

惠然微电子王志刚：半导体高端装备国产化是场马拉松

CD-SEM(关键尺寸扫描电子显微镜)是半导体晶圆量产专用的纳米级尺寸量测设备,被称为晶圆厂的“纳米标尺”。作为光刻与刻蚀工艺闭环控制必备的计量装备,它直接决定了晶圆图形在线量测

的精度与良率。

“量测设备的真正壁垒不在图纸,而在精度体系、工艺 Know-How(技术诀窍),以及数十年迭代数据和经验构建的护城河。”惠然微电子董事长王志刚表示。拥有 25 年以上大型

半导体及科研设备研发经验的他,完整见证了电子束量测从单一 CD 量测向多维综合表征的技术迭代进程。

在王志刚看来,半导体高端装备的国产化是一场马拉松,胜负的关键在于谁能更早将核心技术沉

淀在自己手中。

CD-SEM 设备的国产化进展如何?它对本土半导体产业链意味着什么?未来的技术与行业趋势又是怎样的?带着这些问题,近日《中国经营报》记者专访了王志刚。

推动国产品圆和光掩模工艺迭代

《中国经营报》:作为晶圆厂的“纳米标尺”,CD-SEM 在实际逻辑与存储产线上,突破了什么核心工艺瓶颈?

王志刚:CD-SEM 在逻辑与存储产线上突破的核心瓶颈是把“测不准”变成“控得住”。目前 14nm 以下逻辑产线的工艺窗口已收窄到纳米级,量测行业有条铁律叫计量预算,也就是量测精度必须显著优于工艺公差,否则光刻后、刻蚀后的 CD 反馈就会出现误差,进而决定 OPC 模型校准与 CD 偏置补偿能否成立的在线监控工艺闭环就无法收敛,这也是先进制程被“卡脖子”的关键一环。

《中国经营报》:这对于研发端和量产端而言,有哪些要求?

王志刚:半导体产线多维综合表征的量测难度在呈指数级上升,这类产线真正考验的是高吞吐下的长期稳定性与机台间的匹配度,大量 die(晶粒)要靠在线的全片监控守住良率。

研发端需要多参数灵活表征去支撑 14nm 前沿工艺的探索,量产端需要高重复性、高可用率去打 22nm 的大规模产能,而研发数据与量产数据同源,工艺转移才能顺畅。

《中国经营报》:目前公司在晶圆厂的验证周期和国产替代验证走

到了哪一步?

王志刚:在验证路径方面,晶圆厂的标准动作是四道关:装机匹配性验证、基准片短期重复性、产线长期漂移与机台匹配、工艺图形海量数据 SPC 放行。行业周期普遍在 6~18 个月,公司正沿这条路径从“验证”向“量产放行”推进,接下来要做的,就是让“通过验证”变成“批量交付”。

《中国经营报》: EUV/PSM 之类的掩模版量测,在未来的技术趋势是怎样的?

王志刚:随着半导体细微化的推进,掩模版量测未来可能会变成整条光刻链路里精度最高和最需要自主可控的一环,因为它是从电子光学、真空、精密运动平台、电荷控制到测量算法的一整套独立技术栈,并且更趋向于“CD+相位+缺陷+3D 形貌”的综合表征。

《中国经营报》:过去光掩模制造的计量装备基本被外企垄断,该类产品的落地对国内光刻产业链意味着什么?

王志刚:Mask CD-SEM(光掩模版关键尺寸量测设备)的实现,主要填补了国内在 22nm 工艺节点掩模版专用电子束量测设备上的国产化空白。从产业链角度看,掩模量测是光刻上游的关键环节之一,该设备的本土化突破有助于提



升光掩模制造环节的技术自主率,并为后续工艺参数的本地化校准与迭代提供基础测试平台。

《中国经营报》:国产设备未来还需要在哪些方面努力?

王志刚:掩模制造本质上依赖“刻蚀—量测—修复—反馈”的闭环数据驱动。拥有自主可控的量测设备,意味着掩模厂能够建立独立的工艺测量与归因数据链,减少对进口设备测量标准的依赖。

由于掩模端误差会在光刻过程中通过 MEEF(掩模误差增强因子)效应放大并传导至晶圆,在 22nm 节点实现掩模量测本土化,有助于打通掩模端与晶圆端 CD-SEM 的数据联动,建立更客观的技术评估与标定体系。面对更先进的节点(如 14nm 及以下),国产设备在精度控制、稳定性与吞吐量上仍需持续的技术积累与产线验证。

打造数据反哺的强飞轮

《中国经营报》:你在日立工作超过 20 年时间,是什么原因让你选择回到国内开始从事与半导体相关的业务?

王志刚:在日立的 20 多年,我完整经历了电子束量测从 CD 量测走向多维综合表征的整条技术迭代,也看清量测设备的壁垒不在图纸,而在精度体系、工艺 know-how 和数十年迭代数据堆出来的护城河。

决定回国,不仅仅是感性的情怀驱动,而是我看到量检测技术、产业、供给三个拐点恰好在同一个窗口期重合——AI 介入、量测从“给一个数”走向“给一个带置信度的数”,计量范式正在重构,而范式切换期恰恰是后者最公平的切入窗口,错过这五年就要经历又一次代际追赶。

《中国经营报》:国内目前在高

端量测方面的发展情况如何?

王志刚:国内成熟制程扩产、先进封装与掩模制造崛起,让量测需求以爆发式增长释放,国产装备正处在从“能用”迈向“好用”的关键一跃,这时候缺的是真正吃透精度体系的团队;而外部高端量测在交期、服务、升级与出口管制上的约束日益收紧,产业链自主可控亟待补齐短板、夺回测量主权。

《中国经营报》:国际巨头在从“市场规划到产品落地改良量产”的研发管理范式上,有哪些优势?

王志刚:国际巨头研发管理的精髓,是把“实验室能做出来”和“量产能交付”当作两套完全不同的工程体系来对待,其中有一整套的关卡式流程与质量工程方法论。

《中国经营报》:这套方法论具体而言是怎样的?

王志刚:在流程上,日立这类企业跑的是严格的门禁制,即从市场规划阶段就把客户需求翻译成可验证的量化规格并冻结,后面的每道关卡都有硬性退出标准,不合格就不放行;同时用变更管理把需求蔓延,也就是项目范围在执行过程中不断无序扩大的问题,掐死在源头。

在质量体系上,他们会把可靠性前移到设计端,例如 DFMEA(设计失效模式与影响分析)在图纸阶段就会逐条识别失效模式,DOE 实验设计会替代工程师试错,而量产验收则比较看重 CPK≥1.33 的过程能力、MTBF(平均无故障时间)可用率以及机台间匹配度这些统计口径。

《中国经营报》:这些优势有哪些是国内半导体装备企业最需要吸收和借鉴的?

王志刚:最值得借鉴的是“改良量产”的飞轮,也就是每一台进入客户产线的设备都在回传失效数据,驱动下一版设计的迭代,装机量越大、数据越多、产品越强,这才是国际巨头真正甩开对手的护城河。

《中国经营报》:你怎么看待实验室与量产交付的分界?

王志刚:至于实验室可行与量产交付的分界,我的标准很朴素:实验室验证的是物理极限,量产交付验证的是工艺窗口内的鲁棒性,所以我坚持把“短期重复性→长期漂移→机台匹配→客户现场 SAT(现场验收测试)”设成不可跳过的四级台阶。

国产装备企业真正要补的,其实是这套把“一次成功”转化为“批量成功”的系统工程方法论,以及愿意为它投入十年以上的长期主义。

国产电子束装备应走差异化道路

《中国经营报》:过去电子束量测主要靠物理硬件和传统算法,引入 AI 视觉感知和智能算法后,量测精度的底层优化是如何发生的?

王志刚:AI 介入量测的底层逻辑是精度从硬件逼近转换成多目标约束下的算法逼近,即传统精度提升依靠增加束流和扫描时间,而 AI 视觉感知和智能算法一般是从源头重写信噪比预算,并使系统可以用更低剂量和更低信噪比,重建出等效高清图像,这一点是纯硬件无法做到的。

《中国经营报》:在 EUV 或多重曝光这类高难度工艺中,AI 智能体如何帮助工程师找到稳定的工艺参数组合并提升良率?

王志刚:量产产线上的瓶颈,归根到底是缺乏全栈式的智能管控系统,如果各节点之间无法高效联动,那就无法促进根因改善,良率提升更无从谈起。

这可以从软硬件协同层面出发。在硬件层,CD-SEM 能对可疑点做高分辨率量测;在软件层,有覆盖从 Offline 量测到 Recipe 制作、下发、使用以及管理维护的完整闭环管理。换言之,AI-电子束量测技术

平台可以推动全链路高效协同,并反向驱动硬件自行优化调整。在这个过程中,硬件的新数据还能实时回灌模型支撑持续迭代,进而形成越用越准、越用越快的自适应能力。

《中国经营报》:这种软硬件一体化的协同能力,对设备厂商与本土晶圆厂意味着什么?

王志刚:这意味着设备厂商的技术服务需要从单纯的“硬件交付”延伸至“工艺良率协同优化”。对于本土晶圆厂而言,自主可控的软硬件架构能够确保产线积累的工艺 Know-how、图像数据与优化算法保存在本地生态内,避免核心制造数据的外流风险;同时,本地化的技术支持能够更快地针对特殊工艺节点进行算法定制与迭代。

《中国经营报》:在你看来,未来 3~5 年全球半导体量测检测技术最核心的演进方向是什么?

王志刚:未来 3~5 年可能是光学、电子束、X 射线三条路线深度融合的混合量测架构成为主流。OCD 在周期性结构的在线监控中仍有不可替代的产能优势,X 射线有 3D 量测里面深度的优越性,各个技术的演进方向都是融合 AI 反

演算法、实现多层结构同时量测、并与 CD-SEM 数据做交叉校准,也就是价值重心从“硬件分辨率”转向“算法建模精度”。

在半导体工艺细微化不断推进,光学分辨率物理极限逼近的背景下,电子束在亚纳米级分辨率和随机缺陷检测上的不可替代性将持续增强。电子束技术吞吐量提升在线监控环节并推进量产线是未来 3~5 年最关键的演进方向。

综合来看,未来的量测技术路线可能是“光学初筛→电子束精测→X 射线透视”的三级协同,而目前,日立、应用材料等头部厂商已经在往这个方向整合产品。

《中国经营报》:惠然微电子接下来的产品路线图和市场拓展目标是什么?

王志刚:未来 3~5 年,公司将进一步深化与产业链上下游的协同创新,推动国产量检测设备规模化落地;同时持续深耕电子光学、精密量测和 AI 算法等底层核心技术,构筑先进量检测设备创新能力,助力国内半导体产业向更高性能、更高良率稳步升级。

在推动中国半导体量测装备

自主可控的进程中,公司将持续加大研发投入,以技术创新赋能区域制造业提质增效,胸怀“功成不必在我,功成一定有我”的时代格局,助力国产高端装备自立自强。

《中国经营报》:在未来量测技术路线确定的背景下,对于国产电子束装备的突围,你有哪些好的建议?

王志刚:在国产电子束装备突围层面,我的建议是在技术攻坚的基础上,聚焦非对称突破,走差异化道路。

首先,要攻核心,像电子光学系统、电子枪、探测器这类“卡脖子”关键部件必须逐步实现自主化,这是根本。如果根基不稳,一切无从谈起。

其次,要进产线,电子束装备要先在成熟制程与特色工艺上跑出稳定性和量产价值,用数据证明“好用”,再逐步向先进制程挺进。国产设备缺少的是大规模跑量的验证机会,与晶圆厂深度共创、共同打磨才是突围捷径。

最后,要拼智能,要以软硬件一体化和 AI 量测算法构筑差异化能力,让客户买到的不仅是设备,更是实实在在的良率提升能力。

企业家秘籍



1

半导体高端装备国产化如何破局?

半导体高端装备研发需要把“一次成功”转化为“批量成功”的系统工程方法论,以及愿意为它投入十年以上的长期主义。装备的壁垒不在图纸,而在精度体系、工艺 Know-How 以及数十年数据堆叠形成的护城河。

2

新创业者如何起步?

新进入的创业者要找差异化的非对称突破路径,想清楚底层逻辑。要学习国际巨头的研发管理精髓,把“实验室能做出来”和“量产能交付”当作两套完全不同的工程体系来对待。

观察

半导体装备国产化正经历深刻范式转变

在半导体制造的微观世界里,CD-SEM(关键尺寸扫描电子显微镜)被誉为晶圆厂的“纳米标尺”。随着逻辑芯片与存储芯片向 14nm 及更先进节点演进,工艺窗口已收窄至纳米级。“测不准”便“控不住”,缺乏自主精准的量测手段,整个光刻与刻蚀的在线监控工艺闭环就无法收敛。这不仅是技术难关,更是悬在本土半导体产业链头顶的“达摩克利斯之剑”。

从与王志刚的对话中可以清晰感受到,高端半导体装备的国产化正经历一场从“设备替代”到“标准重构”的深刻范式转变。

过去,国内掩模版与晶圆的品质判定依赖海外设备的算法与标准,话语权长期旁落。而如今,随着惠然微电子推出包括国内首款光掩模版关键尺寸量测设备 Mask CD-SEM eMILO-FR7 在内的多款产品,本土企业开始将误差标定、缺陷判定与校准体系逐步掌握在自己手中。这不仅填补了上游产业链的关键拼

图,更标志着国产半导体计量装备正迈向“自己说了算”的新阶段。

不过,半导体高端装备的竞赛从来不是仅凭图纸就能赢下的短跑,而是一场考验工艺 Know-How 与数据沉淀的马拉松。国际巨头的护城河,建立在数十年装机量所构建的质量飞轮之上;对国产设备而言,破局的关键则在于“软硬协同”与“差异化突围”。

将 AI 视觉算法引入传统电子束量测,重写信噪比预算,不仅是技术上的弯道超车,更让设备从“给出一个数据”升维为提供“带置信度的解决方案”,让国产厂商真正转型为晶圆厂的“良率合作伙伴”。

伴随着成熟制程扩产与先进封装的崛起,国产高端量测装备正迎来从“能用”跨越到“好用”的黄金时期。把技术标准、工艺数据与精度主权牢牢握在自己手里,这场关于“纳米标尺”的国产化征程,将在长期主义的坚守下迎来春暖花开。

本版文章由中经记者杨让晨撰写