ICS 37.020
CCS N 33

—XXXX

中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

太赫兹散射式扫描近场光学显微镜

Terahertz scattering-type scanning near-field optical microscope

（征求意见稿）

XXXX - XX - XX 发布　　XXXX - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会　发布

目　　次

前　　言.....II
引　　言.....III
1 范围.....1
2 规范性引用文件.....1
3 术语和定义.....1
4 型式及分类.....2
4.1 型式.....2
4.2 分类.....3
5 要求.....3
5.1 外观.....3
5.2 功能.....4
5.3 技术性能.....4
5.4 运输环境条件.....5
6 试验方法.....5
6.1 试验条件.....5
6.2 外观.....5
6.3 功能.....5
6.4 技术性能.....5
6.5 运输环境试验.....10
7 检验规则.....10
7.1 检验分类.....10
7.2 出厂检验.....10
7.3 型式检验.....10
8 标志、包装.....12
8.1 标志.....12
8.2 包装.....12
8.3 运输.....12
8.4 贮存.....12
附录 A.....13
A.1 仪器组成.....13
A.2 工作原理.....13

前　言

本文件按照GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国光学和光子学标准化技术委员会（SAC/TC103）归口。

本文件起草单位：上海理工大学、中国计量科学研究院、中国科学院微电子研究所、电子科技大学、上海优施诺技术有限公司、中国计量大学、华太极光光电技术有限公司、太赫兹科技应用（广东）有限公司、博太赫兹信息科技（武汉）有限公司、烟台大学、上海光学仪器研究所、成都觅几科技有限公司、中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司安全环保与技术监督研究院、南开大学、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、首都师范大学、天津大学、中国科学院重庆绿色智能技术研究院、上海谱未科技有限公司、上海国际旅行卫生保健中心（上海海关口岸门诊部）、云南电网有限责任公司电力科学研究院。

本文件主要起草人：彭滟、朱亦鸣、庄松林、邓玉强、霍树春、胡旻、丁铭、董学谦、方波、劳力、李茜、袁英豪、吕军鸿、陈舒、游冠军、陈干、唐福、林冬、李静、李鹏程、常胜江、曹俊诚、张存林、张亮亮、田震、王化斌、王承良、田桢干、邱方程、皇剑。

引　言

太赫兹散射式扫描近场光学显微镜（THz s-SNOM）结合太赫兹光谱技术与扫描探针显微技术，可在超越远场衍射极限的空间尺度上获取样品局域近场散射响应。结合适用的参考样品、校准程序及物理模型，可分析材料的局域介电响应、载流子相关特征及极化激元等性质，应用于半导体、低维材料及纳米光子学等领域。

随着太赫兹散射式扫描近场光学显微镜研发与产业化应用的快速发展，行业内亟需统一产品的术语定义、技术性能指标及试验与检验方法，以规范产品设计生产与质量评价。为此特制定本文件。

太赫兹散射式扫描近场光学显微镜

1 范围

本文件界定了太赫兹散射式扫描近场光学显微镜的术语和定义，规定了型式及分类、要求，描述了相应的试验方法，规定了检验规则、标志、包装、运输及贮存。

本文件适用于采用脉冲太赫兹辐射作为激励，基于太赫兹时域光谱技术（terahertz time-domain spectroscopy，THz TDS）和扫描探针近场相互作用，实现纳米尺度光学成像与光谱测量的太赫兹散射式扫描近场光学显微镜。采用其他太赫兹激励方式的散射式扫描近场光学显微镜可参照本文件的有关条款执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 7247.1—2024 激光产品的安全 第1部分：设备分类和要求

GB/T 11464 电子测量仪器术语

GB/T 13384 机电产品包装通用技术条件

GB/T 13962 光学仪器术语

GB/T 13966 分析仪器术语

GB/T 25480—2010 仪器仪表运输、贮存基本环境条件及试验方法

GB/T 27668 显微镜 光学显微术术语

JJF 1351—2012 扫描探针显微镜校准规范

3 术语和定义

GB/T 11464、GB/T 13962、GB/T 13966、GB/T 27668界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

散射式扫描近场光学显微镜 scattering-type scanning near-field optical microscope (s-SNOM)

基于原子力显微镜（atomic force microscopy, AFM）技术，利用金属针尖的纳米聚焦效应及其与待测样品间的近场相互作用，结合针尖的近场散射光能力，实现亚波长空间分辨率的光学成像和光谱测量的显微镜。

3.2

太赫兹散射式扫描近场光学显微镜 terahertz scattering-type scanning near-field optical microscope (THz s-SNOM)

采用太赫兹辐射作为激励源，通过探针散射近场信号实现太赫兹波段纳米尺度光学成像和光谱测量的仪器。

3.3

探针 probe

安装在AFM悬臂上的探针，用于增强、耦合及散射太赫兹近场信号。

3.4

近场光学信号 near-field optical signal

探针与待测样品相互作用时，由于光学近场效应产生的信号。

3.5

近场光学空间分辨率 near-field optical spatial resolution

仪器能够区分两个相邻近场光学特征的最小横向距离。

3.6

检测速度 detection speed

在仪器正常工作条件下，仪器进行成像和光谱采集的速率。

3.7

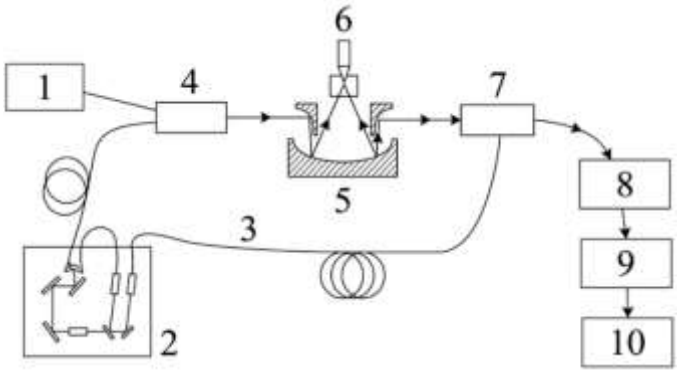
信号调制解调 signal modulation and demodulation

通过探针以共振频率进行周期性振动，利用锁相检测技术提取探针振动频率及其高次谐波（如2Ω、3Ω等）对应的散射信号分量，从而抑制远场背景噪声并增强近场信号的一种信号处理方法。

4 型式及分类

4.1 型式

太赫兹散射式扫描近场光学显微镜（以下简称“仪器”）采用太赫兹时域光谱系统与扫描探针显微系统相结合的结构型式，其典型光路及信号采集系统示意图见图 1。



标引序号说明：

1——偏置电源；

2——飞秒激光与光学延迟单元；

3——光纤；

4——发射器；

5——抛物面镜；

6——太赫兹探针；

7——探测器；

8——放大器；

9——A/D 转换器；

10——计算机。

图 1　时域光谱型太赫兹散射式扫描近场光学显微镜典型系统示意图

4.2　分类

仪器按系统集成度及测量模式可分为：

a) 单模式太赫兹近场光学显微镜；

b) 多模式集成太赫兹近场光学显微镜（如结合红外、拉曼等多波段表征）。

仪器组成与工作原理见附录A。

5　要求

5.1　外观

仪器外观符合下列规定：

a) 电镀表面不应有脱皮和斑点，漆面不应有磕碰伤和显著的颜色不均匀；零件表面不应有毛刺，外部零件锐边应倒棱，零件接合处应齐整；裸露金属面不应有锈蚀、碰伤和显著的划痕；

b) 所有铭牌及标志应清晰可见；

c) 所有紧固零件应保证紧固可靠，各锁紧机构应稳定可靠；所有支架应方便安装，并且稳定牢固；各活动部分的移动和转动应平稳舒适，不应有卡住和急跳现象；

d) 光学零件的表面不应有明显的擦痕、麻点、水珠、霉点等瑕疵，光学零件的胶合面不应有气泡和脱胶现象。

5.2 功能

仪器应具有下列功能：

a) 支持时域谱、频域谱（幅度谱与相位谱）及光学成像结果（幅度图与相位图）的显示与分析；

b) 具备实时形貌与光学信号同步成像功能，并支持不少于4阶谐波解调；

c) 数据输出格式支持ASCII、TXT、CSV及TIFF等通用数据格式；

d) 具备安全保护功能，包括探针-样品接触力超限自动回撤机制，以及样品台可靠接地的静电防护设计。

5.3 技术性能

仪器的技术性能应符合表1的规定。除表中明确给出的条件外，制造商应在产品技术文件中明示各项指标对应的探针、工作模式、有效频段、解调阶次及采集参数。

表1 技术性能要求

序号	名称	要求
1	光学分辨率	≤100 nm（硅/金基底纳米条纹结构）
2	XY 扫描范围	X、Y 轴均≥80 μm
3	Z 扫描范围	≥ 15 μm
4	Z 轴位移分辨率	≤ 0.2 nm RMS
5	样品台定位性能（重复性）	X、Y、Z 轴分别≤200 nm
6	探针共振频率范围	10 kHz～500 kHz
7	近场信号灵敏度 (SNR)	≥ 10 dB
8	光学信号短期稳定性 (1h)	信号强度的标准差/均值 ≤2%
9	光学信号长期稳定性 (8h)	信号漂移率 ≤10%
10	机械抗振性能	≤0.3 nm RMS（1 Hz～100 Hz）

序号	名称	要求
11	激光安全防护	符合GB/T 7247.1—2024的适用要求

5.4 运输环境条件

仪器在运输包装状态下，应能承受GB/T 25480—2010规定的高温、低温、湿热和自由跌落试验。高温试验温度选用55 ℃，持续时间为16 h；低温试验温度选用−40 ℃，保持时间为16 h；湿热试验上限温度选用40 ℃，试验2个周期，每周期24 h，各阶段的温度、相对湿度变化及恢复条件按该标准4.4执行。自由跌落4次，跌落高度根据包装件质量按该标准表1选取。试验后，仪器应符合本文件规定的相关要求。

6 试验方法

6.1 试验条件

试验条件如下：

a) 除试验项目另有规定外，环境温度为15 ℃～25 ℃，相对湿度不大于60%，避免阳光直射；

b) 仪器应放在具备良好隔振性能的平稳工作台上，附近无强电磁场干扰源，电源接地良好（样品台可靠接地）；

c) 供电电源应符合仪器额定电压要求，电压偏差不超过额定值的±10%；

d) 仪器应按使用说明书预热至稳定状态；所用标准样品及测量装置应具有适用的量值溯源资料，并在有效期内。与扫描探针几何量有关的校准可依据JJF 1351—2012进行；本文件另行规定的试验按相应条款执行。

e) 试验报告应记录仪器及探针型号、样品与参考样品、温湿度、激励及探测条件、解调阶次、扫描或时延采样参数、积分时间、测量带宽、平均次数、反馈及滤波设置。各次重复测量应保持规定参数一致，并说明测量不确定度及合格判定所采用的规则。

6.2 外观

用目视、手感和装卸模块方式检验。

6.3 功能

开启仪器，用目视及软件操作方式检验。

6.4 技术性能

6.4.1 光学分辨率

6.4.1.1 试验工具

具有清晰Au/Si材料边界的参考样品、经校准的横向长度标尺及图像分析软件。参考样品边界的实际过渡宽度应明显小于100 nm，且应有适用的表征资料，避免将样品边界宽度误计为仪器分辨率。

6.4.1.2 试验方法

采用金膜/Si基底台阶结构或Au/Si边界作为标准样品，边界过渡宽度应显著小于100 nm。

在规定工作模式（轻敲模式，探针谐波解调≥2阶）及固定扫描参数条件下，对样品边界区域进行线扫描成像，获取近场光学信号强度分布曲线。

沿垂直于边界方向提取信号剖面，并进行线性归一化处理（0%对应背景信号平均值，100%对应信号峰值）。

定义信号强度从10%上升至90%峰值所对应的横向距离为ΔL。

重复测量5次，取算术平均值作为最终结果。

系统光学横向分辨率应满足：

$\Delta L \leqslant 100\ nm$。

测量重复性以相对标准偏差（RSD）表示，应满足：

6.4.2 XY 扫描范围

6.4.2.1 试验工具

覆盖待测扫描行程的二维周期标准样品，或具有适用测量能力的可溯源位移测量装置；相应的长度标尺校准资料及数据分析软件。

6.4.2.2 试验方法

在正常工作模式下分别沿X、Y轴扫描至有效行程的两端。用标准样品的实际周期累计长度，或外部位移测量装置测得的端点位置差，确定各轴的有效连续扫描范围。不得用软件设定值或样品台粗定位行程代替扫描器的实测范围。

每轴重复测量3次，记录各次行程和量值校准关系，取各轴实测行程的最小值进行判定。X、Y轴的有效连续扫描范围均应不小于80 μm。

6.4.3 Z 扫描范围

6.4.3.1 试验工具

具有适用量程和测量能力的可溯源位移测量装置及安装夹具。安装后应能测量Z扫描器的实际位移，而不将粗调机构行程计入。

6.4.3.2 试验方法

使探针与样品安全分离，在保持扫描器正常控制状态的条件下，逐步改变Z轴设定位置，测量有效连续行程两端的实际位置差。扫描器达到行程端部时不应出现失控或不可恢复的饱和。

按同一程序重复测量3次，记录各次行程，以最小值进行判定。Z轴有效连续扫描范围应不小于15 μm。

6.4.4 Z 轴位移分辨率

6.4.4.1 试验工具

原子级超平整云母片、单晶硅片或超平整金膜标准样品（表面粗糙度 Ra ≤ 0.1 nm）。

6.4.4.2 试验方法

将超平整标准样品稳固置于样品台上，在 6.1 规定的隔振与恒温试验条件下，使探针与样品处于轻敲模式闭环反馈状态。将 XY 扫描范围设置为 0 nm × 0 nm（单点静态闭环保持）或 10 nm × 10 nm 微区慢速扫描，反馈带宽设为常规工作带宽（100 Hz～1 kHz），连续采集 Z 轴高度反馈信号不少于 60 s（采样点数不少于 512 点），计算 Z 轴高度本底噪声的均方根值（RMS）。测量结果应符合表1中序号4的要求（≤ 0.2 nm RMS）。

6.4.5 样品台定位性能（重复性）

6.4.5.1 试验工具

一维或二维纳米光栅标准样品（标称周期 3 μm，扩展不确定度 ≤5%，k = 2）、阶梯高度标准样品（标称高度 10 nm，扩展不确定度 ≤0.5 nm，k = 2）及激光干涉位移测量仪（分辨率优于 1 nm）。

6.4.5.2 试验方法

根据 JJF 1356-2012 中的要求，重复性测试应分别执行：

a) X/Y 轴重复性测试

使用光栅标准样品（标称周期 3 μm，扩展不确定度±5%，k=2），沿扫描方向连续测量 10 次光栅周期值，按公式(1)计算标准偏差：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}{n-1}} \quad \text{……（1）}$$

式中：

s —— 标准偏差；

x_i —— 第 i 次测量的光栅周期值；

$\overline{x}$—— n 次测量的算术平均值；

n —— 测量次数（n = 10）。

b) Z 轴重复性

采用阶梯高度标准样品（标称高度 10 nm，扩展不确定度±0.5 nm，k=2），对同一台阶进行 10 次高度测量，按极差法公式(2)计算重复性误差：

$$R = \frac{\mathrm{Max}(h_i) - \mathrm{Min}(h_i)}{h\mathrm{nom}} \times 100\% \quad \text{……（2）}$$

式中：

R —— 重复性误差；

$\max(h_i)$ —— 10 次高度测量值的最大值；

$\min(h_i)$ —— 10 次高度测量值的最小值；

h_{nom} —— 阶梯高度标称值。

6.4.6 探针共振频率范围

6.4.6.1 试验工具

低频与高频标准测试悬臂探针（标称共振频率覆盖 10 kHz～500 kHz 范围）及内置或外接锁相扫频分析仪（频率准确度优于 ±0.01%）。

6.4.6.2 试验方法

分别安装低频段与高频段标准测试悬臂探针，开启仪器探针压电激励与扫频检测功能，将扫频范围设置为 10 kHz～500 kHz，记录探针振动的振幅-频率响应曲线和相位-频率响应曲线；或通过标准信号发生器向锁相检测模块注入 10 kHz～500 kHz 正弦扫频信号进行全频段检测。检验系统在 10 kHz～500 kHz 范围内能否正常激励并准确锁定共振峰，结果应符合表1中序号6的要求。

6.4.7 近场信号灵敏度（SNR）

6.4.7.1 试验工具

高阻单晶硅片（电阻率 ≥1 000 Ω·cm，表面粗糙度 Ra ≤ 0.5 nm）或金膜标准反射样品。

6.4.7.2 试验方法

使用高阻硅片，在固定扫描参数下，按公式（3）测量信噪比：

$$\mathrm{SNR}=10\log_{10}\left(\frac{S_{\mathrm{signal}}}{S_{\mathrm{noise}}}\right) \quad \text{……（3）}$$

式中：

SNR——信噪比（dB）；

S_{signal}——近场信号功率；

S_{noise}——背景噪声功率。

6.4.8　光学信号短期稳定性（1h）

6.4.8.1　试验工具

表面均匀的金膜参考样品（表面粗糙度Ra不大于0.5 nm）、适用探针、温度监测装置以及连续数据采集与统计分析软件。

6.4.8.2　试验方法

使用金膜标准样品（表面粗糙度Ra ≤ 0.5 nm），在恒温（23 ± 0.5 ℃）、隔振条件下连续采集光学信号1小时。计算信号强度的标准差（σ），要求：σ/均值≤ 2%。

6.4.9　光学信号长期稳定性（8h）

6.4.9.1　试验工具

金膜标准样品（表面粗糙度 Ra ≤ 0.5 nm）、精密温湿度巡检仪。

6.4.9.2　试验方法

在与 6.4.8 相同的环境及工作参数条件下，保持仪器激励源、探测光路及信号处理系统连续运行 8 h。在金膜参考样品同一平坦区域内，每隔 30 min（或 1 h）进针闭环采集 1 次近场光学信号（每次连续采集不少于 30 s 并取算术平均值作为该时间点的信号强度 I_k；两次采集间隙允许探针回撤脱离样品表面以避免针尖磨损，但不得重新调整光路或更改解调参数）。记录 8 h 内各时间点的信号强度，按公式（4）计算信号漂移率：

$$D = \frac{|I_{\max} - I_{\min}|}{I_{\text{avg}}} \times 100\% \quad \text{……（4）}$$

式中：

D ——信号漂移率；

$I_{\max}$——运行期间光学信号强度最大值；

$I_{\min}$——运行期间光学信号强度最小值；

I_{avg}——运行期间光学信号强度平均值。

6.4.10　机械抗振性能

6.4.10.1　试验工具

原子级平整单晶硅或云母标准样品（表面粗糙度 Ra ≤ 0.1 nm）、内置或外接低频频谱分析仪（频率范围覆盖 1 Hz～100 Hz）。

6.4.10.2　试验方法

在 6.1 规定的试验条件及隔振系统正常工作状态下，使探针与标准样品处于轻敲模式闭环反馈状态，将 XY 扫描范围设为 0 nm，采集 Z 轴压电位移反馈信号，通过频谱分析仪或数字带通滤波器提取 1 Hz～100 Hz 频段内的位移功率谱密度并积分计算其均方根值（RMS）。测量结果应符合表1中序号10的要求（≤ 0.3 nm RMS）。

6.4.11　激光安全

按GB/T 7247.1规定测量外接激光器的输出功率、发散角，验证防护联锁装置的安全防护要求。

6.4.11.1　试验工具

适用于仪器实际激光波长和输出方式的激光辐射测量设备、联锁及防护功能检查装置，以及制造商提供的安全分类资料。

6.4.11.2　试验方法

按GB/T 7247.1—2024中适用于仪器声明激光类别和实际结构的要求，核查可达激光辐射、安全分类、防护外壳、适用的安全联锁以及标记和使用说明。不仅以外接激光器的额定输出功率和发散角代替整机安全核查。结果应符合表1的相关要求。

6.5　运输环境试验

按 GB/T 25480的规定进行试验。

7　检验规则

7.1　检验分类

仪器的检验分为出厂检验和型式检验。

7.2　出厂检验

7.2.1　每台仪器均应进行出厂检验，检验合格并附有产品合格证方可出厂。

7.2.2　出厂检验的项目类别见表 2。

7.2.3　出厂检验不合格或有不合格项目应返工然后复验。复验全部项目合格后，方可出厂。

7.3　型式检验

7.3.1　型式检验应对标准中规定的要求全部进行检验,型式检验的样品应从检验合格的产品批中随机

抽取。

7.3.2　型式检验的受试样品在按 GB/T25480 的要求进行环境条件试验后，各项要求仍应符合标准的规定，型式检验项目按表 2 规定。

7.3.3　型式检验的周期一般为一年，在两次型式检验的周期内发生下列情况之一时，也应进行型式检验：

a) 仪器设计定型或新产品定型时；
b) 结构、材料、工艺有重大变更，可能影响仪器性能时；
c) 仪器停产一年以上恢复生产时。

7.3.4　经过型式检验后的样品，不经过整理不可作为合格品出厂。

表2　检验项目及检验类别

序号	检验项目及章条			检验分类	
	项目	要求章条号	试验方法章条号	出厂检验	型式检验
1	外观	5.1	6.2	●	●
2	功能及安全保护	5.2	6.3	●	●
3	光学分辨率	5.3	6.4.1	●	●
4	XY 扫描范围		6.4.2	●	●
5	Z 扫描范围		6.4.3	●	●
6	Z 轴位移分辨率		6.4.4	●	●
7	样品台定位性能（重复性）		6.4.5	●	●
8	探针共振频率范围		6.4.6	●	●
9	近场信号灵敏度 (SNR)		6.4.7	●	●
10	光学信号短期稳定性 (1h)		6.4.8	●	●
11	光学信号长期稳定性 (8h)		6.4.9	—	●
12	机械抗振性能		6.4.10	—	●
13	激光安全防护		6.4.11	●	●
14	运输环境条件	5.4	6.5	—	●
注：“●”为检验的项目；“—”为不检验的项目。					

8 标志、包装

8.1 标志

每台仪器应有如下标志：

a) 制造厂名称或商标；

b) 仪器型号与名称；

c) 制造日期、出厂编号；

d) 仪器质量（kg）及体积（长×宽×高，mm×mm×mm）；

e) 激光安全等级标识（如禁止直视光束，对应激光等级警告标识）；

f) 高压警告标识（压电驱动器高压）；

g) 其他必要参数。

8.2 包装

产品包装应符合 GB/T 13384 中的规定。

8.3 运输

应用任何有遮蔽的运输工具运送。

8.4 贮存

应贮存在有遮蔽的场所，周围无酸性气体、碱、有机溶剂及其它有害物质。

附录 A

（资料性）

仪器说明与原理

A.1 仪器组成

时域光谱型（THz TDS）太赫兹散射式扫描近场光学显微镜系统主要由以下核心模块构成：

a) AFM 控制模块：包含悬臂探针、压电扫描器、激光反馈系统；

b) 光学耦合模块：双光路抛物面镜、校准激光及白光照明系统；

c) 多维定位系统：粗定位平台与精定位压电陶瓷；

d) 信号处理模块：多通道锁相放大器、高速数据采集卡；

e) 太赫兹时域光谱探测模块：基于使用飞秒脉冲激光的泵浦与探测技术，采集时间分辨的太赫兹时域波谱，对时域波谱进行傅里叶变换实现太赫兹波段（如 0.4 THz ～ 1.5 THz 等频段）光学特性频谱分析的模块化组件。

A.2 工作原理

本系统基于原子力显微与近场光散射的协同工作机制：

a) 机械探测：探针在压电陶瓷驱动下以共振频率（Ω）垂直振动，振幅通常在 10 nm ～ 300 nm。当探针接近样品表面时，范德华力导致振幅衰减，反馈系统通过调节 Z 向压电陶瓷维持恒定振幅，获取样品形貌信息。

b) 近场光耦合：入射太赫兹脉冲经抛物面镜聚焦于探针尖端，经由针尖的避雷针和天线效应，形成局域增强场。由于近场散射光与针尖-样品间距离呈现出强烈的非线性依赖关系，通过在系统中采用 AFM 的轻敲工作模式以固定频率 Ω 振动，实现对近场散射太赫兹信号的机械调制。

c) 信号解调：将探测器探测的信号输入锁相放大器中，以针尖振动频率的高次谐波 $n\Omega$（$n=2,3,4,\ldots$）进行解调放大，可有效压制远场背景散射光，提取纯净的针尖-样品区域的近场太赫兹散射信号。结合太赫兹时域光谱探测模块的延迟线扫描，重构包含振幅和相位的太赫兹近场频谱响应。

d) 超分辨成像：通过扫描样品台实现二维逐点探测，系统光学分辨率由探针尖端曲率半径决定，从而打破衍射极限，实现纳米级的太赫兹空间分辨。同步记录的形貌与光学信号经数字滤波校正后，生成高精度的共定位纳米图像。