

太阳能电池量测解决方案

KLA Instruments™ Zeta™ 光学轮廓仪

引言

太阳能被广泛用于为照明、供暖、泵送、卫星和计算器等小型设备提供电源。太阳能电池大多由单晶硅或多晶硅制成，是利用光电效应将太阳光直接转化为电能的基本装置。

将晶硅锭加工成太阳能电池需要一系列制造工艺，包括晶圆切割、表面制绒、酸洗、扩散、刻蚀、减反膜沉积、激光开槽、接触印刷等。图 1 为工艺流程中的测量节点，包括金刚石切割线的表面形貌、硅片翘曲/表面粗糙度/边缘倒角、电池片表面金字塔绒面高度和宽度的表征、减反膜厚度和反射率，以及激光开槽、太阳能金属栅线和主栅线的形貌。各项制造工艺中的微小误差都会对电池片的整体能量转换效率造成不利影响，因此对每个工艺环节的质量管控都至关重要。

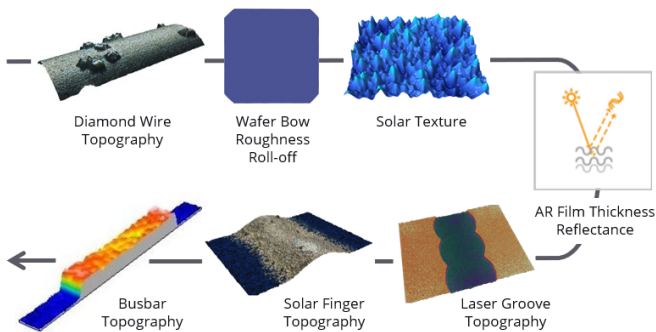


图 1. 太阳能电池制造工艺流程中的多个量测监控节点，包括金刚石切割线的表面形貌、硅片翘曲/表面粗糙度/边缘倒角、电池片表面金字塔绒面高度和宽度的表征、减反膜厚度和反射率，以及激光开槽、太阳能金属栅线和主栅线的形貌。

Zeta™ 3D 光学轮廓仪广泛应用于太阳能电池的生产工艺流程中：

(i)用于硅片切割的金刚石线检测；(ii)硅片表面粗糙度、翘曲和边缘倒角的量化；(iii)制绒后金字塔结构的高度、尺寸、周期测量，以及绒面的比表面积分析；(iv)使用Zeta ZFT技术对减反膜的厚度和反射率的测量；(v)用于印刷银栅线的激光开槽形貌表征；(vi)金属线（指细栅线和主栅线）的高度、宽度、横截面积和体积的测量。本篇应用说明主要介绍采用Zeta对太阳能电池的表面金字塔结构、激光开槽、金属栅线和主栅线结构的测量与分析。

Zeta-20 光学轮廓仪是非接触式、桌面式三维表面形貌测量系统，且具有成本优势。采用 KLA Instruments 独有的 ZDot™ 技术，可在离线产品检测中实现快速的真彩色成像与表面形貌的量化分析。

Zeta 光学轮廓仪为太阳能应用开发了专用解决方案，可实现对金属线（指细栅线和主栅线）的高度、宽度、横截面积和体积和晶硅表面金字塔结构的高度、宽度和比表面积等的多点自动化测量，为太阳能电池制造的工艺质量监控与优化提供了高效且可靠的解决方案。Zeta 3D 光学轮廓仪相比于扫描电子显微镜（SEM）具有无损测量的优势，而其产能远高于原子力显微镜（AFM），且针对太阳能电池的应用场景具有全自动分析能力。

操作原理

Zeta-20 光学轮廓仪采用 ZDot™ 技术和多模组光学系统，可测量各种不同的样品：包括透明与不透明、低至高反射率、光滑到粗糙的表面，以及亚纳米级到毫米级的台阶高度。如图 2 所示，Zeta 光学轮廓系统包含两个高强度白色 LED 光源。来自 LED 光源 1 的光穿过 ZDot 网格，获取每个像素对比度在 Z 方向的变化信息用于绘制表面形貌分布图，而来自 LED 光源 2 的光保留每个像素的样本真彩色信息。在垂直方向上扫描后，软件将 Z 信息与真彩色数据结合起来形成 3D 真彩色图像，该图像可用于在一个图中量化尺寸粗糙度和颜色信息。

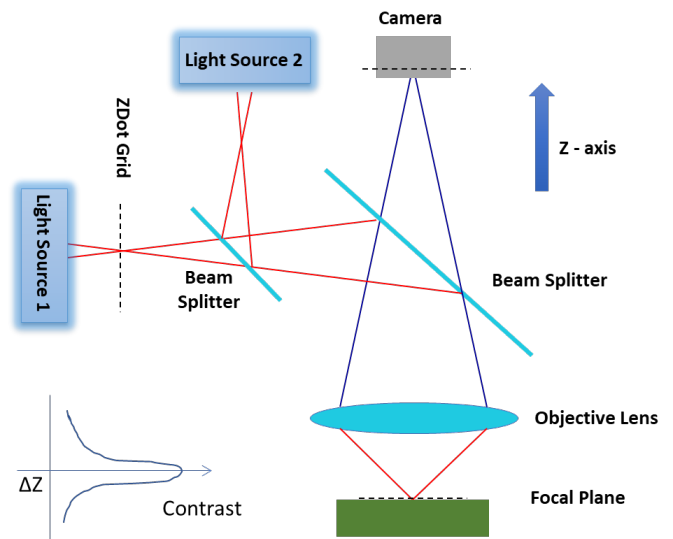


图 2. ZDot™ 技术示意图

Zeta 软件具有强大的自动分析算法，专门用于太阳能电池表征。它可以计算视场中金字塔的大小和高度，并显示统计数据。它还可以自动测量金属栅线的高度、宽度和体积，并可以使用图像自动拼接的功能来测量更宽的金属主栅线结构。

晶硅太阳能绒面分析

金字塔结构蚀刻在硅片表面上，通过降低反射率来最大化太阳能电池的光吸收率。这些结构可以被自定义的 Zeta 太阳能绒面解决方案所表征，视场中的金字塔结构会被自动统计和分析，如图 3 所示的信息：

- 金字塔大小的直方图
- 金字塔高度的直方图
- 2D 和 3D 真彩色图像
- 金字塔的大小、高度、数值和表面面积比率的统计

开发了不同的算法来分析特定于单晶硅和多晶硅硅片的绒面结构，如图 4 所示。对于单晶硅金字塔结构，软件可以检测每个金字塔的顶点，并计算视场内金字塔的高度、大小、计数和表面积。对于多晶硅绒面结构，软件检测绒面的边界并执行相应的统计计算。

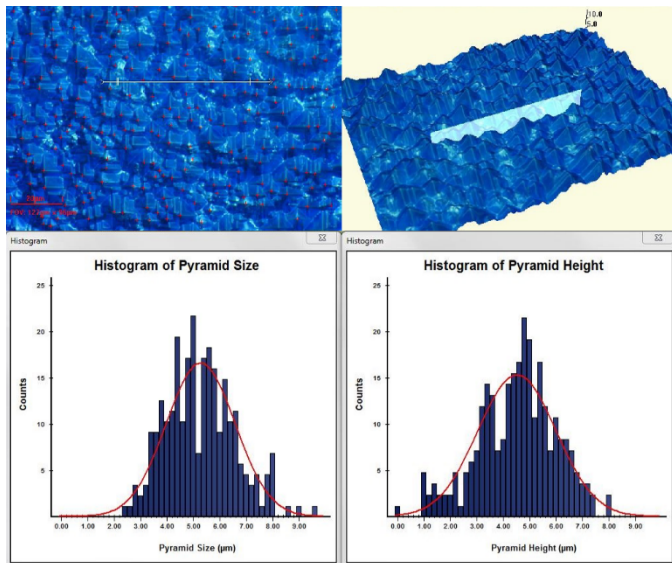


图 3. 金字塔分析界面，显示：具有金字塔峰位置自动识别和轮廓位置的 2D 图像（左上角）；单晶硅绒面的 3D 图像（右上角）；以及金字塔大小和高度的直方图（底部），其中红色曲线表示对数据的拟合。

生产线质量监控通常需要测量多个点位，以检查产品的均匀性。通过使用 Zeta 的多点测量功能，可以实现太阳能电池的多个点位自动化测量。

激光开槽量测

太阳能电池生产中广泛采用激光开槽埋入式接点，以便提供基础结构以印制金属线。在此工艺中，激光开槽可以透过晶硅绒面表面的减反射层和沉积层进行激光划线。经过蚀刻工艺以减少激光引起的损坏，用银金属印制在激光凹槽处，以制作太阳能金属栅线。

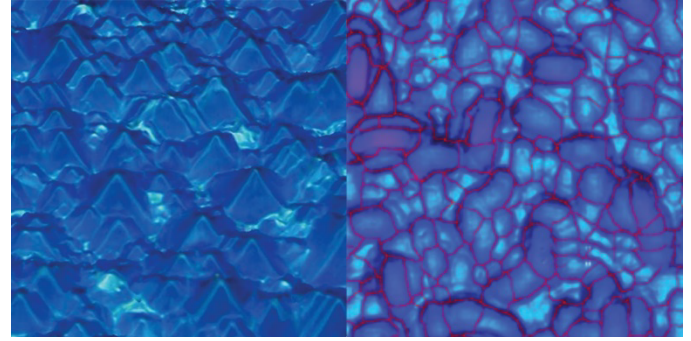


图 4. 单晶硅（左）和多晶硅（右）的绒面结构。对于多晶硅结构，结构的边界被图像处理算法圈出。

Zeta 光学轮廓仪可用于测量激光开槽的宽度和深度以监控激光凹槽工艺，如图 5 所示。用 ZDot™ 点阵共聚焦技术扫描之后，获得激光凹槽的 3D 图像，并且可以从 2D 轮廓线进一步计算激光凹槽的深度和宽度。**特征查找**功能也可以应用于 3D 图像，自动寻找激光凹槽的边缘并分析深度和宽度，使 Zeta 光学轮廓仪成为激光凹槽测量的快速、非破坏性三维表面形貌测量系统。

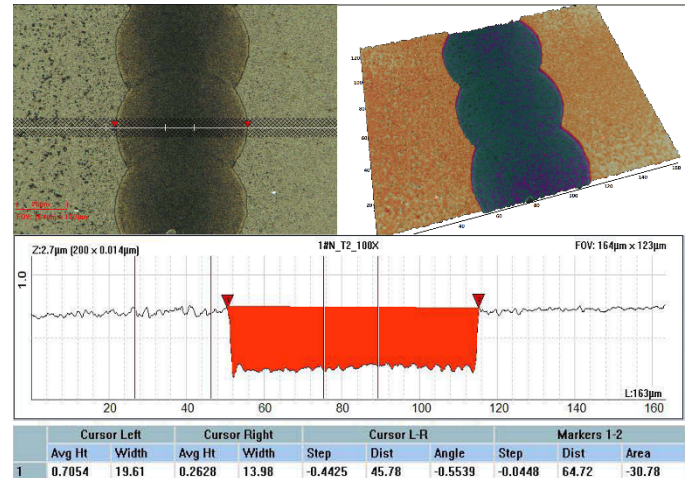


图 5. 激光开槽分析：(a) 2D 图像；(b) 3D 图像；(c) 2D 横断面分析结果。对于 2D 和 3D 图像，2D 轮廓线来自于宽线范围的平均沟槽轮廓。

太阳能金属栅线表征

太阳能金属栅线用于将绒面区域产生的电能传导到金属主栅线，主栅线又将电能传导到硅片边缘以到达外部电路。因为太阳能金属栅线由昂贵的银制成，所以在太阳能电池片生产工艺中，监控金属栅线的几何形状，可以确保良好的导电性以及最大限度地减少银的使用量来降低成本。Zeta 3D 光学轮廓仪可对金属栅线进行精确测量，从而实现以上优化目标。

对于印刷在表面镀有减反膜的晶硅绒面上的金属结构进行 3D 成像并不容易。太阳能金属栅线的反射率非常高，而旁边的镀有减反膜的晶硅绒面反射率极低 (< 5%)。在单次扫描中，对这样的表面进行三维成像要求光学测量系统具有 HDR 功能。

Zeta 的高动态范围 (HDR) 成像系统能够在非常暗 (非反射) 的表面上, 对高反射金属栅线进行精确的 3D 轮廓分析, 如图 6 所示。扫描后, 为每个像素确定适当的光强水平, 以形成最终图像。根据此高质量 3D 图像, 自动计算线宽、高度和体积等关键参数。

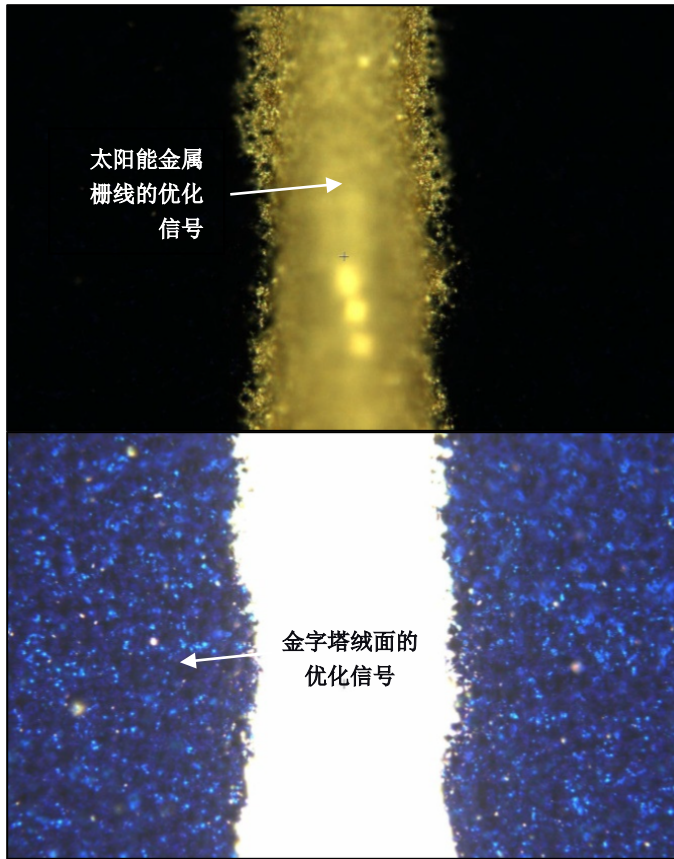


图 6. HDR 成像: 使用低强度光从高反射太阳能指状电极线 (顶部) 生成有效信号; 使用高强度光从低反射金字塔结构 (底部) 生成有效信号。

Zeta 太阳能金属栅线程式可以自动测量和分析金属栅线: 首先自动对焦, 检测太阳能电池表面, 然后使用图像自动识别, 定位太阳能金属栅线, 将太阳能金属栅线置于视场中心, 接着使用 HDR 方法收集 3D 数据, 如图 7 所示。最后, 程式自动计算多个横截面中的高度和宽度数据和平均值, 并分析以下参数:

- 太阳能金属栅线的平均高度
- 太阳能金属栅线的平均宽度
- 太阳能金属栅线的面积
- 太阳能金属栅线的体积

Zeta 光学轮廓仪中的图像自动识别是一种高级功能, 可实现全自动测量。操作员无需手动将太阳能金属栅线移动到视场; 相反, 系统基于预先定义的模式搜索太阳能金属栅线的周围, 并在定位和自动居中后测量和分析金属栅线。

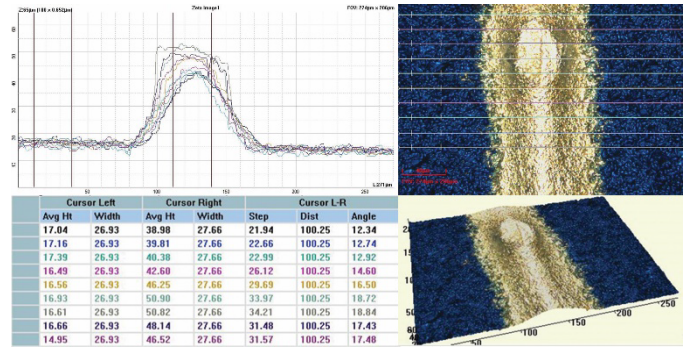


图 7. 太阳能金属栅线分析: 2D 横截面轮廓 (左上角)、具有横截面位置的 2D 图像 (右上角)、2D 横截面结果 (左下角) 和 3D 图像 (右下角)。

太阳能金属主栅线表征

与低于 100 μ m 宽的太阳能金属栅线相比, 主栅线的结构更宽; 通常为 1500 μ m 宽。Zeta 光学轮廓仪使用自动图像拼接技术来测量整个主栅线。如图 8 所示, 宽度和高度自动计算, 结果可以自动保存为 *.txt 或 *.csv 文件。

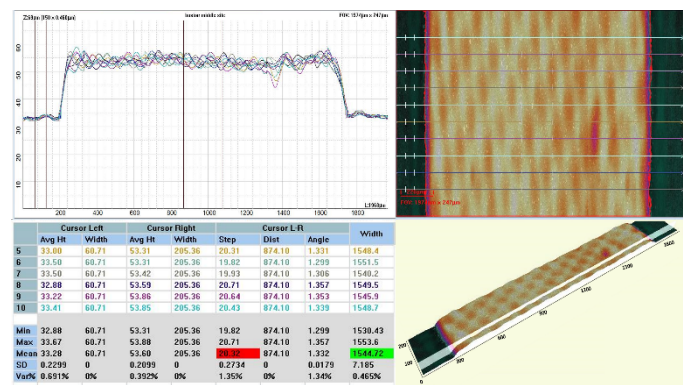


图 8. 太阳能主栅线分析: 2D 横截面轮廓 (左上角)、具有横截面位置的 2D 图像 (右上角)、2D 横截面结果 (左下角) 和包含自动拼接图像的 3D 图像 (右下角)。

其他与太阳能有关的应用

Zeta 光学轮廓仪是一种通用测量工具, 也可用于在太阳能电池加工的初始步骤中表征硅片。硅片的粗糙度可以使用 ZDot 模式和相移干涉术 (PSI) 模式来计算未抛光硅片的 2D 粗糙度和表面粗糙度。图 9 显示了未抛光硅片的俯视图, 其中矩形定义了用于表面粗糙度计算的区域。图 10 显示了硅片的翘曲测量。

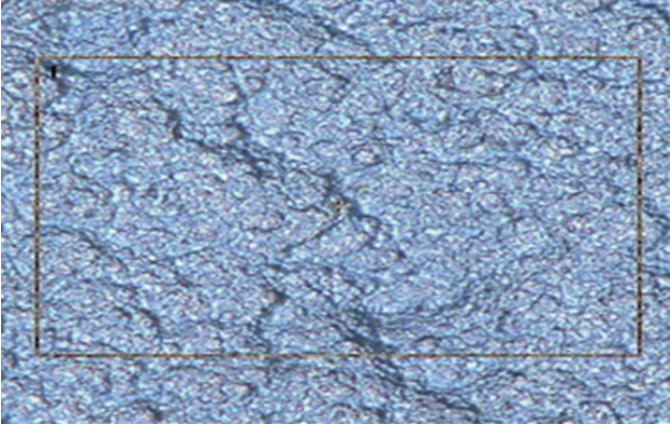


图 9. 用于面粗糙度分析的未磨光硅片的图像。用户指定的矩形定义计算所用的区域。

结论

Zeta 光学轮廓仪是一种灵活而准确的工具，用于太阳能电池的非破坏性和高产量的测量。Zeta 光学轮廓仪采用 ZDot 技术、HDR 功能以及专门为太阳能应用开发的算法和程式，可以对太阳能电池绒面、激光凹槽、太阳能金属栅线和太阳能主栅线进行自动和全面的表征。Zeta 测量系统包括专门为太阳能行业应用定制的算法和程式，该解决方案可以量化太阳能电池中关键的几何特征。该程式使工艺工程师能够优化其制造工艺，质量控制工程师可以监控产品质量，以生产最具成本效益和高性能的太阳能电池。

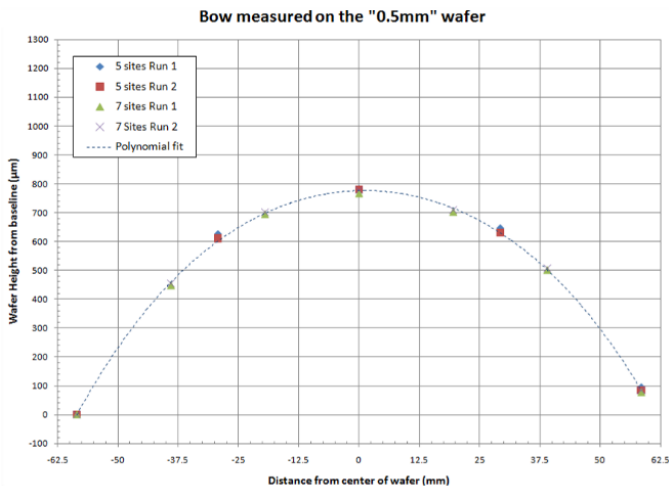


图 10. 2D 晶圆翘曲测量结果量化了硅晶圆的高度变化。