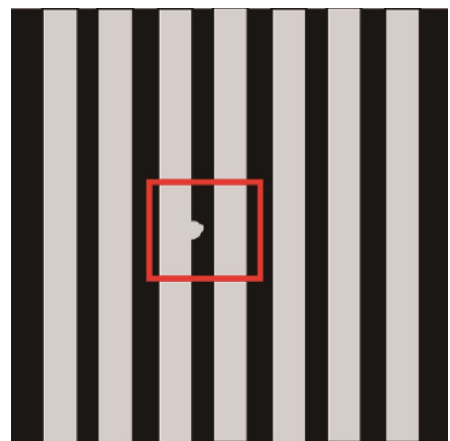


图4 物理缺陷(凸出)图像示例

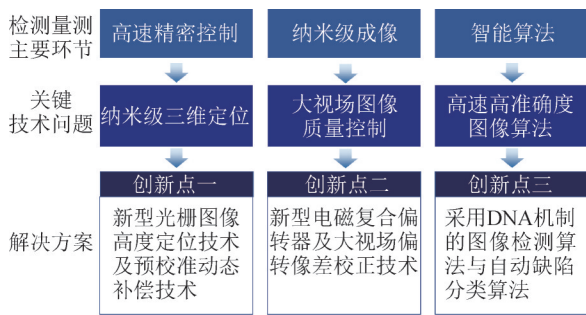
Fig.4 Schematic image of physical defect (protrusion)

2 电子束缺陷检测设备开发中的关键技术问题和技术路线

针对设备三个主要组成部分最关键的技术需求,在实际研发中,通过结合尖端技术进行自主研发创新,在核心模组中采用了业界先进的设计方案,并在定位、成像、图像检测三个主要方向上攻克了开发难点,实现了技术创新。

2.1 电子束缺陷检测设备的关键技术问题

通过客户调研、行业技术分析,总结出三个技术难点和对应的创新突破方向,如图5所示。



基于自主研发创新的电子束缺陷检测设备

图5 研发过程中核心技术难题及创新方向

Fig.5 Key technical problems and innovation direction in development of EBI equipment

针对设备平台在样品传输和定位中对高精度和高速度的需求,其核心技术的难点在于:如何降低硅片传输过程中的三维位置偏差,如何在每秒米量级的传输速度下和数百毫秒的稳定时间损耗下,尽快实现数十纳米的定位精度和自动判断^[5-8]。

电子光学系统研发的核心技术难点为:如何在较大探针束流下,提升主电子束会聚能力和光斑质量以实现纳米级分辨力,同时在百微米以上的大视场条件下补偿电子光学像差、保持成像均一度^[9-10]。

控制软件和算法系统涉及图像预处理、关键尺寸测量、缺陷检测算法、缺陷自动分类、人机界面、高速数据处理平台等诸多模块,其核心技术的难点为:如何使用不同的图像处理算法提升电子束图像质量,如何高速并行处理大量图像数据,如何在测量中结合人工分类经验和图像数据来训练深度学习自动化缺陷分类算法^[11-14]。

2.2 主要功能模组的开发技术路线

2.2.1 设备平台:基于新型光栅图像和预校准动态补偿的三维高精度定位技术

为了实现纳米级的定位精度,在设备平台上,研发并集成了基于二维分区光栅高度定位与同轴显微对准组合的复合高精度预对准定位技术^[15],提出了一种基于定位信息的预校准和动态补偿的算法机制,如图6所示,能够结合多个传感器预测量和实时测量的信息对系统性误差及部分位置的随机误差进行补偿。



图6 结合预校准和动态补偿算法的三维实时定位技术

Fig.6 3D real-time positioning technology combining pre-calibration and dynamic compensation algorithm

在定位技术层面,被检测硅片坐标定位分为水平定位和高度定位两部分。水平定位是通过激光干涉仪和同轴显微对准组合实现,其中同轴对准是专门针对电子光学检测提出的专利技术,其特点为能够跟随电子束光轴中心进行动态调整。高度定位则采用了自主创新的二维分区光栅检测专利技术,既能够保证高精度,又可以通过分区检测算法排除衍射干扰。定位精度可达现有商用技术数倍以上。

2.2.2 电子光学系统:复合偏转方案及大视场偏转像差校正技术

为了兼顾电子束检测的速度和精度,研发的设备采用了复合偏转方案及动态像差校正技术。为提升电子束的检测速度,需要尽可能提升图像视场,以降低工件台位移的时间损耗。但在较大的视场条件下,边缘像差增大会显著影响成像精度。

通过采用复合偏转方案和动态像差校正技术^[16],设备能够补偿大视场的轴外像差。动态像差校正技术根据扫描位置的变化,对扫描信号进行非线性修正,以改变不同位置轴外像差分量,对像散、场曲、畸变等大视场下的图像像差有明显改善。

另外,根据预先建模和成像面预扫描,可以进行像差和聚焦位置的前馈补偿,显著减小了视场间图像质量的差异。

2.2.3 图像算法系统:基于DNA机制的电子束缺陷检测与分类引擎

在高速数据处理平台的设计上,所研发的图像数据处理系统摒弃了传统的基于消息的处理机制,创造性地提出了基于DNA的图像数据处理机制。

这一机制赋予每一进入高速数据处理平台的数据模块一个特定的代码,类似于生物体的DNA;这一数据模块的发生、成长、相互作用、变化及消亡,完全由其“DNA代码”决定。

这一机制的采用可以消除数据处理中复杂的时序逻辑要求,大幅度减少数据内存占用,每个计算单元仅根据数据的DNA处理数据,极大地减少了计算单元间的通讯,从而减少错误发生和互锁的概率。

基于该机制的自动缺陷检测分类算法在应用中展现出了更高的检测效率和精度,根据对照测试可提升数倍的检测数据处理速度。

3 电子束缺陷检测设备应用验证

目前,此设备在28 nm及以上产线上已经批量应用,可支持逻辑电路(Logic)、存储器(Memory)等不同产品的CMP, SPT等数十道layer检测,并持续扩充。经由多年和客户紧密合作,该设备通过验证并形成了独特的功能特色。

1) 高速多类型缺陷检测

所研发设备支持对大规模数据进行并行高速处理,且算力可扩展。采图前台与运算后台采用低耦合设计,支持同步在线/离线检测,并支持多种先进缺陷检测算法(D2D, C2C, D2DB等),能够满足用户不同应用需求。该设计能够有效提高检测率(Capture Rate),降低误检率(Nuisance Rate)。根据客户反馈,该设备相比对标设备可以达到更高的检测率指标。

2) 灵活、高效的自动缺陷分类

在自动缺陷分类(ADC)功能上,所研发设备提供Model-Based ADC模块和Rule-Based ADC模块。前者基于深度学习、自动特征选取、融合置信度的聚类算法,有效提升ADC的纯度(Purity)和分类准确度(Accuracy);后者则保留了人工经验的灵活性,在小样本的场景下可以快速创建

ADC。根据产线验证的数据,相关指标(Purity, Accuracy等)达到95%以上,已经达到现有设备的一流水平^[17]。

3) 静态随机存取存储器边界良率解决方案

先进的Logic制程伴随着静态随机存取存储器(Static Random-Access Memory, SRAM)小型化,传统检测设备针对检测区域(或称关注区域,即Care Area)设置的缩进会显著地损失有效检测区域的覆盖程度。所研发设备通过采用前文所述的高精度定位技术,有效地减少了Care Area缩进,能够覆盖更大的检测范围;正在开发的算法将可以100%地覆盖SRAM区域。如图7所示,所研发的边界覆盖率高于对标设备(Product of Reference, POR),能够帮助客户捕捉更多缺陷。

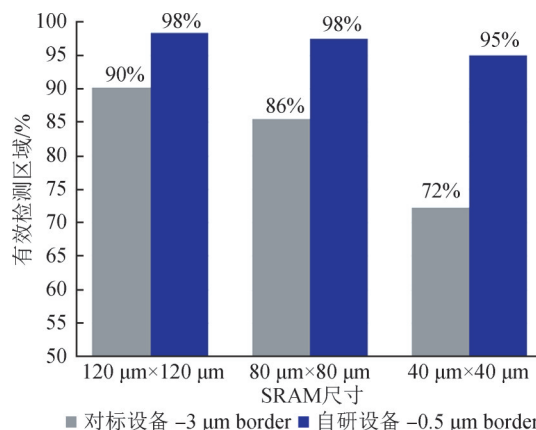


图7 SRAM区域检测覆盖率对比

Fig.7 Comparison between POR and self-developed equipment in area coverage of SRAM

4 结论

本项研发工作针对实现电子束缺陷检测设备国产化的工程技术难点,结合用户调研和前沿技术分析,围绕设备的核心技术问题,开展专项攻关研发。在高速高精度硅片传输定位、大束流范围电子显微系统、高速图像像差补偿、自动缺陷检测和智能分类、尺寸量测和离线数据分析、综合良率提升平台、高效能产业化建设等方面形成了若干技术创新成果。所研发的电子束检测设备关键指标满足国内集成电路制造龙头企业研发生产需求,通过产线验证并实现了订单销售,填补了我国电子束检测设备在技术和市场上的空白。

该设备的成功研发提升了我国检测技术水平，对于摆脱高端集成电路设备的进口依赖，提升我国集成电路产业整体实力具有重要意义。

参考文献

- [1] The International Roadmap for Devices and Systems: 2021 Update, Yield enhancement[R]. 2021.
- [2] 王阳元. 集成电路产业全书[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
WANG Y Y. Complete book of integrated circuit industry [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2018.
- [3] MATSUI M, YANO T, ODAKA T, et al. Quantitative measurement of voltage contrast in scanning electron microscope images for in-line resistance inspection of incomplete contact [J]. Journal of micro/nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2012, 11(2):1-8.
- [4] ANKUSH O, YUAN J. Smart E-beam for defect identification & analysis in the nanoscale technology nodes: technical perspectives[J]. Electronics, 2017, 6(4):87-87.
- [5] NORIMICHI A, JUN N, MICHIO O, et al. Charged particle beam equipment and method for creating charged particle beam image: JPWO2006135021A1[P]. 2006-12-21.
- [6] SATYA A, ADLER D, TSAI B, et al. Continuous movement scans of test structures on semiconductor integrated circuits: US6524873[P]. 2003-3-25.
- [7] TAKASHIMA S. Scanning electron microscope with conversion means to produce a diffraction pattern: US3795809 [P]. 1974-3-5.
- [8] CHEN Z. Swinging objective retarding immersion lens electron optics focusing, deflection and signal collection system and method: US6605805[P]. 2003-8-12.
- [9] SEISHIRO S, TOSHIHIRO F, YASUSHI S. Apparatus for displaying image produced by electrically charged particle beam: US4004149[P]. 1977-1-18.
- [10] SPECHT D, WIHL T, YOUNG S, et al. Automatic photo-mask and reticle inspection method and apparatus including improved defect detector and alignment sub-systems: US4805123[P]. 1989-2-14.
- [11] KITAMURA T, ISHIKAWA A. System and method for a semiconductor lithographic process control using statistical information in defect identification: US8150140 [P]. 2012-4-3.
- [12] ZHANG Z, LIN J, YU Z. Method and system for identifying defects during charged particle beam inspection: US15419657. [P]. 2020-4-21.
- [13] EREZ R, IDO H, VLADIMIR M. Wafer defect classification: WO1999067626A1[P]. 1999-6-9.
- [14] HUET P, SHANBHAG M, BHAGWAT S, et al. Flexible hybrid defect classification for semiconductor manufacturing: US7142992B1[P]. 2006-11-28.
- [15] LI S, GUO J. Sample height measurement using digital grating: US10582099[P]. 2020-3-3.
- [16] MENG Q, SUN W, ZHAO Y. Multi-pole deflector for charged particle beam and charged particle beam imaging apparatus: US11295928[P]. 2022-4-5.
- [17] MA W, ZHANG J, ZHANG Z. Learning based defect classification: US15285667[P]. 2019-3-5.

(本文编辑: 田艳玲)



第一作者: 蒋俊海 (1984-), 男, 博士, 主要研究方向为电子束、光学良率监控技术综合提升方案。



通讯作者: 孙伟强 (1985-), 男, 博士, 主要研究方向为电子光学系统设计开发。