

OmniFluo990-DUV 深紫外宽禁带半导体荧光测试系统

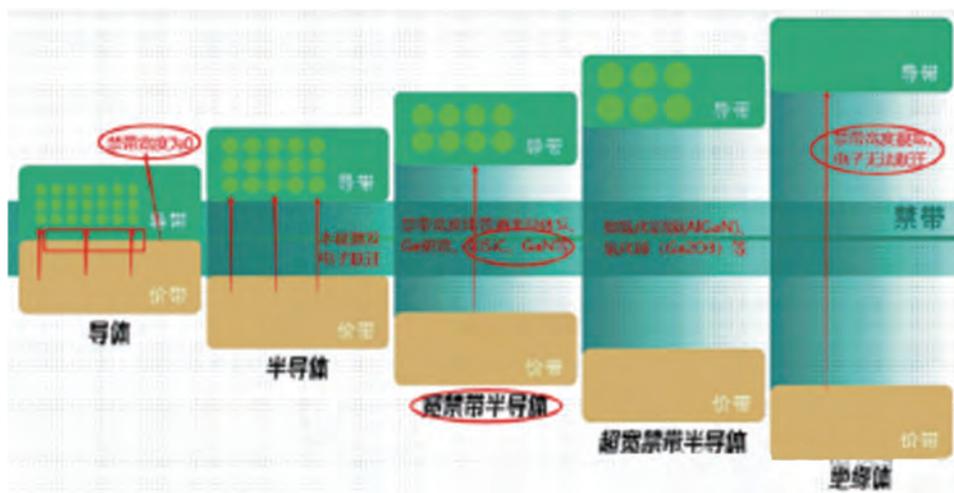
一、什么是宽禁带半导体呢？

固体的能带结构主要分为导带、价带和禁带三部分，原子中最外层电子称为价电子，价电子所占据的能带称为价带；比价带能量更高的允许带称为导带；在价带和导带之间的范围是电子无法占据的，这一范围称为禁带。

材料想要导电，就需要价带中的电子跃迁到导带中，形成可以自由移动的电子。电子需要跃迁的距离就是禁带宽度。

物体要导电，就必须在导带中存在可以移动的自由电子。因此，我们可以猜想：禁带宽度越窄的物体，电子就越容易发生跃迁，因此就越容易导电。相反，禁带宽度越宽的物体，电子跃迁所需要的能量就越高，因此就越不容易发生电子跃迁而导电。

那事实是不是和我们猜想的一样呢？让我们分别来看一下导体、半导体、宽禁带半导体、超宽禁带半导体和绝缘体的禁带宽度，如下图所示。



从图中我们可以看出，导体的价带顶部和导带的底部挨在了一起，即导体的禁带宽度为0。因此，导体不需要外部能量，价带中的电子就可以移动到导带中，从而导电。

绝缘体的价带和导带之间的距离最远，远到电子基本无法获得足够的能量发生跃迁。

半导体的禁带宽度介于导体和绝缘体之间。

宽禁带半导体就是禁带宽度大于传统半导体的一种半导体材料，如碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）。如果禁带宽度再宽一点，就被称为超宽禁带半导体，如氮化铝镓（AlGaN）、氧化镓（Ga₂O₃）等。

第三代半导体材料——宽禁带半导体相比于传统半导体材料都有哪些优势呢？

碳化硅（SiC）是由碳元素和硅元素组成的一种化合物半导体材料，和氮化镓（GaN）都具有宽禁带宽度的特性，被称为第三代半导体材料。传统半导体材料Si和宽禁带半导体材料SiC、GaN的对比如下图所示。

性能指标	禁带宽度 /[eV]	临界场强 /[MV/cm]	电子迁移率 /[cm ² /V·s]	热导率 /[W/cm·K]	饱和电子漂移速率 /[10 ⁷ cm/s]
Si	1.12	0.3	1500	1.5	1.0
SiC	3.23	3.5	650	4.0	2.0
GaN	3.42	3.3	2000	1.3	2.5

从图中我们可以看出，半导体Si的禁带宽度为1.12电子伏特，而宽禁带半导体SiC禁带宽度为3.23电子伏特，宽禁带半导体GaN的禁带宽度和SiC差不多为3.42电子伏特。正是因为SiC和GaN具有更宽的禁带宽度，从而使其拥有更高的击穿电场强度，从上表中可以看出，SiC和GaN的临界电场强度大约是Si的10倍左右，因此宽禁带半导体器件的工作电压更高，体积更小。

SiC的热导率为4.0，而Si的导热率只有1.5，因此SiC的散热性能更好，拥有更优良的耐高温性能，有助于提高系统的整体功率密度。但我们也看到了氮化镓（GaN）的热导率只有1.3，因此这就决定了GaN半导体器件工作的功率没有SiC半导体器件工作的温度高。

饱和电子漂移速率是指半导体中电子漂移速度的最大值，当电子漂移速度达到该值时，即使再增大电场强度，电子的漂移速度也不会再增加。高饱和电子漂移速率的半导体材料在高频、高速信号的处理中有出色的表现。从上表可以看出，GaN的饱和电子漂移速率为2.5，比Si和SiC都大，因此GaN半导体器件常常应用于更高频率的场合。

除此之外，宽禁带半导体在辐射环境下的稳定性要远超过传统的Si基芯片，拥有优异的抗辐射能力和良好的化学稳定性。

总结:

通过对比，宽禁带半导体材料碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）相较于传统的半导体材料硅（Si）拥有更高的临界电场强度、更高的热导率和更大的饱和电子漂移速率，材料性能可以说是单方面碾压传统半导体材料硅（Si）。宽禁带半导体材料的这些优异性能，使得利用宽禁带半导体材料制作的半导体功率器件更能满足现代工业对于高功率、高电压、高频率、小体积的需求。

宽禁带半导体材料的表征,以载流子浓度及载流子迁移率为主。

宽禁带半导体材料测试难点在于:

- ▶ 宽禁带半导体材料的带隙较大，击穿电场较高。需要上千伏高压进行测试。
- ▶ 宽禁带半导体材料是高流器件的制备材料，需要用到几十安培的高流进行测试。
- ▶ 四线法及霍尔效应测试均是加流测压的过程，需要设备能输出电流并且测试电压。
- ▶ 电阻率及电子迁移率通常范围较大，需要电流电压范围都很大的设备。电流源和电压表精度要高，保证测试的准确性。
- ▶ 发光角度的差异：针对AlN的发光波段（200-210nm），没有合适的滤光片滤除激光，且AlN由于轻重空穴带反转，其荧光发光角度为侧面出光

我司研发的DUVL900 深紫外超宽禁带半导体荧光测试系统，基于我司20年左右的第三代半导体表征测试经验，可以有效地对宽禁带与超宽禁带半导体材料例如AlN和AlGaN等进行荧光激发。

▶系统方案说明如下：

SYSTEM STRUCTURE

系统结构

(一) 激光器部分

1. 国产195NM超短脉冲激光产生技术方案

以锁模钛宝石激光器作为基频光源，经过多级倍频/和频来产生195nm的深紫外激光。受非线性晶体相位匹配条件的限制，常用的紫外倍频晶体BBO直接倍频产生的激光波长 $>205\text{nm}$ ，但BBO晶体可支持和频的方式获得200nm波长以下的激光。因此拟采用倍频+两级和频的方式来获得所需的195nm激光，方案示意图如图1所示。780nm左右的基频光首先经倍频获得二倍频激光脉冲（390nm），然后二倍频激光再与剩余基频光和频获得三倍频脉冲（260nm），三倍频脉冲再与基频光和频产生四倍频紫外激光（195nm）。另外由于脉冲较短，激光在倍频与传输过程中会产生较大的群速走离，影响后续和频的效率，因此在每个和频单元需要加入延迟线来补偿不同波长光束之间产生的群速延迟，以保持脉冲之间的同步。



图1. 195NM超短脉冲激光产生方案示意图

(1) 基频光源技术参数

该方案需要的基频光源的主要技术参数：

- (1) 波长：780 nm
- (2) 脉冲宽度：~100 fs（或根据实际需求调整）
- (3) 重复频率：80 MHz（或根据实际需求调整）
- (4) 光束质量： $M^2 < 1.3$

(5) 功率：~2.5W（取决于对195nm激光功率的需求，2.5W基频光对应于约4mW的195nm激光功率）

(2) 输出功率

195 nm激光输出功率约4 mW（基频功率>2.5W@780nm）

(二) 光学部分设计概述

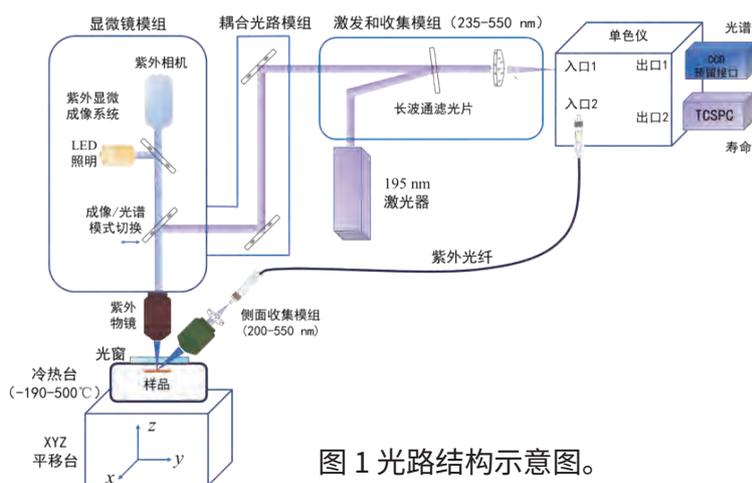


图 1 光路结构示意图。

光学部分如图 1 所示，由适配冷热台的显微镜模组、耦合光路模组、激发和收集模组（190nm-550 nm）、单色仪和TCSPC系统和侧面收集模组构成。

显微镜模组配备适配190-600nm的紫外物镜，可将激光聚焦成约2微米的光斑后激发样品荧光或光电流，从而大大提高激发功率密度，以获得较强的荧光信号。显微镜可在显微成像和荧光光谱两种模式下切换，用户可以通过聚焦到样品的显微像确认荧光收集区域、激光光斑聚焦和收集光路的对准等。

耦合光路模组将激光和物镜收集的荧光传输到激发和收集模组（190nm-550nm），通过长波通滤光片将195nm的激光和荧光分离，190nm-550nm的荧光进入单色仪入口1收集，通过时间分辨单光子系统（TCSPC）中的PMT获得荧光信号强度，通过光栅逐步长扫描获得光谱，通过TCSPC系统获得光谱的荧光寿命。

针对AlN的发光波段（200-210nm），没有合适的滤光片滤除激光，且AlN由于轻重空穴带反转，其荧光发光角度为侧面出光，因此设置侧面收集模组，将侧面发出的荧光（200-550nm）通过一个单独倾斜60度角的物镜收集后，通过光纤传入单色仪入口2进行收集和测量。

样品位于可变温-190~600℃(标配)与10K~300K（可选）冷热台中，可通过光窗进行光激发和收集。为了对样品进行聚焦，将冷热台置于手动XYZ平移台上，可在小范围内对样品进行选区和通过调节Z轴进行聚焦，具体的调节方式是：变温台实现XY方向调整，Z轴由物镜升降实现。

系统技术指标 System technical indicators

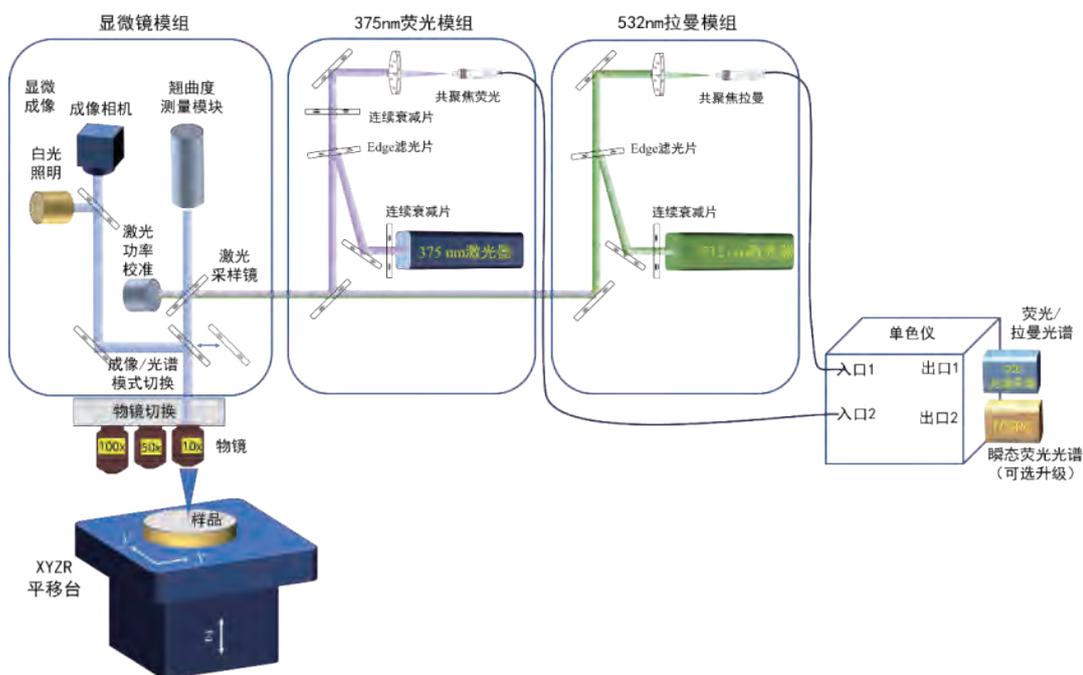
名称	组成	规格
深紫外显微光路系统	显微镜模组	25X 紫外物镜，数值孔径0.4，工作距离12.5mm，视觉分辨率0.8 μ m，聚焦195nm紫外光斑直径约2微米。
		紫外显微成像光路：可获得195nm激光光斑和样品表面的显微图像；可在荧光收集模式（对195nm激光进行聚焦）和成像模式（对样品表面进行聚焦和寻区）之间切换。
		紫外相机：分辨率1920x1080，视野范围0.42x0.24 mm
	侧面收集模组	紫外物镜：5X，数值孔径0.25 工作距离35mm
		紫外抗爆光纤

系统技术指标 System technical indicators

名称	组成	规格
显微光路系统 深紫外	耦合光路模组	配备光路准直调节机构，将激光和收集的荧光耦合到激发和收集模组。
	激发和收集模组	与195nm激光器对接 与单色仪狭缝对接，将荧光聚焦到单色仪狭缝入口。 长波通滤光片，荧光收集范围200-550 nm
冷热台	低温77K 或 4K可选 高温可以到600度 电学导线可选	
平移台	XY手动与电动可选 Z轴通过物镜进行调节	
单色仪	焦距：320mm 光栅：不同刻画线可选 探测器：PMT与CCD可选，用于时间衰减测试与稳态荧光光谱	
195nm飞秒脉冲激光器	配置锁模钛宝石激光器 输出波长：195 nm 输出功率：4mW（基频功率>2.5W@780nm） 重复频率：80 MHz 脉冲宽度：~200 fs 备注：KrF-193nm激光器可选	
面阵CCD探测器	像素2000×256 像素尺寸15μm 背感光 制冷温度-60℃	
荧光寿命模块测量模组	最短测试寿命：50ps	

REVOLUTIONARY SLOT STYLE PARALLEL OPTICAL PATH DESIGN

革命性的插槽式并联光路设计

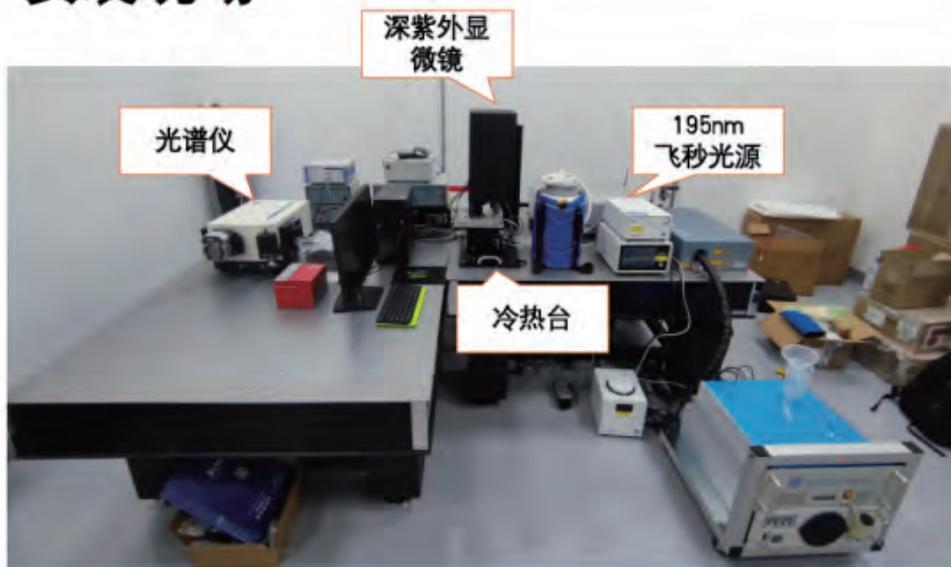


优势:

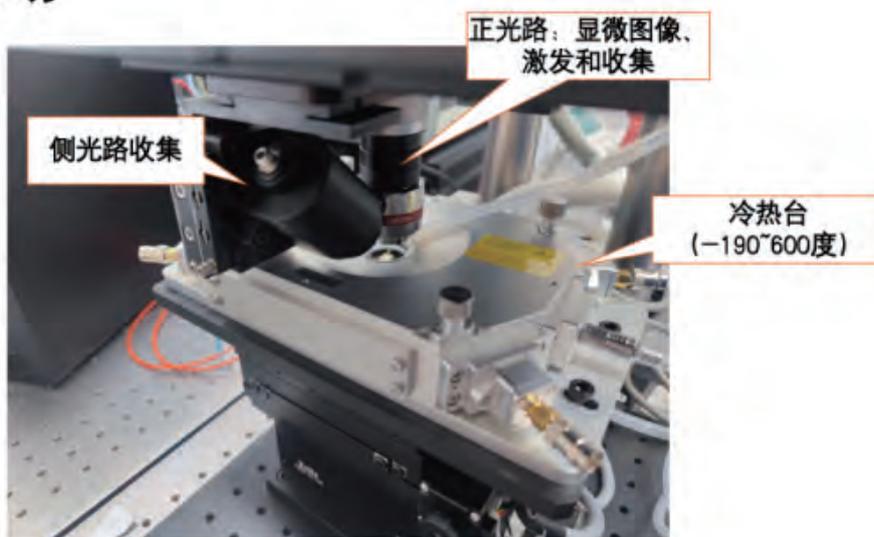
- ▶ 强大的光路稳定性：取消了传统意义上的显微镜周边冗余，更加贴合光路稳定性要求比较高的未来应用场景
- ▶ 无限拓展的可能性：显微镜光路，荧光，RAMAN，振镜扫描光电流光路，不同波长的荧光与RAMAN测试，依次并联，无限拓展
- ▶ 定量测试的高准确度：激光功率校准集成在显微镜模组中，通过测量激光采样镜获取的少量激光光强，可作为激光功率的实时校准和参考，并通过集成在荧光和拉曼模组中的连续衰减片调节光强。
- ▶ 更多的功能实现：荧光光强对于激发功率密度非常敏感，要准确的比较不同样品的荧光光强，需要应用翘曲度模组通过自动对焦，固定激发光斑的大小，同时通过激光功率校准来固定激发光强，最终保证了显微共聚焦荧光光强的稳定性和可比较性。

系统实际安装照片

安装现场

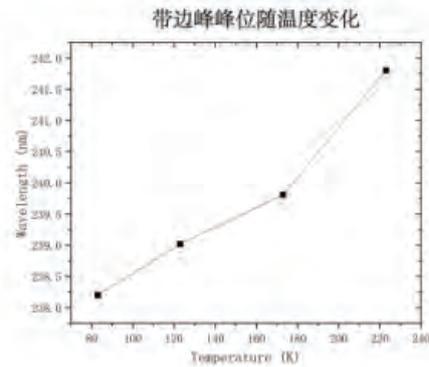
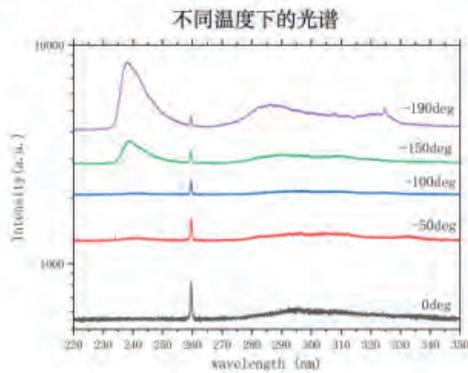


安装现场

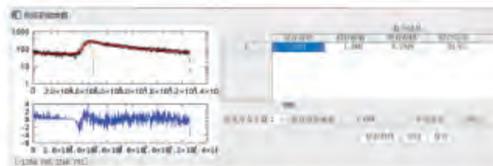
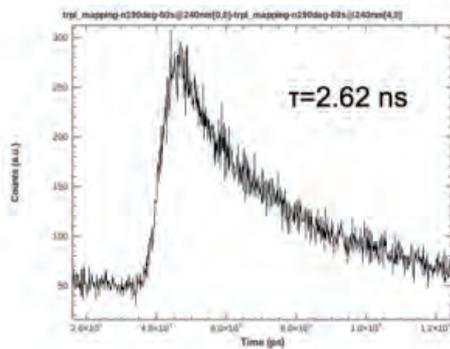


AlGaN (约70%Al组分) 变温测试-正接收光路

- 带边峰的强度(240nm)随温度降低快速增加, 峰位随温度蓝移,
- 杂质峰(270nm-350nm)的细节增加.

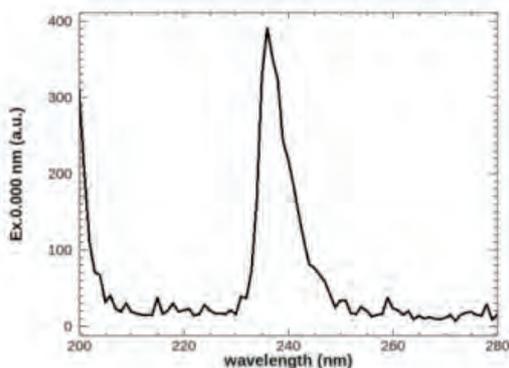


AlGaN带边发光的寿命—正接收光路 (-190度)

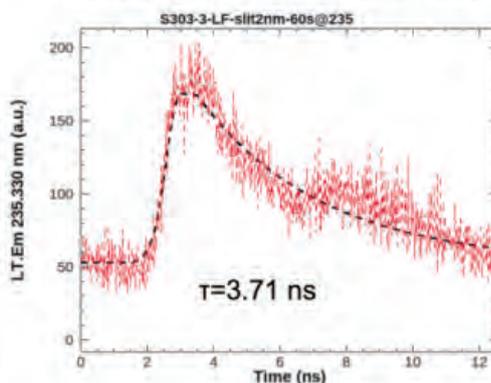


AlGaN (约70%Al组分) 发光—侧收集光路(-190度)

-侧面收集: 235nm位置带边峰, -190度



侧面收集: 235nm位置荧光寿命曲线, -190度

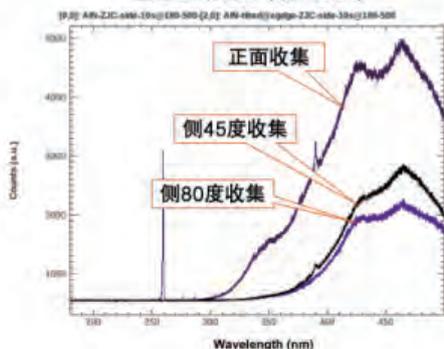


AlN—室温下的杂质发光

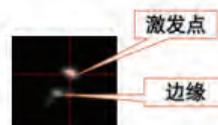
该样品为PVT生长的AlN衬底上, 用HVPE方法外延生长的AlN约270um后, 磨抛去除PVT衬底, 双面抛光的块体AlN。



室温下的发光 (杂质发光)



从侧面不同角度的测试结果看, 这片AlN可能有很强的带边发光, 但是由于光致发光的吸收深度较浅, 且侧向传播, 室温下, 被转化成了缺陷荧光发光后被收集。



MEASURED DATA

实测数据

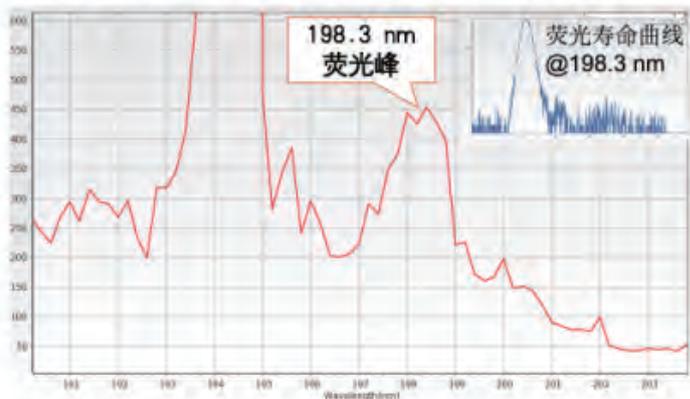
这片AlN的质量很好，无衬底透明单晶，在显微镜下195激光激发处有很强的荧光发光现象，甚至肉眼可以看到蓝色的荧光。



AlN——带边发光

-190度，有明显的发光峰!

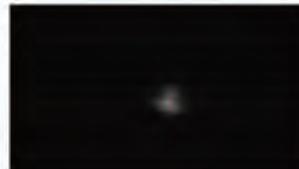
零下190度，194.5nm飞秒激光激发，氮化铝（AlN）荧光和荧光寿命



明场显微图像



明场荧光图像



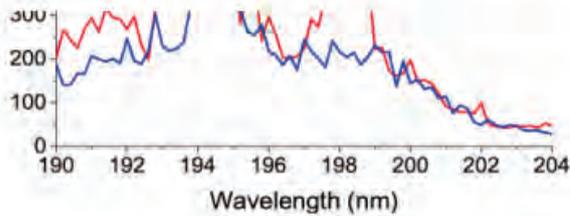
实测数据

AlN (对比AlGaIn样品)

零下190摄氏度，194.5nm飞秒激光激发，氮化铝 (AlN) 荧光和荧光寿命。



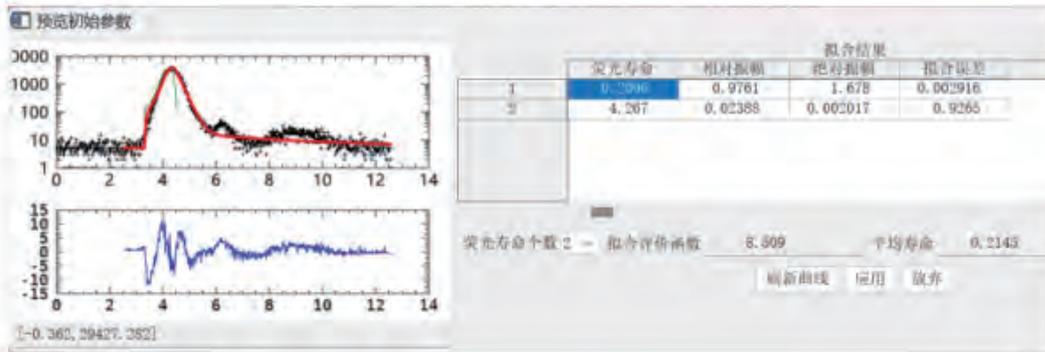
- 作为对比的样品AlGaIn，安装在同一样品台，同一温度下没有发光峰，证明其并非激光的杂散信号。



AlN (荧光寿命曲线@198.3nm)

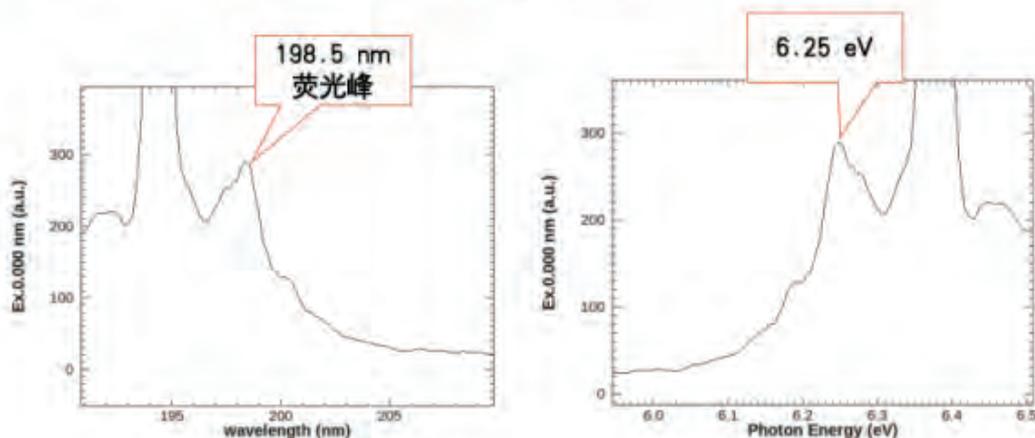
双组分拟合:

- 快组分约0.2ns，应属于激光的杂散光
- 慢组分约4.27ns，应为AlN的带边发光寿命

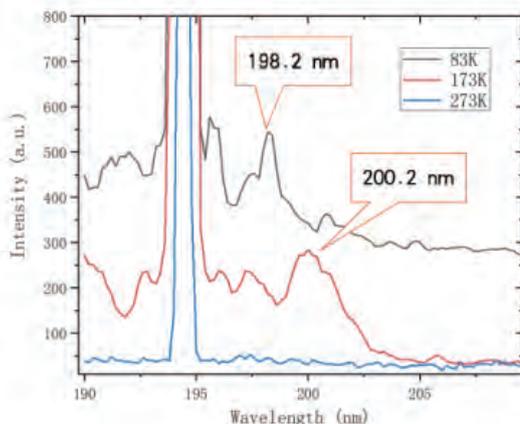


AlN (边缘位置另一次实验)

- 通过变换位置、反复升降温，可以确认现象的重复性



AlN (不同温度)



- 发光峰从83K到173K, 峰位有明显的红移,

AlN (带边发光温度系数)

- 从83K到173K, 峰位按能量从6.256eV到6.194eV, 移动62meV, 可推算出其带边能量的温度系数约为0.69meV/K
- 该值与文献中块体AlN的系数较符合。

Temperature coefficients for the AlN band-gap energy

Temperature coefficient (meV/K)	Substrate	Growth technique	Reference
0.51	6H-SiC	MOCVD	[11]
0.51	Sapphire	MOCVD	[11]
0.35	6H-SiC	LP-MOVPE	[2]
0.55	Sapphire	LP-MOVPE	[3]
0.45	Bulk	Sublim.-recond.	[3]
0.60	Sapphire	MOCVD	[24]
0.58	Bulk	Sublim.-recond.	This work

Table 1 Temperature coefficient for the AlN band-gap energy

Published in 2008

AlN Bandgap Temperature Dependence from its Optical Properties

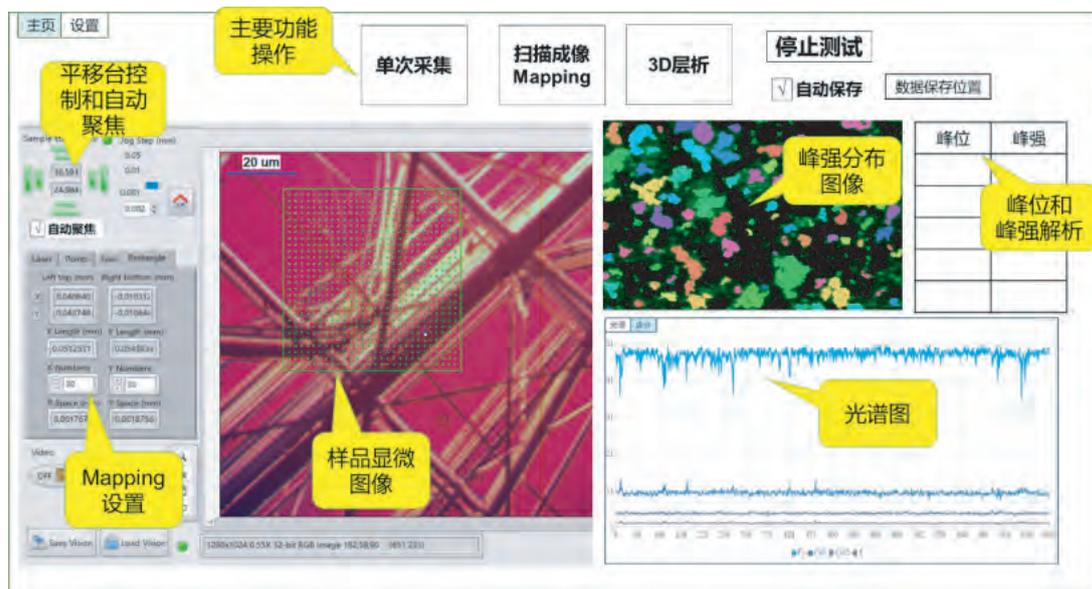
E. Silveira, J. A. Freitas, S. Schuppiert, L. Schrowaller

<https://www.semanticscholar.org/paper/AlN-Bandgap-Temperature-Dependence-from-its-Optical-Silveira-Freitas/db92d6330b6a8ba51f12322e11a7289d6274e19e/figure/1>

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。

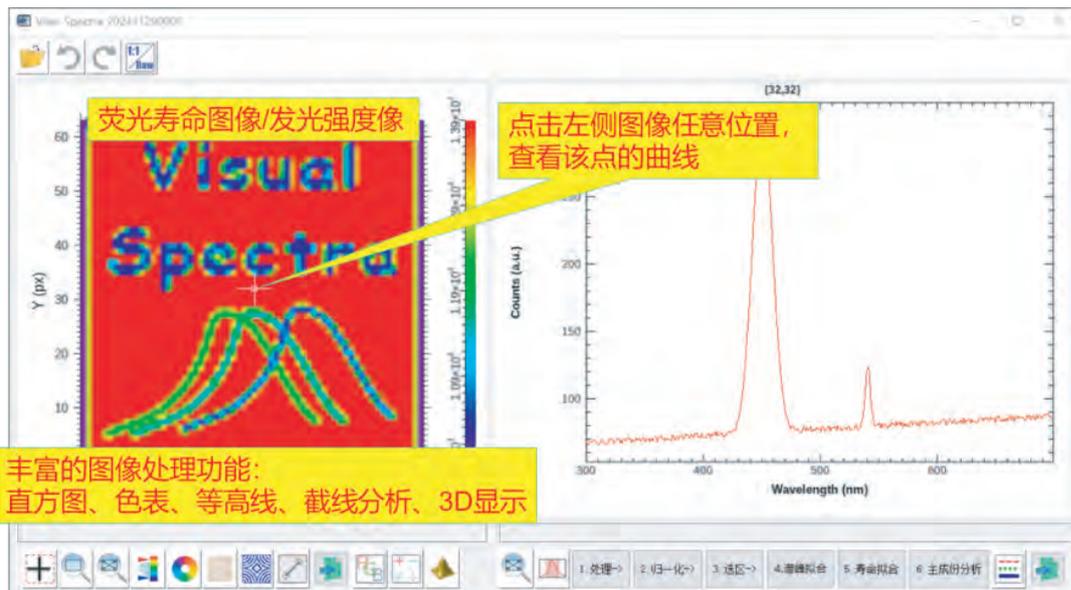
显微光谱成像控制软件界面：



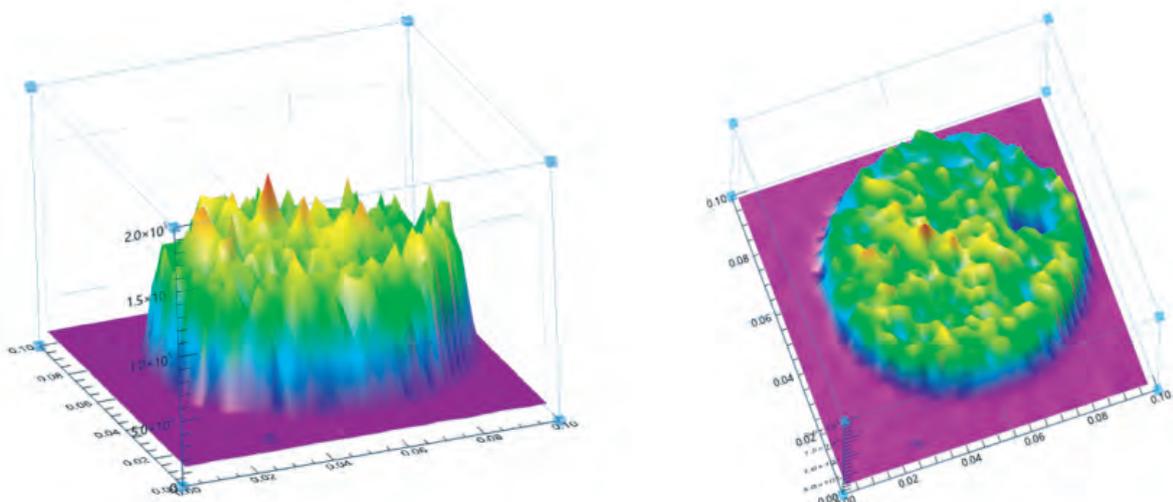
强大的光谱图像数据处理软件VISUALSPECTRA

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。

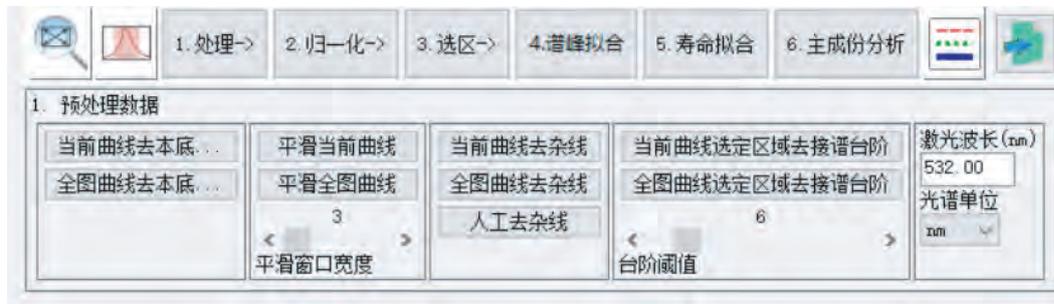
显微光谱成像控制软件界面：



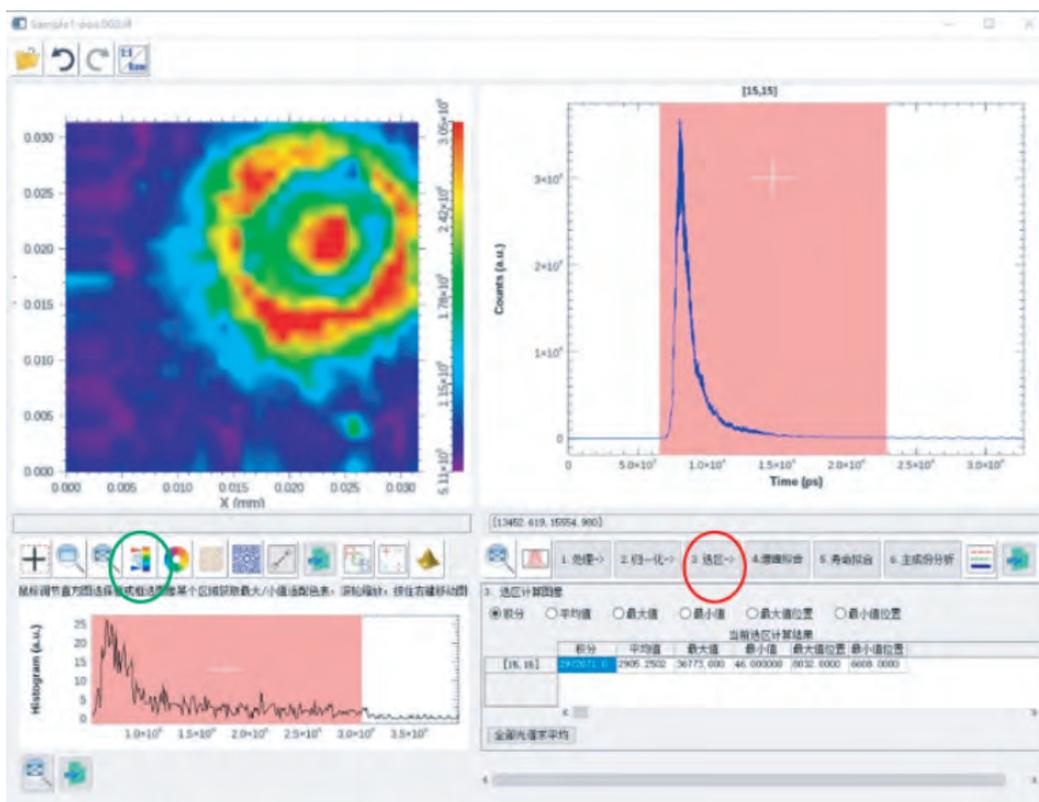
3D显示：



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



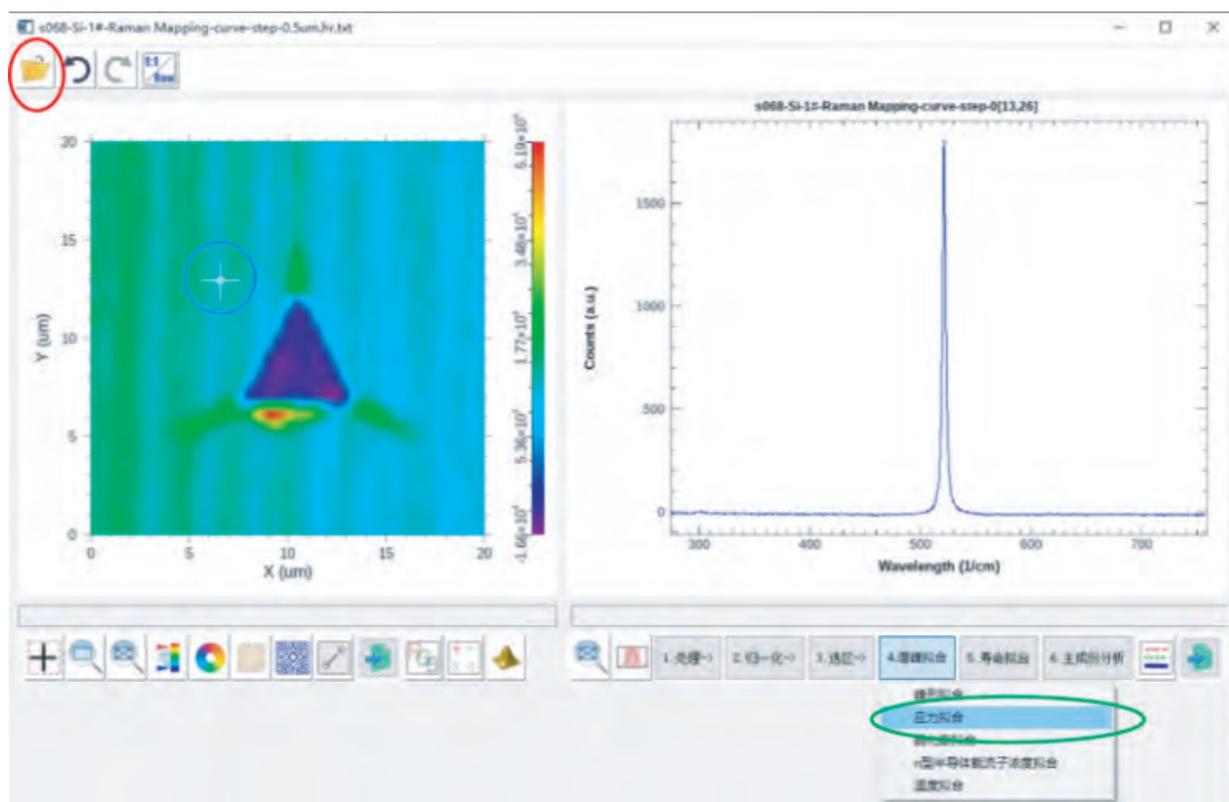
进阶功能:光谱归一化、选区获取积分、最大、最小、最大/最小值位置等



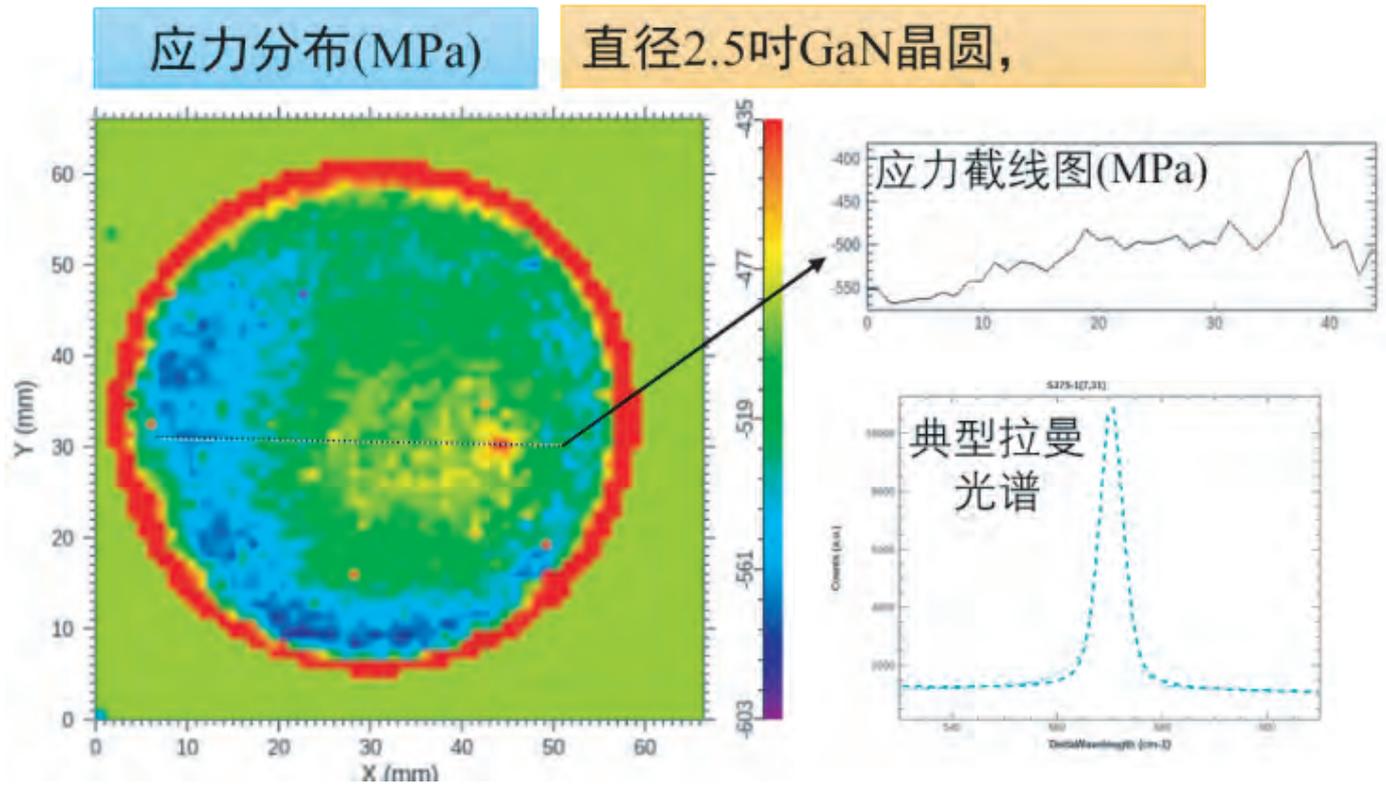
谱峰拟合:采用多种峰形(高斯、洛伦兹、高斯洛伦兹等)对光谱进行多峰拟合,获取峰强、峰宽、峰位、背景等信息。



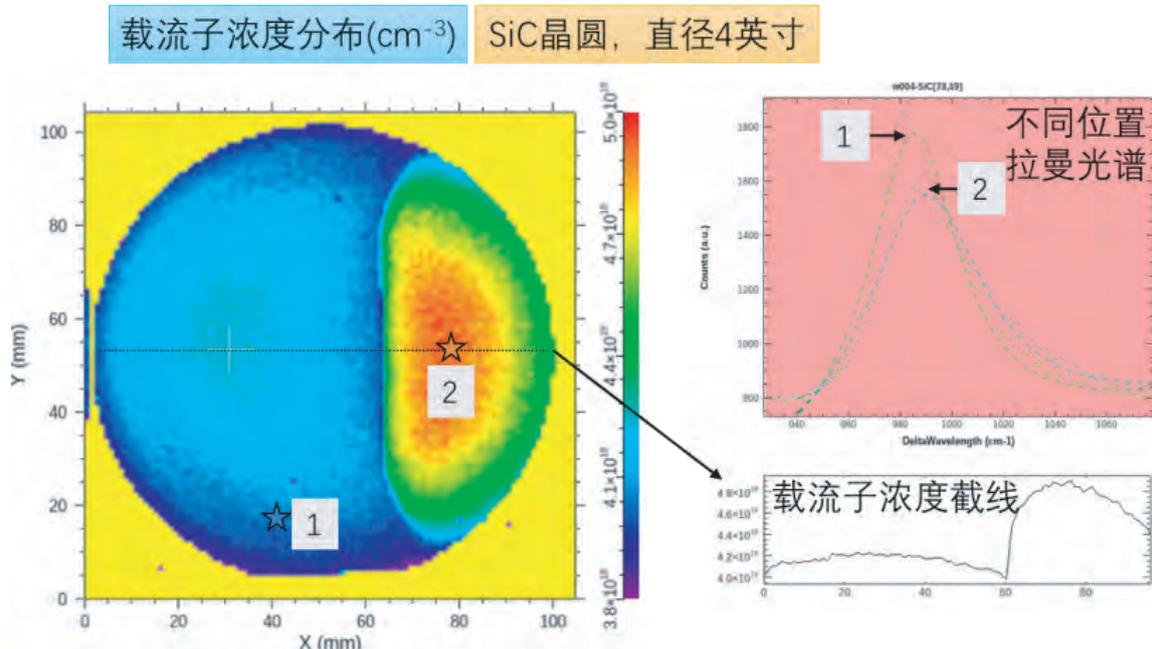
高级功能:应力拟合:针对Si、GaN、SiC等多种材料,从拉曼光谱中解析材料的应力变化,直接获得应力定量数值,并可根据校正数据进行校正。



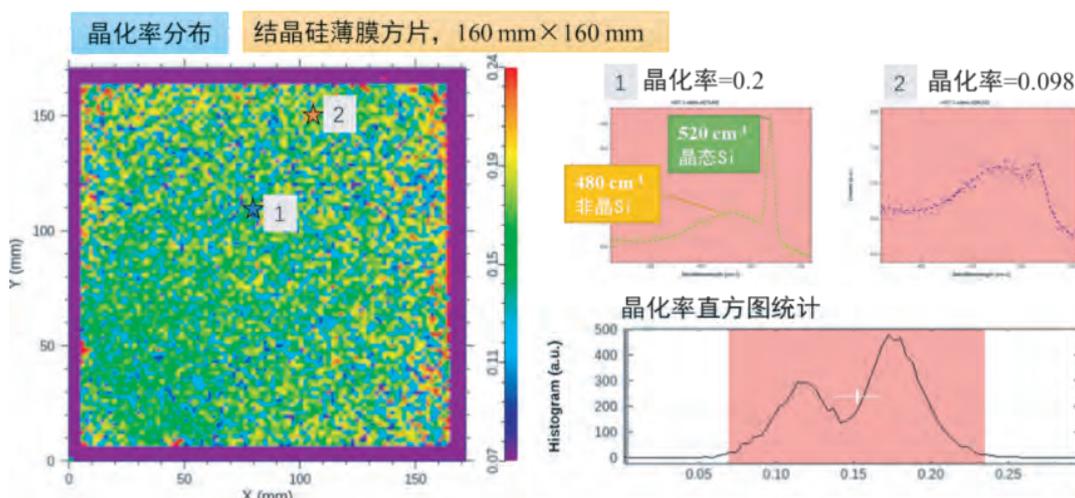
高级功能:应力拟合:针对Si、GaN、SiC等多种材料,从拉曼光谱中解析材料的应力变化,直接获得应力定量数值,并可根据校正数据进行校正。



载流子浓度拟合



晶化率拟合



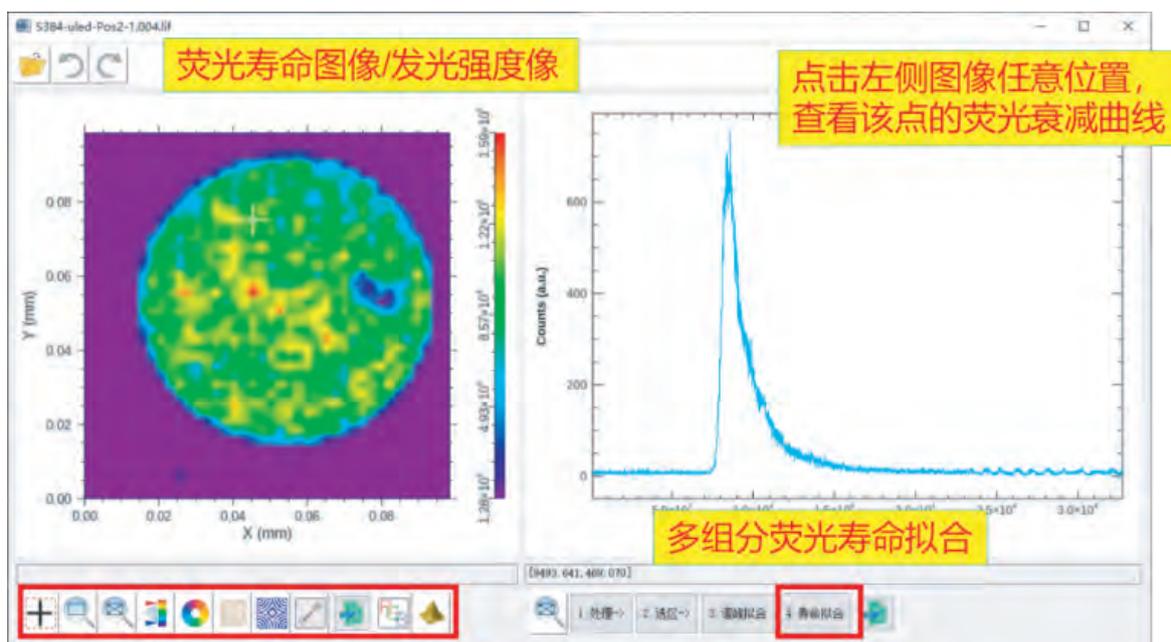
荧光寿命拟合

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。

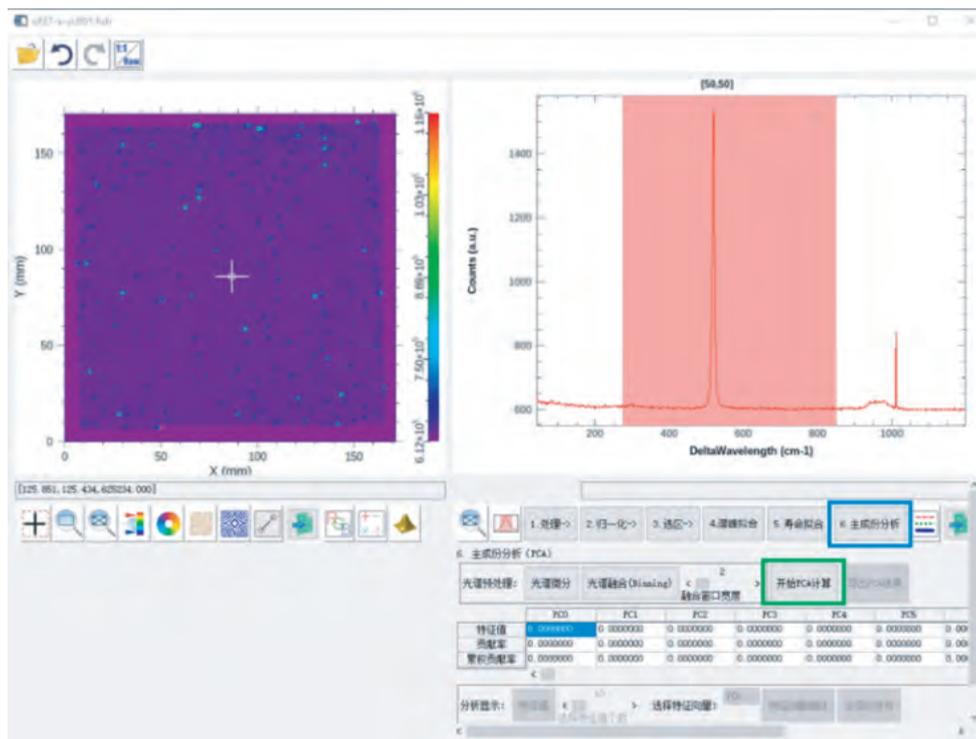
3. 最多包含4个时间组分进行拟合。



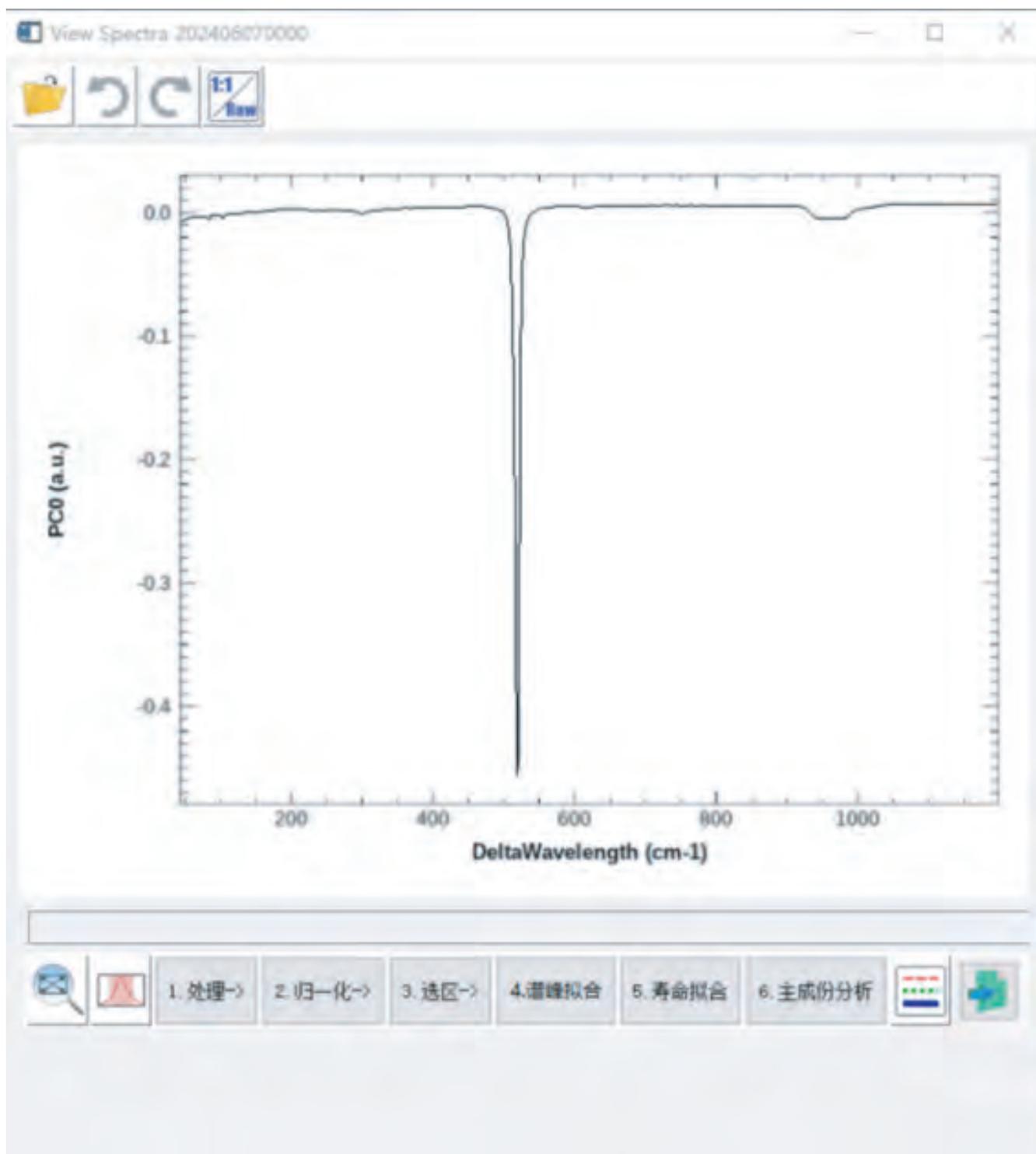
荧光寿命拟合



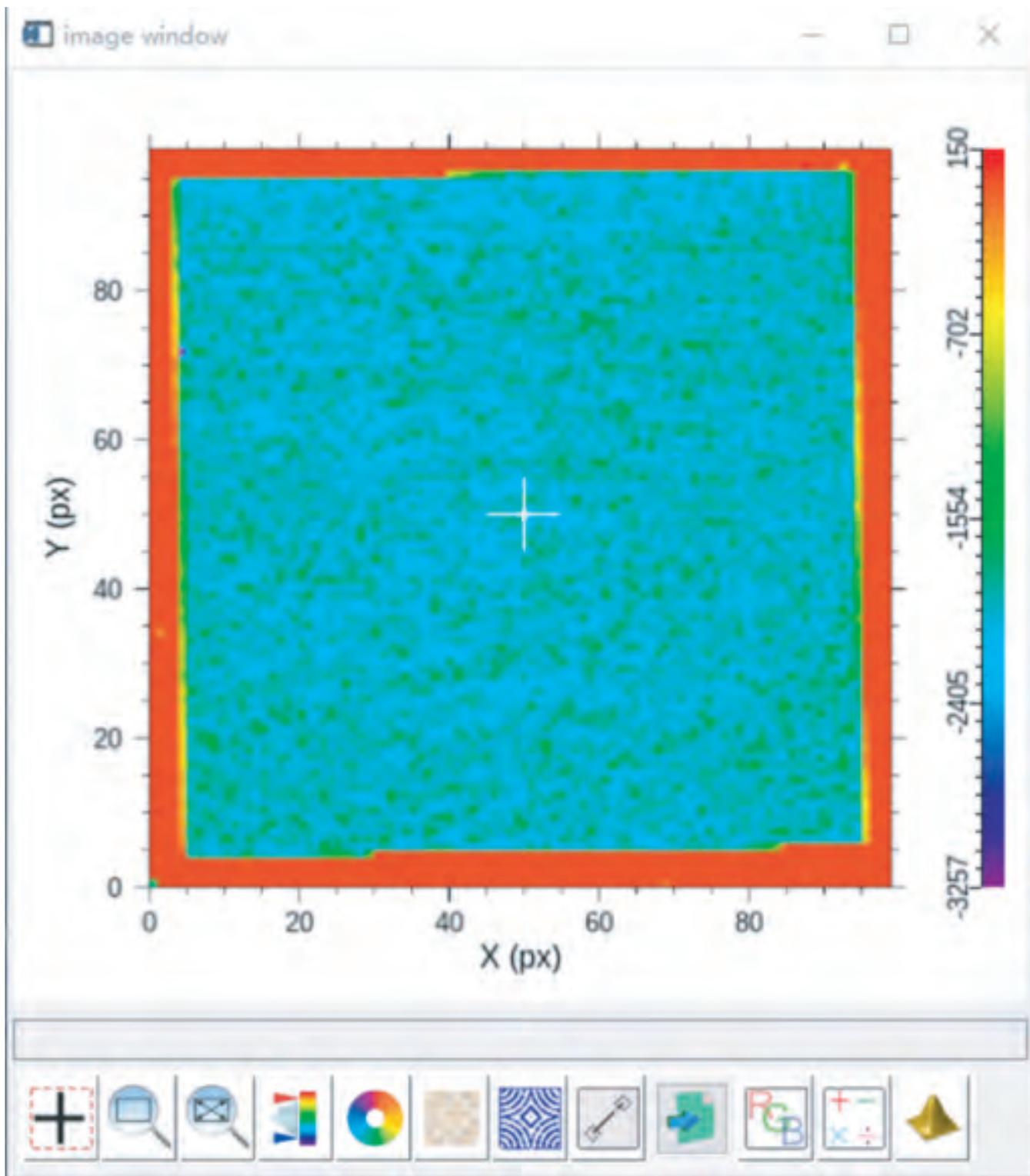
☒ 主成分分析和聚类分析



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：

