

SPM300 半导体晶圆应力&载流子浓度测试系统

在半导体制造过程中，诸如退火、切割、光刻等工序会在材料中引入应力。这些应力可分为张应力和压应力，分别对应拉伸和压缩作用。适当的应力有助于提升器件性能，例如在硅晶体中引入张应变可提高电子迁移率，从而增强器件速度。然而，过度或不均匀的应力可能导致材料缺陷、晶圆翘曲，甚至影响器件的可靠性和寿命。

拉曼光谱作为一种非破坏性检测技术，能够高灵敏度地检测材料中的应力状态。其原理基于光与材料内化学键的相互作用，通过分析散射光谱的变化，获取材料的应力信息。与其他检测方法相比，拉曼光谱具有快速、无损、空间分辨率高等优势，特别适用于半导体材料的应力检测。

什么是拉曼光谱测试？

拉曼光谱是一种基于光与物质相互作用的非破坏性分析技术，主要用于研究材料的分子振动、旋转和其他低频模式。当单色激光照射到样品上时，大部分光子会发生弹性散射（瑞利散射），其频率与入射光相同。然而，约有一百万分之一的光子会与样品分子发生非弹性散射，导致散射光的频率发生变化，这种现象被称为拉曼散射。

拉曼光谱通过检测这些频率变化，提供关于样品分子结构、化学键和分子间相互作用的信息。在拉曼光谱中，每个峰对应特定的分子振动模式，其位置和强度反映了分子的特性。由于不同物质的拉曼光谱具有独特的特征，因此被称为物质的“化学指纹”，可用于快速识别和区分不同材料。

此外，拉曼光谱在检测材料应力和应变方面也具有独特优势。材料中的应力会导致晶格结构的变化，从而引起拉曼谱峰的位置和形状发生变化。通过分析这些变化，可以非破坏性地评估材料的应力状态。

应力的来源与检测方法

应力是指材料内部由于外力或温度变化等因素引起的内力，通常以单位面积上的力来表示。根据作用方式，应力可分为：

张应力（拉应力）：使材料沿某方向伸长的应力。在半导体材料中，适当的张应力可提高电子迁移率，增强器件性能。

压应力：使材料沿某方向缩短的应力。在某些情况下，压应力可能导致材料变形或性能下降。

在半导体制造过程中，如退火、切割、光刻等工序，都会引入应力。适当的应力有助于提升器件性能，但过大的应力可能导致材料缺陷、晶圆翘曲，影响器件的可靠性和寿命。

检测薄膜应力的常用方法包括X射线衍射和拉曼光谱：

X射线衍射 (XRD)：通过测量晶格常数的变化来计算应力。该方法精度高，但对样品制备要求严格，测量范围较小，难以实现在线检测。

拉曼光谱：通过检测拉曼谱峰的位置变化来评估应力。该方法具有非接触、无损、快速、空间分辨率高等优点，适用于在线监测和微区分析。

APPLICATION IN STRESS DETECTION OF SEMICONDUCTOR MATERIALS 在半导体材料应力检测中的应用

拉曼光谱作为一种非破坏性、高灵敏度的分析技术，广泛应用于半导体材料的应力检测。通过分析拉曼谱峰的位置和形状变化，可以评估材料内部的应力状态。

单晶硅和多晶硅的应力检测

单晶硅和多晶硅在拉曼光谱中的特征峰位于约 520CM^{-1} 处，对应于硅的晶格振动模式。

当材料内部存在应力时，晶格常数发生变化，导致拉曼谱峰发生位移：

张应力（拉应力）：使晶格常数增大，拉曼谱峰向低波数方向移动。

压应力：使晶格常数减小，拉曼谱峰向高波数方向移动。

通过测量拉曼谱峰的位移量，可以定量评估材料中的应力大小。例如，在多晶硅薄膜中，拉曼谱峰的频移与残余应力之间存在线性关系，可用于计算应力值。

拉曼光谱与应变硅材料

应变硅（STRAINED SILICON）技术通过在硅材料中引入应变来提高载流子迁移率，从而提升器件性能。常见的方法包括：

引入张应变：在硅中引入拉伸应力，增大电子迁移率。

引入压应变：在硅中引入压缩应力，增大空穴迁移率。

拉曼光谱可用于表征应变硅材料的应力状态。应变的存在会导致拉曼谱峰发生位移，且位移方向和幅度与应变类型和大小相关。通过分析拉曼谱峰的变化，可以评估应变硅材料中的应力分布和应变程度，为器件设计和工艺优化提供参考。

EXPANDED APPLICATIONS IN VARIOUS SEMICONDUCTOR TESTING 在多种半导体检测中的拓展应用

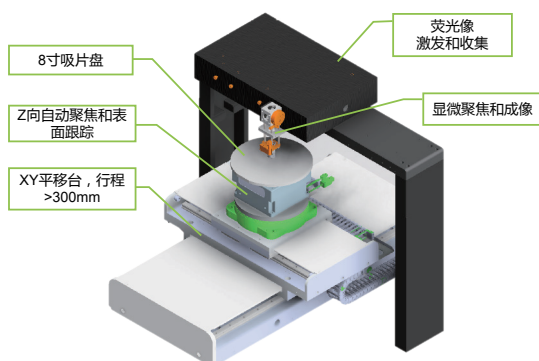
拉曼光谱作为一种非破坏性、高灵敏度的分析技术，已在半导体领域得到广泛应用，除应力检测外，还包括以下方面：

纯度检测：拉曼光谱可用于评估半导体材料的纯度，检测杂质和污染物的存在，从而确保材料质量。

合金成分分析：在III-V族半导体合金中，拉曼光谱可用于确定组分比例，分析材料的化学组成。

结晶度评估：通过分析拉曼谱峰的形状和宽度，可以评估材料的结晶度，判断其晶体质量。

缺陷检测：拉曼光谱对晶格缺陷敏感，可用于检测材料中的缺陷和位错，评估其对器件性能的影响。



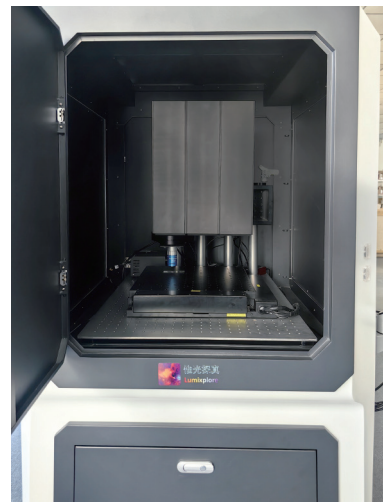
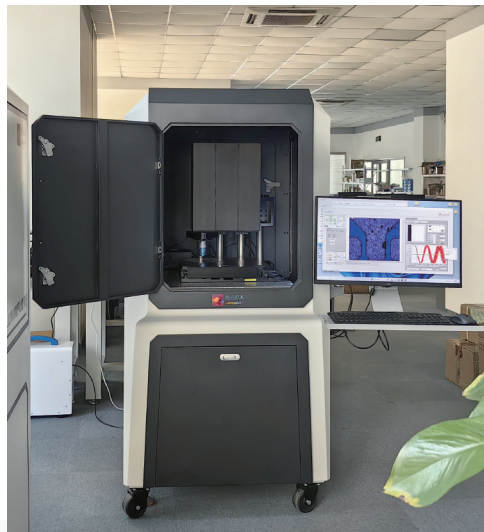
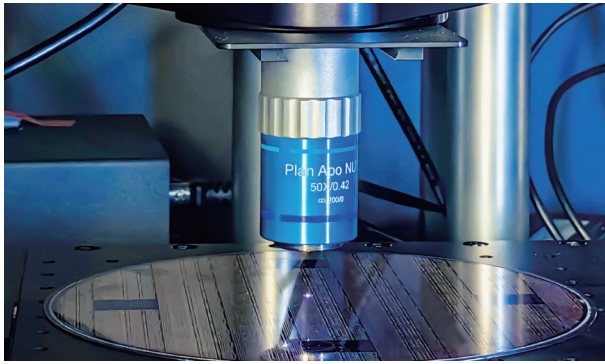
产品特性和核心技术：

<ul style="list-style-type: none"> 激光自动聚焦。 	<ul style="list-style-type: none"> 可同位深集明场显微镜、可见光波段暗场荧光像、红外波段暗场荧光像，分析样品中位错、层错等晶格缺陷的分布。
<ul style="list-style-type: none"> 自主研发的激光辅助离焦量传感器：可在紫外激发光照射样品并采集荧光信号的同时工作，实现自动聚焦和表面跟踪。 	<ul style="list-style-type: none"> 全自动操作。
<ul style="list-style-type: none"> 紫外暗场照明。 	<ul style="list-style-type: none"> 自动化的控制软件和数据处理软件，全软件操作。
<ul style="list-style-type: none"> 标配波长275nm紫外激光，可按用户要求定制其它波长激光。 	<ul style="list-style-type: none"> 相关国家标准：《中华人民共和国国家标准GB/T 43493.3-2023 半导体器件 功率器件用碳化硅同质外延片缺陷的无损检测识别指南 第3部分：缺陷的光致荧光检测方案》（2023年12月28日发布，2024年7月1日实施）

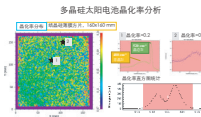
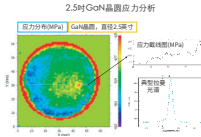
性能参数:

拉曼激发和收集模块	激发波长	532 nm
	激光功率	50 mW
	自动对焦	在全扫描范围自动聚焦和实时表面跟踪 对焦精度 < 0.2 μm
	显微镜	用于样品定位和成像 100x, 半复消色差物镜 空间分辨率 < 2 μm
	拉曼频移范围	80 ~ 9000 cm ⁻¹
样品移动和扫描平台	平移台	扫描范围大于300x300 mm ² , 最小分辨率 1 μm。
	样品台	8吋吸气台 (12吋可定制) 可兼容2、4、6、8吋晶圆片
光谱仪和探测器	光谱仪	焦距320 mm单色仪, 接面阵探测器。 分辨率 < 2.0 cm ⁻¹ 。
软件	控制软件	可选择区域或指定点位自动进行逐点光谱采集
	Mapping数据分析软件	可对光谱峰位、峰高和半高宽等进行拟合。 可自动拟合并计算应力、晶化率、载流子浓度等信息, 样品数据库可定制。 主成分分析 (PCA) 和k-均值聚类处理模块。 将拟合结果以二维图像方式显示。

● 上述表格中的激光波长、物镜和单色仪等部件可以根据客户需求调整。

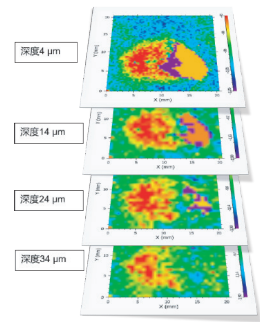


应用案例:
SiC晶圆中3D应力检测



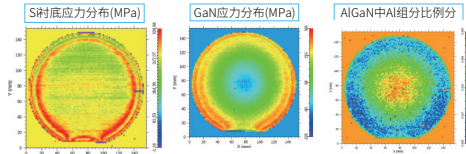
晶化率指晶态与晶界占晶态、晶态、晶界总和的质量百分比或体积百分比, 是评价硅晶薄膜晶化效率的一项重要指标, 晶化率X、C可通过拟合拉曼光谱分峰后定量计算。

SiC晶圆, 直径6英寸

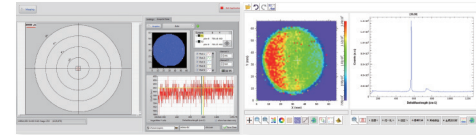


多层复杂结构晶圆质量检测—Si/AlGa/GaN多层结构晶圆

AlGa/GaN晶圆, 直径6英寸



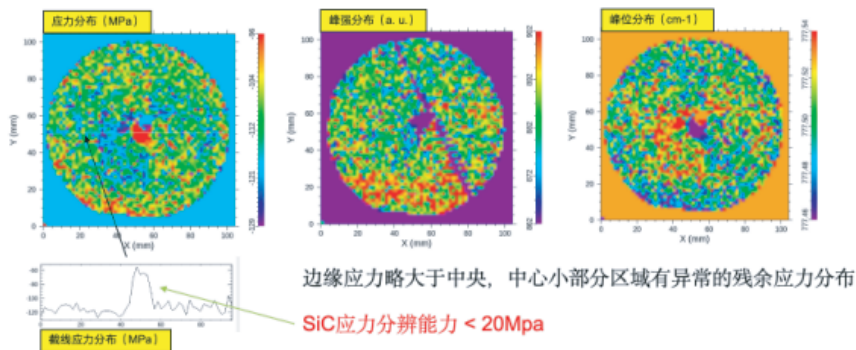
扫描控制和数据处理软件界面:



应用案例——SiC晶圆残余应力

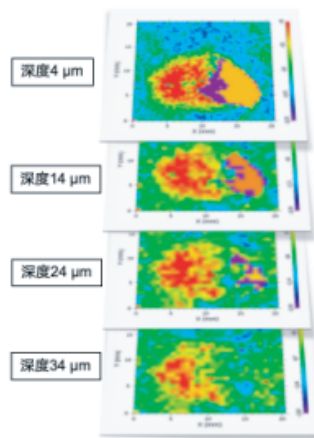
将拉曼峰位与文献中的无应力SiC比较，差值乘以系数：值越大代表越多拉应力，越小代表越多压应力

材料 4H-SiC 计算方法：应力(MPa) = -[拉曼峰位(1/cm) - 777.16 (1/cm)] × 323.00 (正值为拉应力)



“CT式成像”：中心异常区域的3D 应力分布

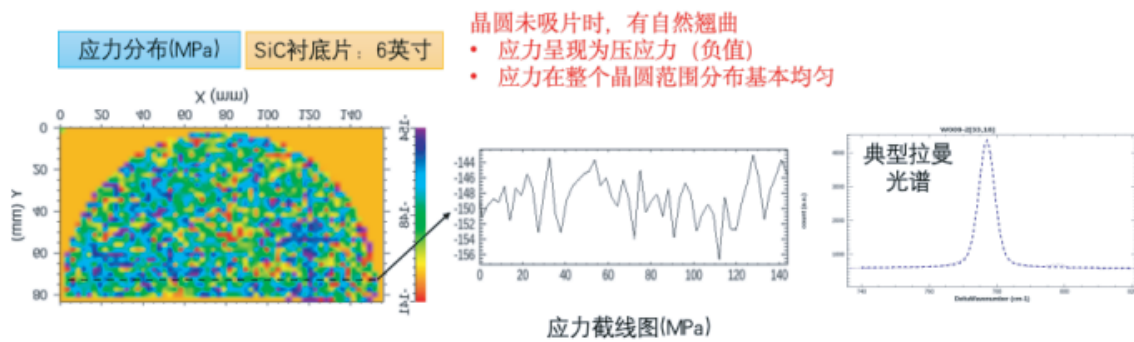
中心区域不同深度扫描-应力变化，随着深度方向，异常区域逐渐缩小



实测数据

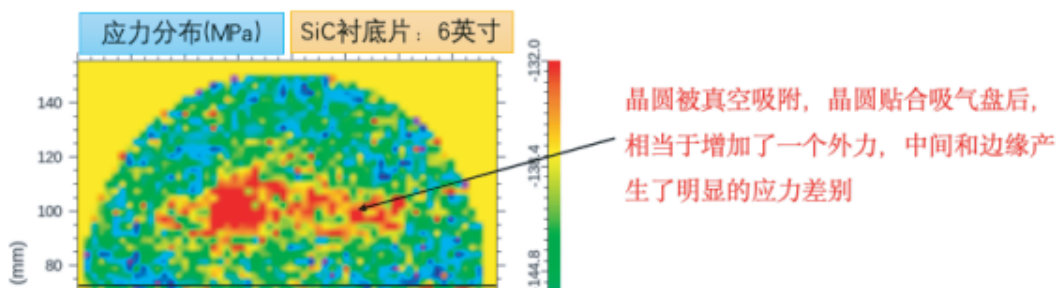
残余应力——样品自然翘曲，未吸片

- 利用 777cm^{-1} 位置的特征峰位移动，可以检测4H-SiC晶圆表面残余应力分布。
- 此次测量样品自然摆放，未吸片，肉眼观察晶圆有一定翘曲。



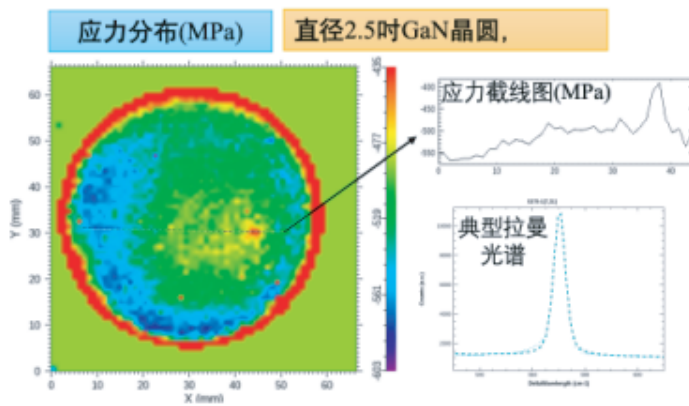
加外力下的应力——样品被真空吸附在样品盘后

- 利用 777cm^{-1} 位置的特征峰位移动，检测4H-SiC晶圆表面应力分布。
- 此次测量样品真空吸附到样品盘，肉眼观察晶圆贴合吸气盘，无翘曲。



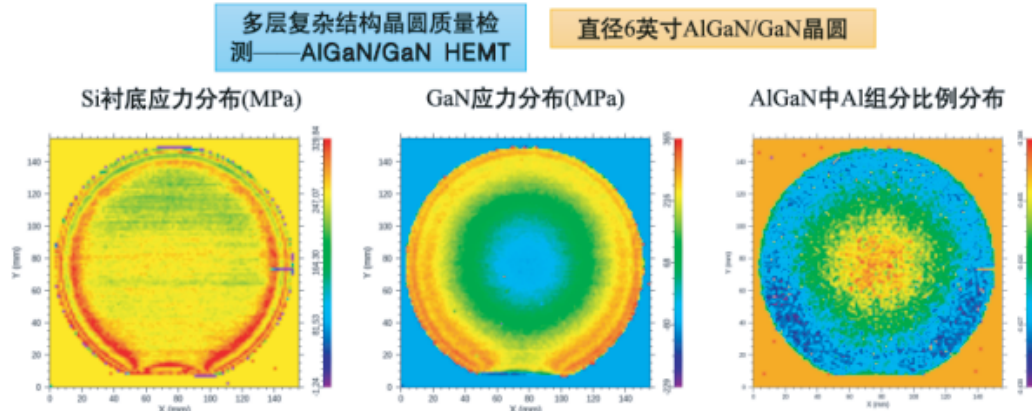
应用案例——GaN衬底应力分布

- 利用拉曼光谱568 cm^{-1} 位置的特征峰位移动，可以检测GaN晶圆表面应力分布。
- 类似方法还可应用于表征Si/SiC/GaAs等多种半导体。



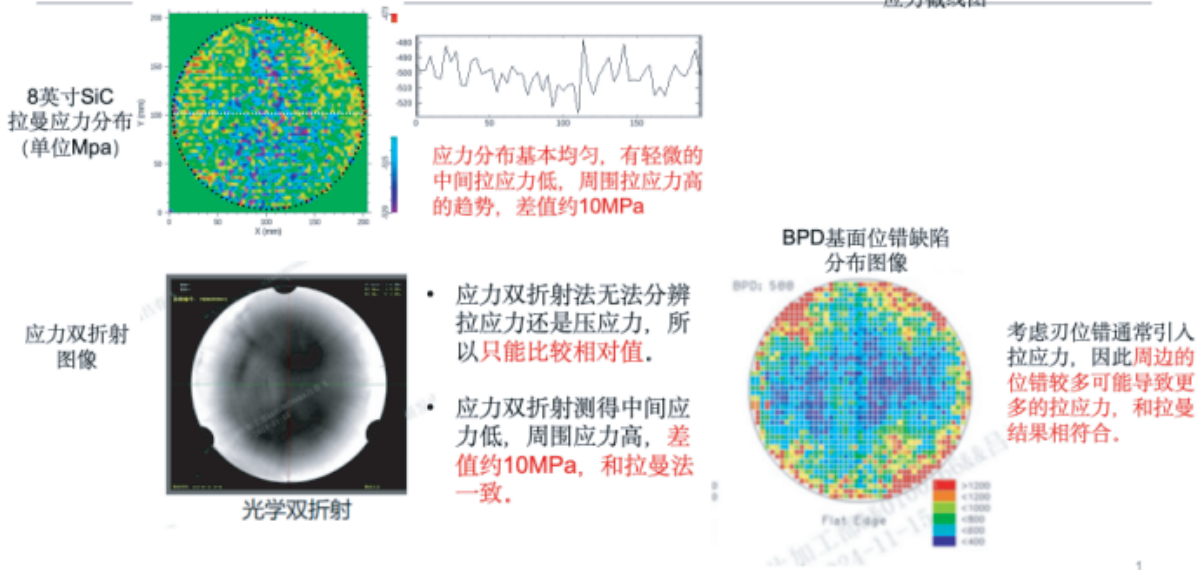
应用案例——多层薄膜综合测试

- 晶圆片包含Si/AlGaN/GaN多层薄膜结构。
- 拉曼光谱可给出多层结构的指纹峰，并对其应力、组分、载流子浓度等进行分析。

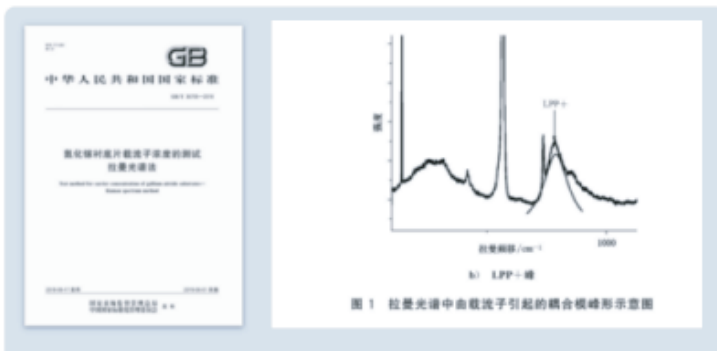


实测数据

和其他测试方法的比对



载流子浓度测量——拉曼法原理



在一定温度下，物质晶格中的原子各自在其平衡位置附近作微振动(晶格振动)，晶格振动的能量用声子表示。氮化镓材料中一定浓度的载流子与晶格振动相互作用，可以形成纵光学声子与载流子的耦合模(LO phonon-plasmon coupled mode, 简称 LOPC)，该耦合模可以在拉曼光谱上出现低频支、高频支(lower and upper frequency branches, 常标记为 LPP-和 LPP+)的特征峰。该特征峰的峰位随载流子浓度的变化而改变，通过峰位的变化可计算出载流子浓度。本方法通过拉曼光谱可实现对 N 型氮化镓衬底片载流子浓度的微区测试，测量直径为 0.7 μm~2 μm。

主要优点:

1. 利用拉曼光谱法测量载流子浓度具有**非接触、速度快**等优势。
2. 通过共聚焦拉曼光谱可以测量**微米尺度局域载流子浓度**，可对片内**均匀性**进行评估。
3. 适用的材料体系：**氮化镓、碳化硅等六方晶系N型半导体材料**。

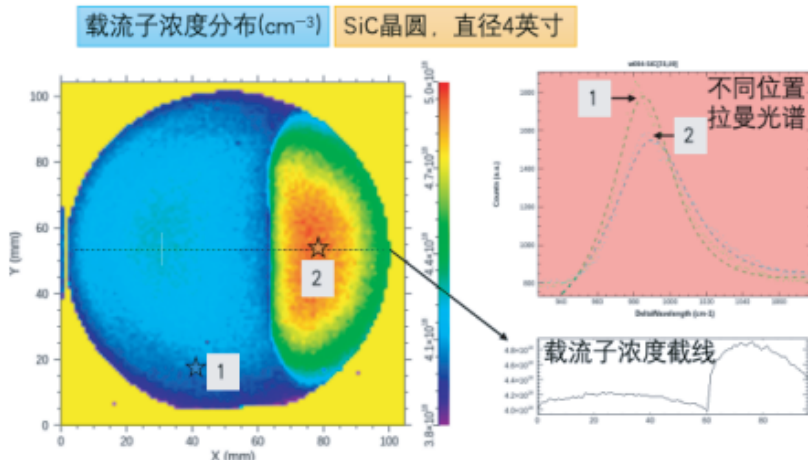
可测试的载流子浓度范围:

$10^{17} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

重复实验的标准偏差<5%

实测数据

应用案例——SiC外延层载流子浓度



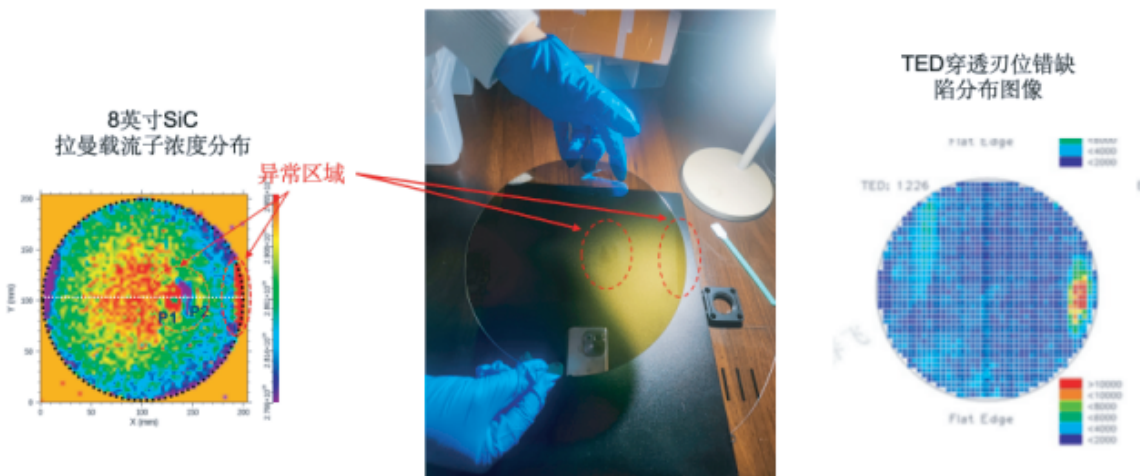
- 通过声子与载流子耦合形成的特征峰位变化, 可以定量计算n型GaN载流子浓度变化。
- 适用GaN、SiC和AlGaN等多种六方晶系n型半导体材料。
- 可测试的载流子浓度范围: 10^{17} - 10^{20} cm^{-3} , 重复实验的标准偏差<5%

相关检测方法国家标准

□ 《GB / T_36705-2018_氮化镓衬底片载流子浓度的测试拉曼光谱法》(2018年9月17日发布, 2019年6月1日实施)

拉曼法载流子浓度和缺陷的关联

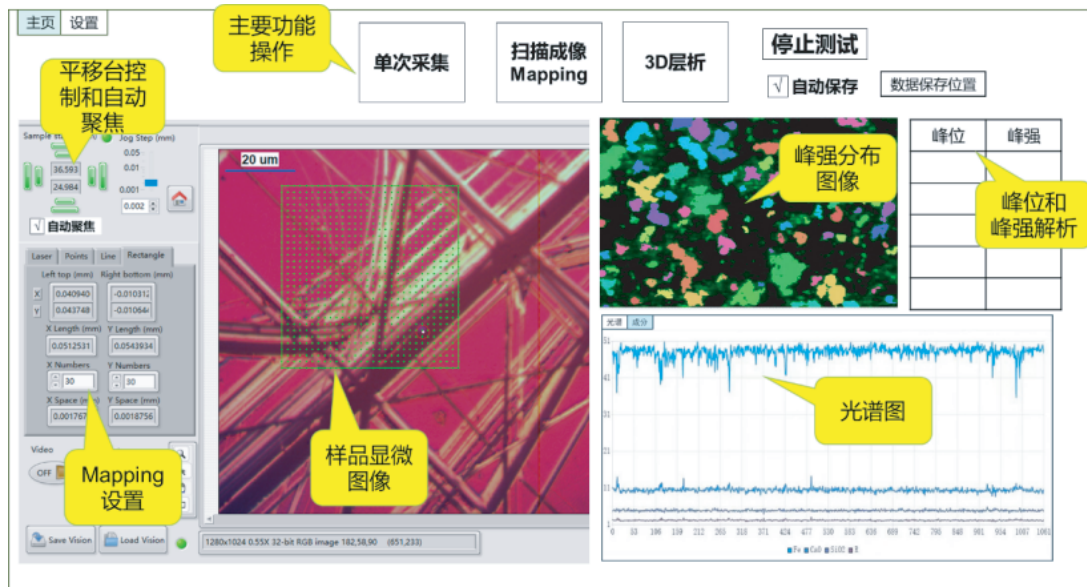
拉曼载流子浓度异常区域与晶圆片肉眼可见异常区域重合, 和穿透刃位错分布相关联



智能化软件平台和模块化设计

- ▶ 统一的软件平台和模块化设计
- ▶ 良好的适配不同的硬件设备：平移台、显微成像装置、光谱采集设备、自动聚焦装置等
- ▶ 成熟的功能化模块：晶圆定位、光谱采集、扫描成像Mapping、3D层析，Raman Mapping, FLIM, PL Mapping, 光电流Mapping等。
- ▶ 智能化的数据处理模组：与数据拟合、机器学习、人工智能等结合的在线或离线数据处理模组，将光谱解析为成分、元素的分布等，为客户提供直观的结果。可根据客户需求定制光谱数据解析的流程和模组
- ▶ 可根据客户需求进行定制化的界面设计和定制化的RECIPE流程设计，实现复杂的采集和数据处理功能。

显微光谱成像控制软件界面：

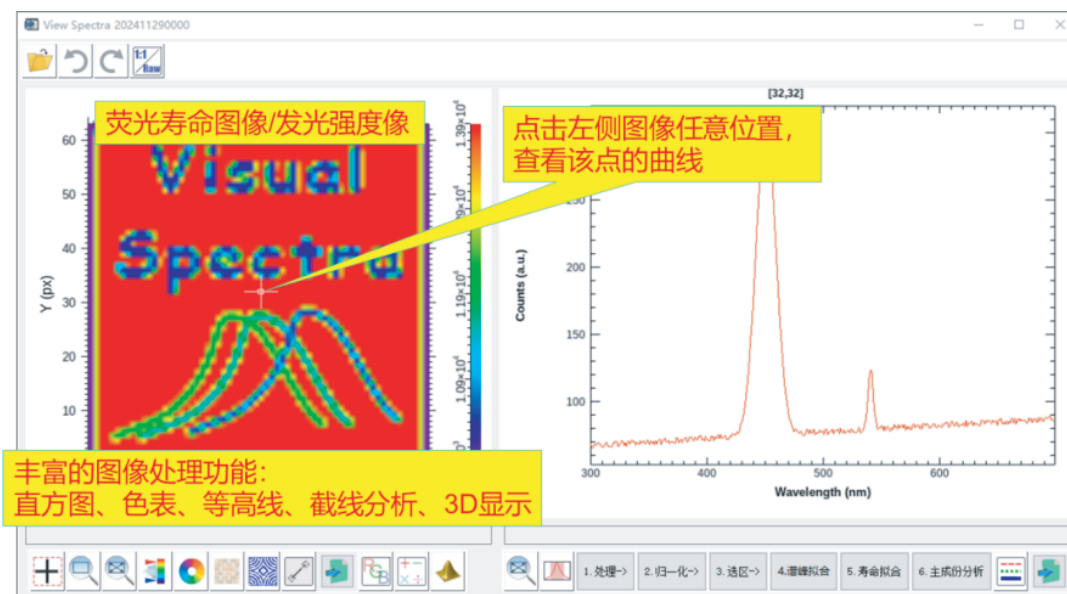


POWERFUL SPECTRAL IMAGE DATA PROCESSING SOFTWARE VISUALSPECTRA

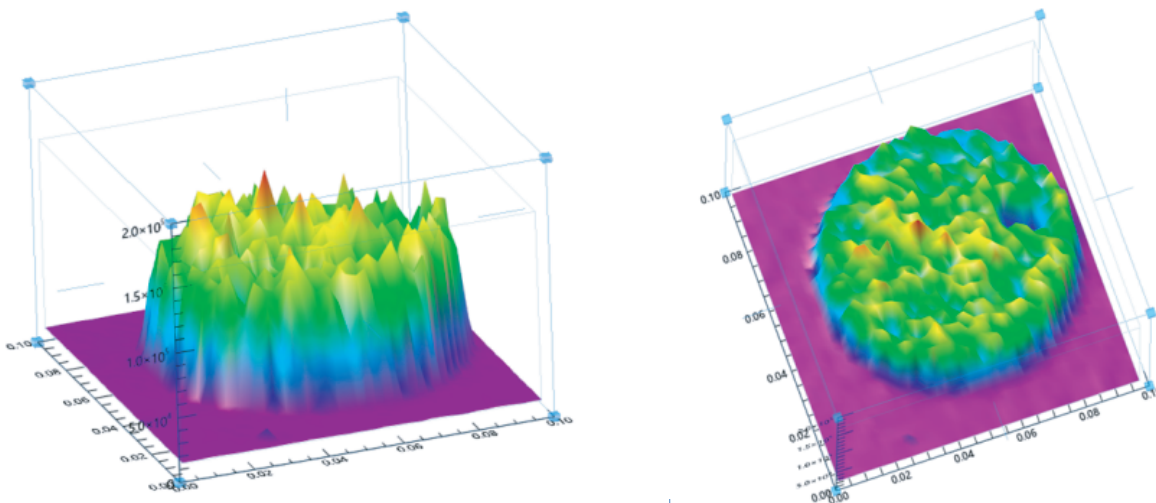
强大的光谱图像数据处理软件VISUALSPECTRA

显示：针对光谱Mapping数据的处理，一次性操作，可对整个图像数据中的每一条光谱按照设定进行批处理，获得对应的谱峰、寿命、成分等信息，并以伪彩色或3D图进行显示。

显微光谱成像控制软件界面：



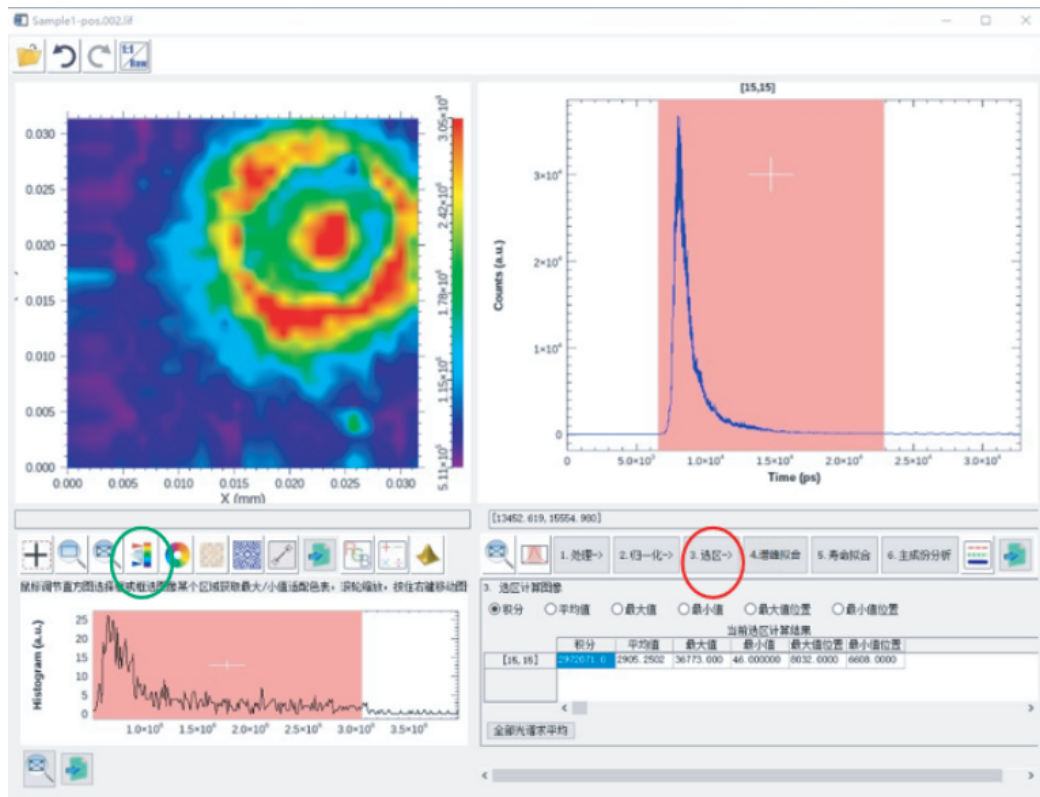
3D显示：



基础处理功能:去本底、曲线平滑、去杂线、去除接谱台阶、光谱单位转化



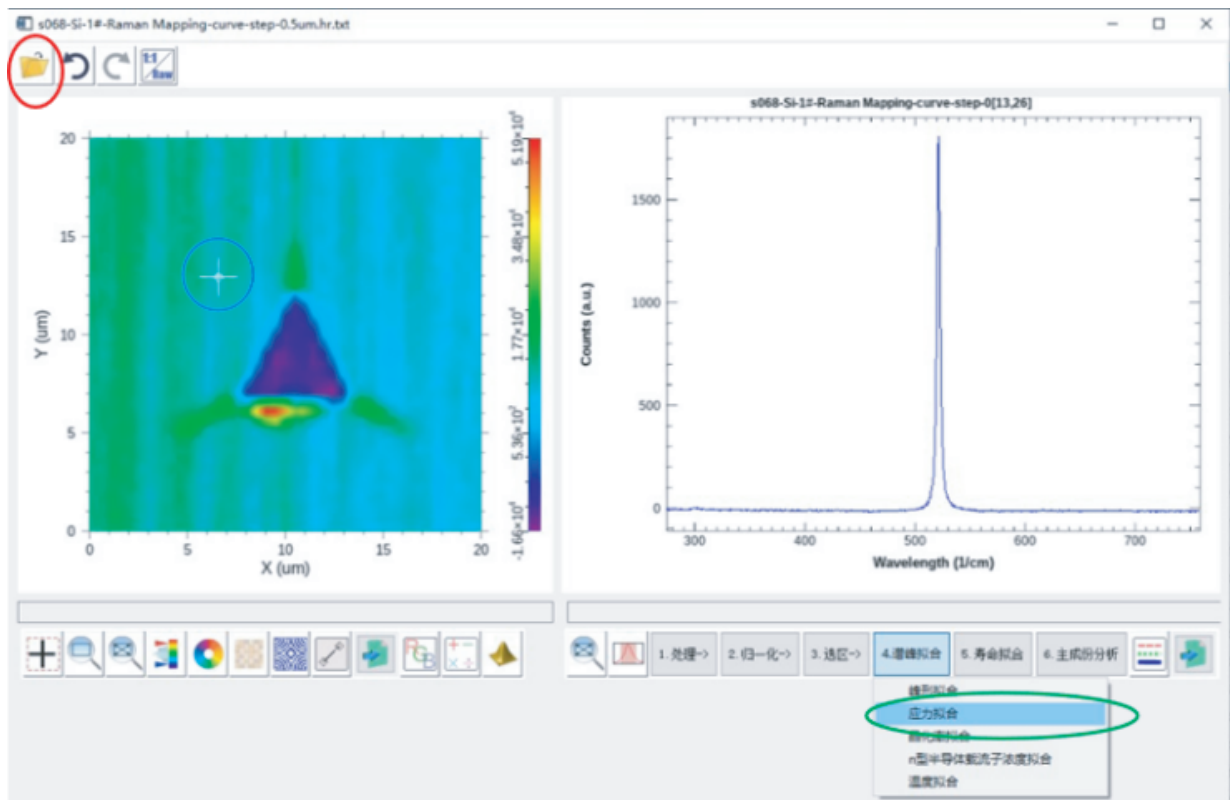
进阶功能:光谱归一化、选区获取积分、最大、最小、最大/最小值位置等



谱峰拟合:采用多种峰形(高斯、洛伦兹、高斯洛伦兹等)对光谱进行多峰拟合,获取峰强、峰宽、峰位、背景等信息。



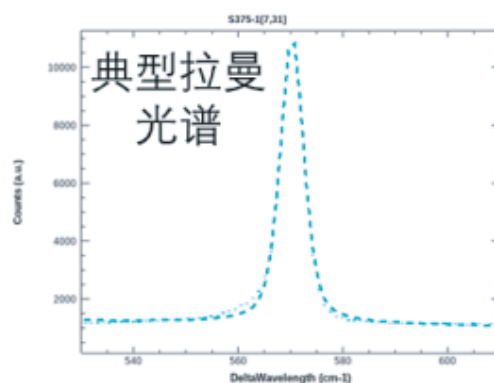
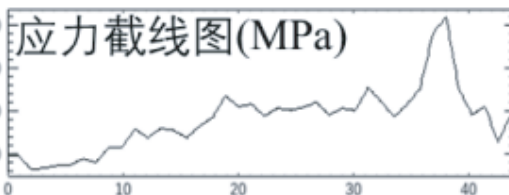
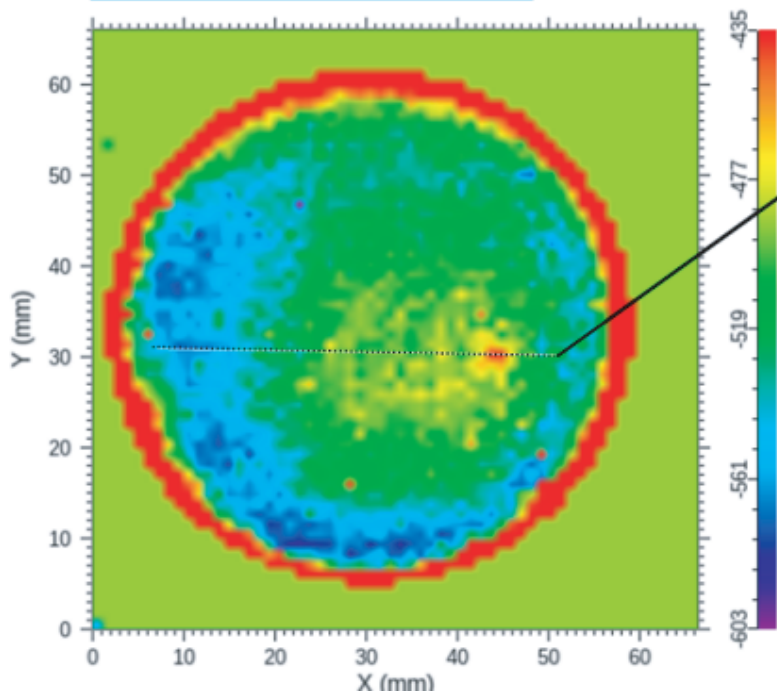
高级功能:应力拟合:针对Si、GaN、SiC等多种材料,从拉曼光谱中解析材料的应力变化,直接获得应力定量数值,并可根据校正数据进行校正。



高级功能:应力拟合:针对Si、GaN、SiC等多种材料,从拉曼光谱中解析材料的应力变化,直接获得应力定量数值,并可根据校正数据进行校正。

应力分布(MPa)

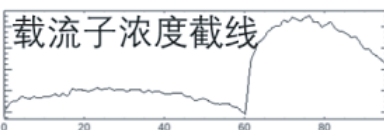
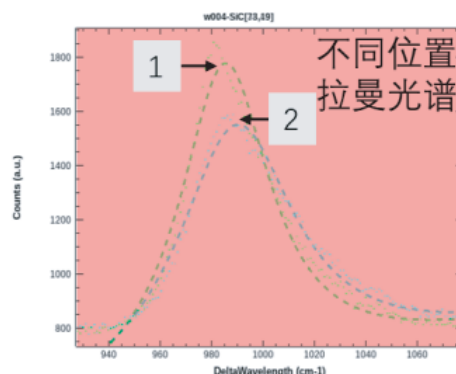
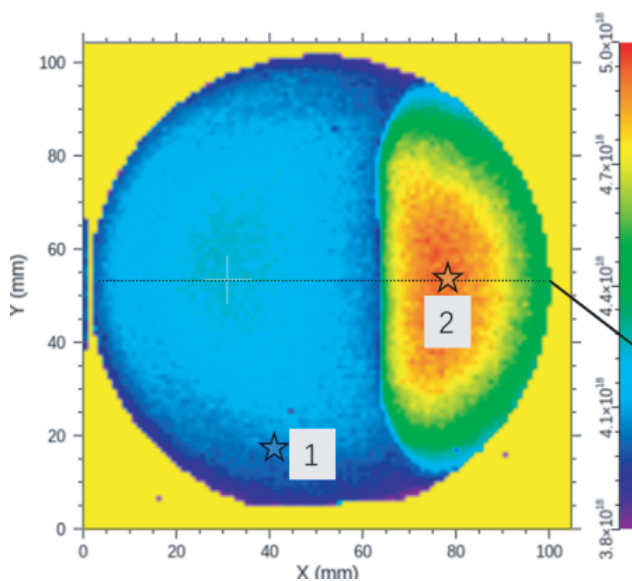
直径2.5吋GaN晶圆,



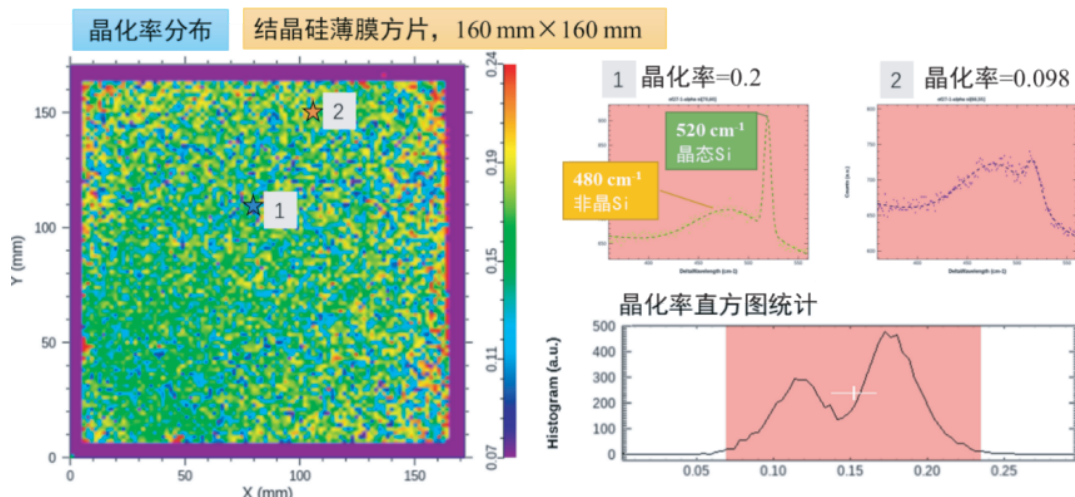
载流子浓度拟合

载流子浓度分布(cm^{-3})

SiC晶圆, 直径4英寸



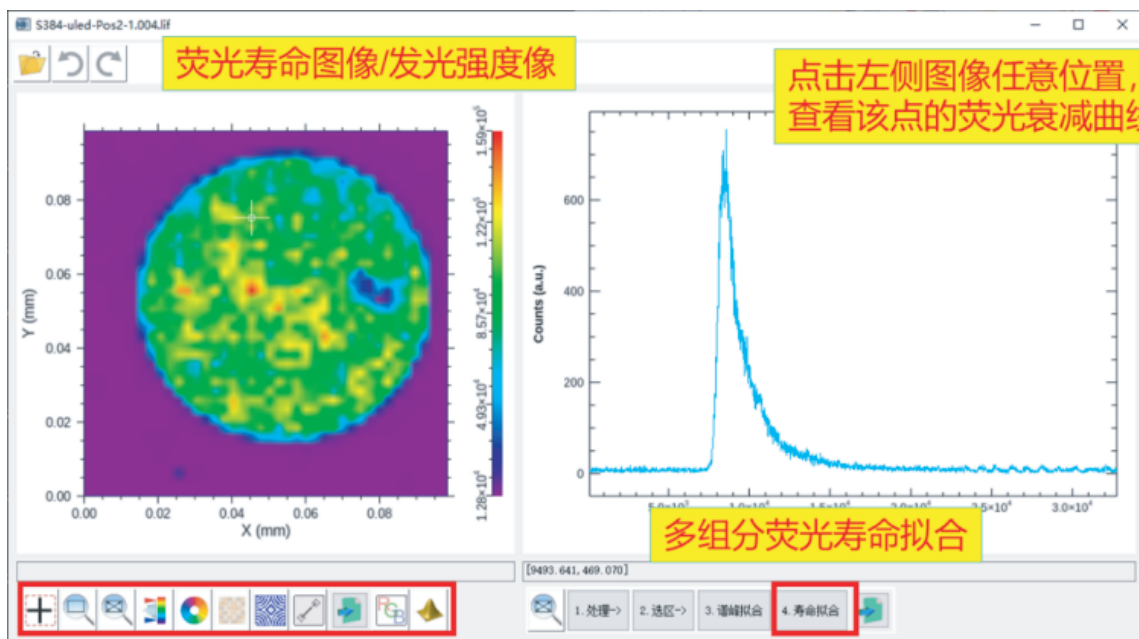
晶化率拟合



荧光寿命拟合

自主开发的一套时间相关单光子计数 (TCSPC) 荧光寿命的拟合算法, 主要特色

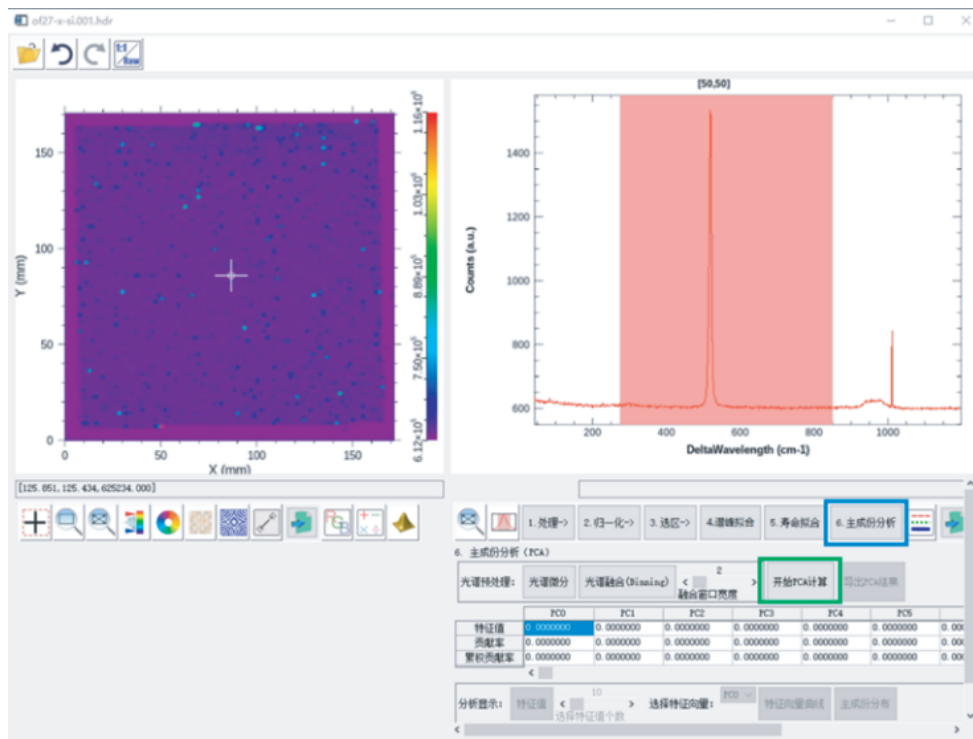
1. 从上升沿拟合光谱响应函数 (IRF), 无需实验获取。
2. 区别于简单的指数拟合, 通过光谱响应函数卷积算法获得每个组分的荧光寿命, 光子数比例, 计算评价函数和残差, 可扣除积分和响应系统时间不确定度的影响, 获得更加稳定可靠的寿命数值。
3. 最多包含4个时间组分进行拟合。



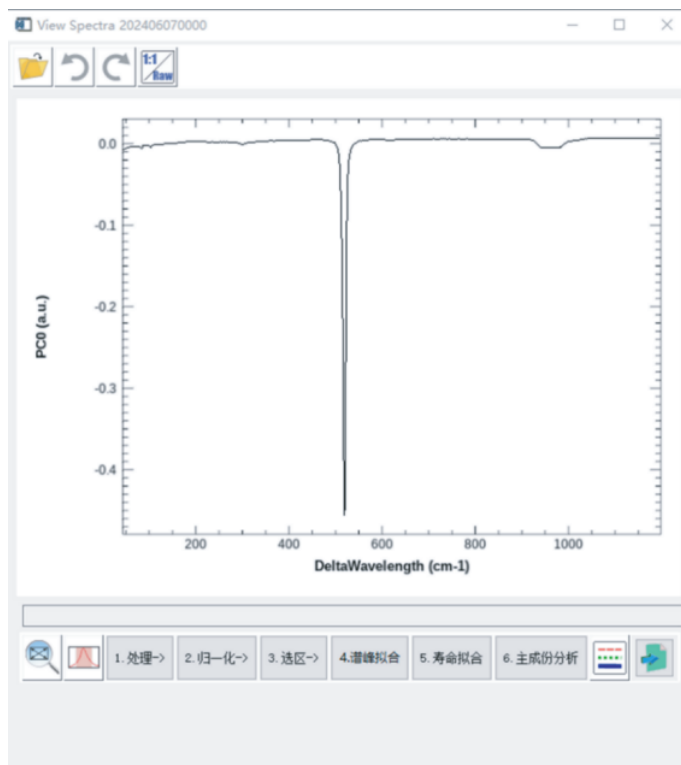
荧光寿命拟合



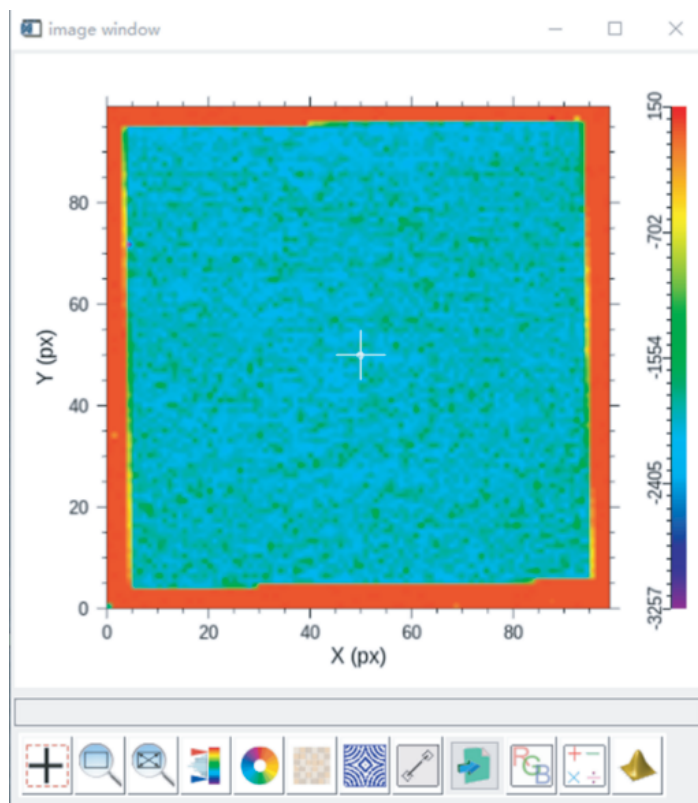
主成分分析和聚类分析



每个主成分的谱显示



主成分分布图:



主成分聚类处理和分析：

