

# ADR AFM让晶圆缺陷无处可藏

原子力显微镜 (AFM) 领导者Park Systems公司通过将高分辨率3D图像的获取过程自动化, 采用ADR (Automated Defect Review, 自动缺陷评估) 技术, 简化了300mm硅晶圆缺陷的评估, 使其比以往更快更简单。

半导体制造商一旦通过检测工具发现了裸硅晶圆上的潜在缺陷, 就可以选择进行缺陷评估。传统的 AFM 提供了丰富的 3D 图像, 但是与基于 SEM 的 2D 技术相比, 该过程较慢。Park Systems 公司开发的独一无二的新型 AFM 方法改变了这个认知。

Park Systems 公司 (位于韩国水原和美国加利福尼亚州圣克拉拉) 是专门针对半导体制造商和研究人员的原子力显微镜 (AFM) 的领先者之一。该公司的创始人 Sang-Il Park 博士在 20 世纪 80 年代是斯坦福大学 AFM 开发团队的重要成员, 率先将该技术商业化。

Park Systems 公司将 AFM 的极高分辨率三维图像实际应用于商业上, 持续开发了用于硬盘介质表面粗糙度测量的产品和软件, 并使之成为行业的标准 (Park HDM 产品系列)。Park 的原子力显微镜同样也是“非接触式”的评估工具, 它消除了工具尖端意外接触表面的可能性和损坏正在评估晶圆的可能性。

虽然高质量、数据丰富的图像从一开始就是 Park Systems 公司 AFM 的一个标志, 但是这种极端的质量是以速度慢和简单性为代价而获得的。该公司随后将磁盘介质的 AFM 扫描进行了自动化, 现在已经提出了一种类似的方法来评估 300mm 硅晶圆

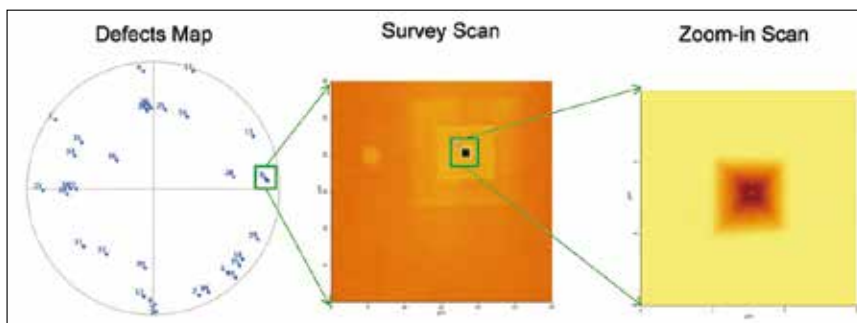


图1. 坐标映射后, ADR AFM将自动进行执行整体扫描, 放大, 处理, 分析和分类每个缺陷。

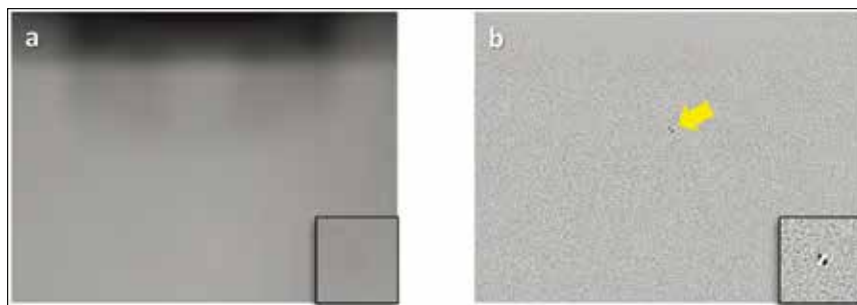


图2. 有一个微小缺陷的裸硅晶圆通过 (a) 标准方法与 (b) 增强视野所收集的图像。内嵌图为放大的显示。增强视野中很容易观察到微小的缺陷。

上的感兴趣缺陷 (defects of interest, DOI)。其硬件和软件还支持极紫外 (EUV) 标线照片掩模, 这是制备未来 450nm 硅晶圆的关键步骤。

寻找硅晶圆的 DOI 是很有挑战性的。所有裸硅晶圆都具有独特的晶体结构, 易于出现小的缺陷 (见图 1), 可能是 1 纳米或更小的缺陷。制造商确定感兴趣的阈值尺寸以及需要注意的形状和深度特征。虽然制造商的阈值可能会有所不同, 但是, 显而易见的是, 随着芯片几何尺寸的缩小, 我们曾一度认为太小的缺陷, 它可能会给下一代芯片带来麻烦。有很多激光

散射技术和工艺工具可以快速检测晶圆, 每小时扫描数百乃至数千个。但检查只是一个开始。通过扫描电子显微镜 (SEM) 或原子力显微镜进行后续评估需要在每个位置上检查坐标和零点, 以便对缺陷进行成像。虽然 SEM 评估相对较快, 但是它不能揭示出 2D 图像以外的更多细节: 只有缺陷的“X”和“Y”尺寸。AFM 则更进一步, 可以形成 X, Y 和 Z 的 3D 图像, 并有详细的形貌图, 可以进一步帮助识别和表征成像的 DOI。原子力显微镜可以揭示扫描电子显微镜经常会漏掉的缺陷细节。

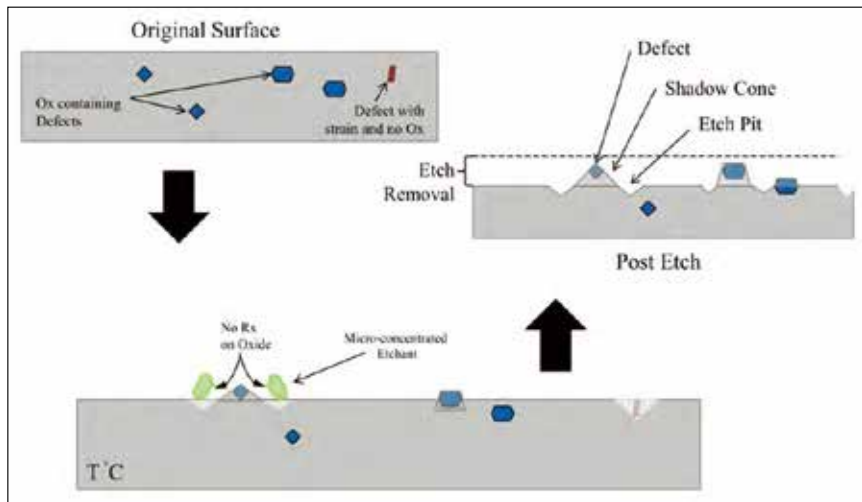


图3. 缺陷检查中修饰晶体缺陷工艺的示意图。

Park Systems 公司的原子力显微镜 (AFM) 缺陷评估是非常准确的, 这是以微米和纳米为单位的行业取得成功的关键因素。他们的原子力显微镜的精度非常高, 因而该公司占有硬盘驱动器缺陷评估系统的 90% 左右市场份额。

“无论缺陷是在硅晶圆上还是在硬盘介质表面上, 关键在于评估设备如何准确定位它, 并提供正确的缺陷分类所需信息。SEM 可能会给出一个快速的图像, 但它缺乏通过 AFM

可以提供的信息 (见图 4)”。

“作为参考工具, 原子力显微镜是‘将要采用’的技术。对于一般原子力显微镜来说, 操作可能是一个挑战, 所以 Park Systems 公司采用了 ADR 来解决问题: Automated Defect Review, 自动缺陷评估。我们对缺陷进行自动评估并对其进行简化, 所以任何技术人员都可以开始评估工艺, 然后在 ADR AFM 运行的同时, 他们只需要直接离开去完成其他任务即可。” Park 的高级应用科学家 Ardavan Zandiatashbar 博士说。

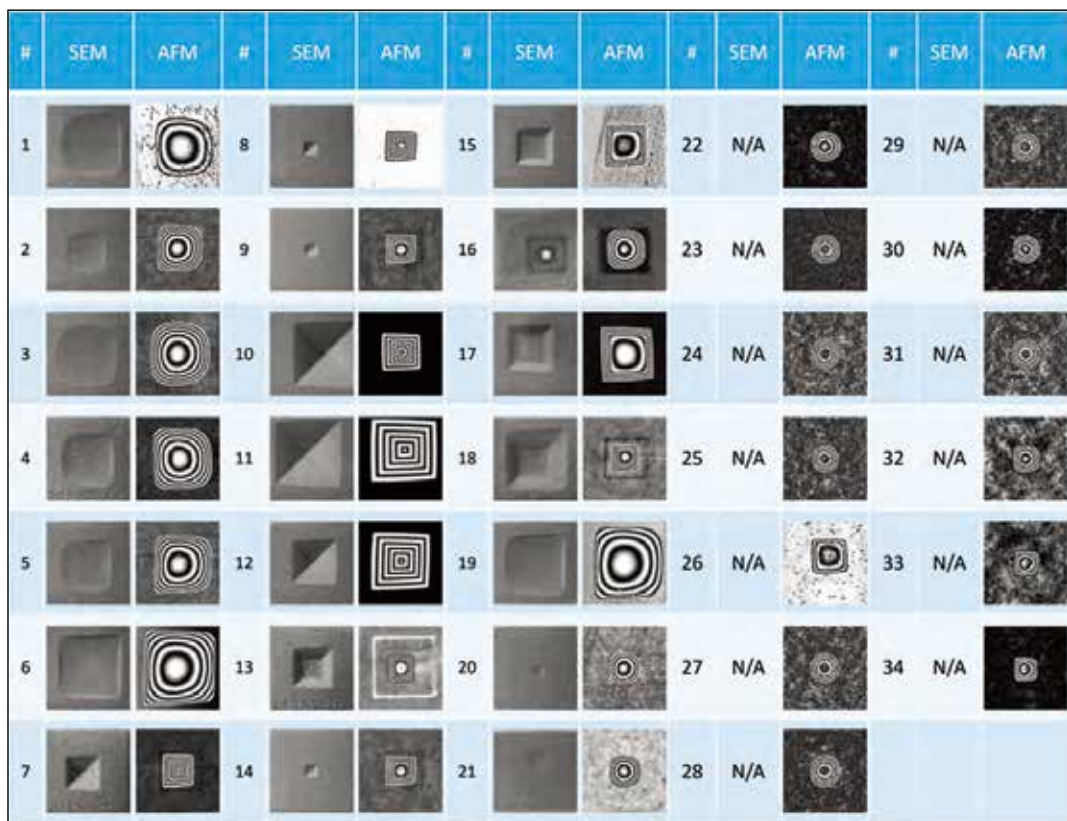


图4. ADR AFM和SEM的缺陷评估结果对比显示。ADR AFM能够定位和成像所有的缺陷; 而SEM则并没有能够发现缺陷22至34。这里AFM和SEM的图像相对于彼此旋转180度。

使用Park Systems公司的ADR AFM获得的结果与基于SEM的结果的差异是显著的。在Park进行的一项测试中, 使用了基于SEM和AFM的技术来评估有表面缺陷的晶圆。所使用的ADR AFM来自于Park的NX-WAFER系列产品。检查阶段鉴别出了34种缺陷用作评估的候选。

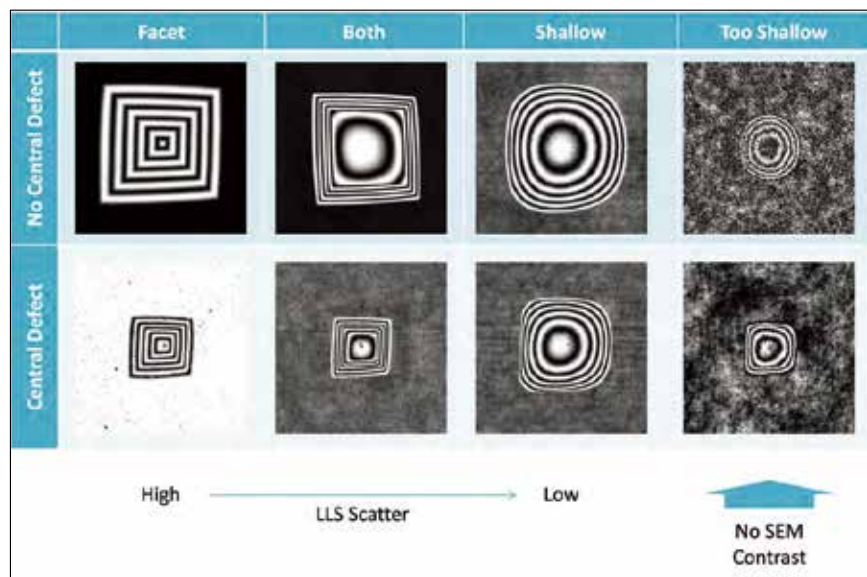


图5. 基于AFM数据的缺陷分类。

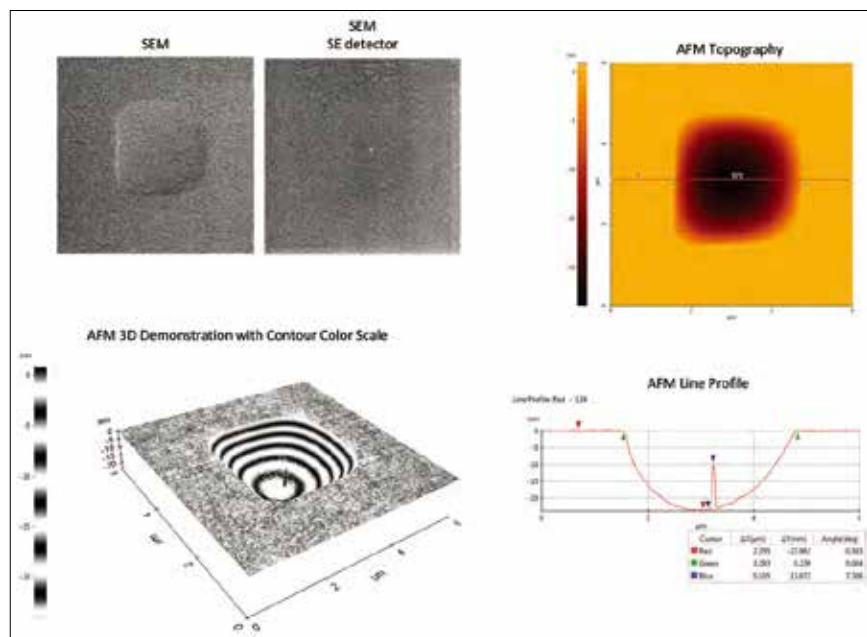


图6. 通过SEM与ADR AFM所收集数据的比较。SEM显示二维鸟瞰图，而ADR AFM包含三维数据，从而可以实现线型轮廓，三维结构和轮廓的色彩分布。

虽然不同的制造商有不同的方法来处理硅晶圆缺陷，但是可能所有人都同意，关于特定缺陷的更好数据是确定其是否足够严重从而影响光刻工艺，或者缺陷的数量和尺寸是否足够大到晶圆应该是直接放弃。

“我们的业务从硬盘媒体缺陷评估开始。制造商们需要知道缺陷的来

源，从而用作失效分析的目的。虽然扫描电镜可以提供快速的图像，但它的图像不能很容易地告诉你，一个缺陷是一个凹坑还是一个凸起，以及其多高或者多深。这是AFM可以进入的地方；它有助于您准确和完整地识别和分类缺陷。我们要做就做别人不能做的。” Zandiatashbar 说。

Park Systems 公司的研究中，晶圆缺陷通常分为八个基本类别——不同晶圆表面评估中的附加类别也是可能的。有些缺陷在检查阶段不能归类，即使经过 AFM 评估，也可能不能够归入典型的类别中。但通过 AFM，制造商一定会知道缺陷的大小和深度；他们可以运用自己的标准来确定应该采取的行动。

“许多制造商都希望常规使用 AFM，但是以前，定位缺陷并将 AFM 与检测工具链接起来是关键问题。传统 AFM 的结果取决于操作人员的技能。我们通过工艺自动化消除了这些问题。现在，我们不是每天只通过艰苦的努力和改变无数次针尖来评估一些缺陷，Park 的 ADR 原子力显微镜可以每小时对 4 至 10 个缺陷进行成像和完整表征。技术人员可以启动 ADR 并让其 24/7 全天候运行。手动的原子力显微镜评估只有在和熟练的操作人员一样快速时才运行，”他补充说。“Park 的 ADR AFM 是交钥匙的解决方案。”

除了自动化评估工艺之外，Park 的 AFM 非接触式方法不会以任何方式改变晶圆的表面，这意味着每个评估的晶圆都可以根据需要直接进行下

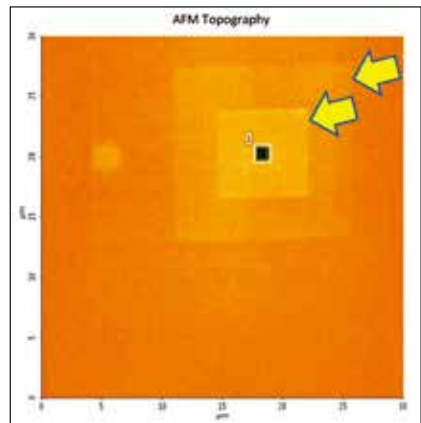


图7. AFM 图像显示出具有多重 SEM 烧蚀痕迹的缺陷：烧蚀用箭头标记。

一步的工艺。基于 SEM 的评估工艺除了数据质量外,还有另外一个问题。其电子束也有可能“烧蚀”所扫描的区域(见图 6)。对于光刻胶层来说,这种效应通常更为严重,我们知道晶圆表面积的任何破坏都会影响良率或其他重要因素。

使用 Park Systems 公司的 ADR AFM 获得的结果与基于 SEM 的结果的差异是显著的。在 Park 进行的一项测试中,使用了基于 SEM 和 AFM 的技术来评估有表面缺陷的晶圆。所使用的 ADR AFM 来自于 Park 的 NX-WAFER 系列产品。检查阶段鉴别了 34 种缺陷用作评估的候选。前 21 种缺陷通过 SEM 成像,提供了没有足够深度或面外尺寸信息的 2D 鸟瞰视图。尽管通过激光散射 (LLS)

检测进行了鉴定(见图 4),但 SEM 并没有发现其余的 13 种缺陷。

Park 的 ADR AFM 能够找到所有的 34 种缺陷。扫描电镜发现达到一定的尺寸阈值的缺陷;那些通过 ADR AFM 成像的缺陷通常是小于或浅于 SEM 可识别的缺陷。扫描电子显微镜也有缺陷边缘清晰度较差时的识别问题,而自动扫描模式下的原子力显微镜则可以发现所有这些缺陷(见图 6)。

“从客户的角度来看,在评估工艺中定位感兴趣的缺陷并确定尺寸和深度,可能才是至关重要的。虽然基于 SEM 的技术可以找到较大的缺陷,但并没有找到所有的缺陷,而是在本例中实际上没有找到 34 种其中的 13 种。缺乏 3D 信息和 SEM 无

法将又浅又小的缺陷成像,这对制造商而言非常致命。通过 Park 的自动缺陷评估,制造商可以使用任何技术人员都可以操作的交钥匙解决方案,来更快地获得 DOI 的高质量 3D 数据。”Zandiatashbar 说。据客户报告, Park Systems 公司的自动缺陷评估可以使其生产率提高达 1000%。但最令客户满意的是前所未有的准确性,包括 3D 图像和即使是最小缺陷的详细形貌信息。随着半导体器件工艺尺寸的不断缩小,甚至已经达到 14 纳米以下,缺陷将严重影响微电子器件的性能。Park 的自动 3D 成像方法是革命性的,因为它使得 AFM 的优势对于领先的器件制造商和研究人员成为实际的优势,从而推动未来产品的代际边界。◆

上接第35页

局精度、整合制造流程的便利性和成本。但有理由保持客观,因为化学和加工方法的发展将会改善所有这些指标。

### 克服技术挑战

2016 DSA 研讨会调查将缺陷列为了最大的技术挑战。缺陷与成本相关,退火时间越长,缺陷水平就越低。退火最少五分钟可以让两个阶段分离,但制造出来的材料缺陷率太高,不合适商用。

晶圆通常一次只能为一个退火,这令退火成本非常高昂。然而,近期采用立式炉进行批量退火的研究展示出了削减成本方面的极大前景。通过同时对 150 个晶圆退火 30 分钟,研究人员成功展示出了足够低的缺陷水平,而且退火成本也低于自对准四倍图案工艺。

同时使用 DSA 和 EUV 具有缓解图形布局错误的问题。例如, EUV 光刻能够为双过孔创造预制图形孔。两个过孔在 EUV 过程中会合并,但随后在 DSA 过程中会自动自动分离。如果没有 DSA,则需要额外的光刻步骤来避免过孔合并。

当过孔形状为优化状态时,同时将 EUV 和 DSA 用于细间距过孔的这个方法最为可靠。研究表明,花生形状最适合创造图形布局错误风险最低的双过孔,即使是颇具挑战的 N5 界节点,而非椭圆形。

### 合作推进 DSA 的采用

半导体行业在光刻技术方面拥有大量经验,但 DSA 需要转变思维模式。嵌段共聚物材料并非这个行业习以为常的事物,材料和工艺的变化,如果是革命性的,而非渐进式的,则

会面临阻力。DSA 需要在实体设备上展示,才能吸引半导体市场的注意。

在嵌段共聚物方面经验丰富的半导体行业材料供应商和化学公司之间的通力合作,是弥合这一缝隙的一条途径。当前便有一项正在开展的合作。Brewer Science 与拥有二十年嵌段共聚物制造经验、但在半导体行业却是默默无闻的公司 Arkema 携手合作。这项合作始于 2015 年,已经处于 DSA 材料试产阶段,为该技术走出实验室、进入商用半导体产品市场铺平了道路。

DSA 和 EUV 应被视为互补性技术,而非相互竞争的技术,二者最终将会在 N7 节点及以上领域成为细间距光刻技术的主流趋势。与之前单一组织的努力不同,与材料和化学公司建立合作关系能够实现平稳过渡。◆