

## 仪器与测量

## 超快太赫兹散射型扫描近场光学显微镜

王有为 马一航 王嘉毅 汪子权 饶馨予  
代明聪 黄滋宇 吴晓君<sup>†</sup>

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

(2025年2月21日收到; 2025年4月11日收到修改稿)

纳米尺度下的太赫兹 (THz) 时域光谱与成像技术对于材料研究和器件检测等至关重要. 然而, 受限于 THz 波波长衍射极限的限制, 传统的远场 THz 时域光谱与成像技术无法提供飞秒时间尺度和纳米空间分辨的载流子浓度分布和超快动力学过程研究. 本文介绍了基于超快 THz 时域光谱成像技术与扫描探针技术耦合的超快 THz 散射型扫描近场光学显微镜系统. 利用针尖与样品表面的近场相互作用, 该近场系统已被证实可以以~60 nm 横向空间分辨率的静态 THz 光谱实现半导体材料和器件研究, 进而获得半导体材料和器件的静态 THz 电导率分布情况, 而且还可以通过光激发瞬态载流子的方式, 获得半导体材料的瞬态电导率和激光 THz 发射超快动力学过程, 为研究材料和器件在纳米空间分辨、超快时间分辨和 THz 谱学成像方面的性能提供了有力支持.

**关键词:** 太赫兹电磁波, 扫描近场光学显微镜, 半导体材料, 器件

**PACS:** 87.50.U-, 68.37.Uv, 82.53.Mj

**DOI:** 10.7498/aps.74.20250211

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250211

## 1 引言

在物理学与材料科学的探索征程中, 飞秒激光泵浦的太赫兹 (THz) 时域光谱技术凭借其既能获得 THz 脉冲透过材料的振幅信息, 又能实现相干检测的功能优势, 已成为揭示材料内在特性的关键工具. 尤其是对于材料电导率的快速获取, THz 光谱成像技术更是展现出了无可比拟的优势, 即无需复杂的 Kramers-Kronig 变换<sup>[1]</sup>, 直接从光谱数据中便能精准获取电导率信息, 这为材料的电学性质研究提供了快捷而高效的途径. THz 电磁波能够探测材料中的集体电荷、自旋和晶格振荡、极性分子的旋转以及生物大分子的结构振动<sup>[2-5]</sup>, 从而为下一代信息技术的材料研究提供新的手段. 从基础的材料组成分析到复杂的物理过程探究, THz 光

谱仪都能发挥关键作用. 透射式和反射式的静态 THz 时域光谱成像技术能够以非接触、无损伤的方式探测材料的光学特性, 由其衍生出来的光泵浦-THz 探测技术是研究光生载流子迁移率及动力学变化过程的重要实验手段. 此外, THz 时域光谱技术通过对经过样品与未经过样品的 THz 参考信号进行相干探测, 可以同时得到样品光电导率的实部及虚部, 不仅可以研究样品中载流子特性, 还可以研究材料中激子态寿命等物性<sup>[6-8]</sup>. 然而, 传统的 THz 光谱成像技术大多基于远场探测, 虽然在宏观尺度上能够提供有价值的信息, 但在面对纳米尺度的精细结构和局部性质研究时, 却显得力不从心<sup>[9,10]</sup>. 远场成像受限于 THz 波长衍射极限的限制, 难以解决材料和器件在纳米空间尺度上的许多关键问题, 如纳米材料的局部电导率分布、纳米器件内部的载流子分布以及缺陷等.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: xiaojunwu@buaa.edu.cn

为解决以上难题, 科研人员开始探索利用针尖耦合实现 THz 场增强的方法, THz 显微技术也由此逐步发展. 1999 年, Knoll 和 Keilmann<sup>[11]</sup> 基于原子力显微镜 (AFM) 展示了基于针尖的扫描近场光学显微镜技术 (scanning near-field optical microscopy, SNOM), 在镀金针尖处产生中红外波段散射并实现近场场增强, 成功达成纳米量级 (100 nm) 分辨率成像, 为后续研究奠定基础. 2002 年, van der Valk 和 Planken<sup>[12]</sup> 利用磷化镓 (GaP) 晶体电光采样, 通过亚波长尺寸铜质针尖聚焦 THz 脉冲, 缩小光斑尺寸, 实现了微米量级空间分辨率. 2003 年, Chen 等<sup>[13]</sup> 在前期研究基础上改进与优化, 验证了此技术在针对单个亚微米量级半导体材料开展研究时具备可行性. 2006 年, Buersegens 等<sup>[14]</sup> 再度取得关键突破, 报道了一种能够实现亚波长空间分辨的 THz 显微技术, 可对半导体中处于微米尺度的载流子进行有效感知. 随着研究的深入, SNOM 技术不断优化, 分辨率逐步提升, 应用价值也愈发凸显. 正是在这样的技术发展需求驱动下, 近场 THz 光谱成像技术应运而生. 其巧妙结合 THz 光谱技术和扫描探针技术, 利用针尖与样品表面的近场相互作用, 收集从针尖散射的 THz 近场信号, 不仅突破 THz 波的衍射极限, 达到数十纳米甚至更高的空间分辨率, 还能在纳米尺度上精准提取材料的电导率等电学性质, 为材料科学和物理学的研究

开辟了全新的视野<sup>[15,16]</sup>. 例如, 2023 年, Chen 等<sup>[17]</sup> 利用近场 THz 光谱成像技术, 首次在实空间中直接观测到了 Ag<sub>2</sub>Te 薄片中的平面各向异性声子 THz 等离极化激元, 并揭示了其与材料晶体结构和电子性质的内在联系, 为未来纳米光子学和 THz 技术的发展提供了新的思路.

在提升空间分辨率的基础上, 为了更深入地观察材料中的瞬态现象, 实现超快时间分辨率的 THz 显微技术变得尤为迫切. 为了能够捕捉纳米尺度下超快的物理、化学和生物过程, 超快 SNOM 应运而生. 这种新型仪器结合了超快激光技术和 SNOM 的高空间分辨率, 不仅能够纳米尺度上成像, 还能以飞秒时间分辨率追踪纳米结构中的动态变化, 从而为纳米科学的研究开辟了新的维度<sup>[18,19]</sup>.

本文将系统介绍超快 THz 散射型扫描近场光学显微镜 (terahertz scattering scanning near-field optical microscopy, THz s-SNOM) 的实验装置、功能原理以及典型应用等, 以为相关领域的科研工作者提供有价值的参考与启示, 共同推动这一前沿技术的不断发展与创新.

## 2 实验装置

系统装置如图 1 所示, 其中, 光纤飞秒激光器会输出三路中心波长为 1560 nm, 脉冲宽度为 70 fs,

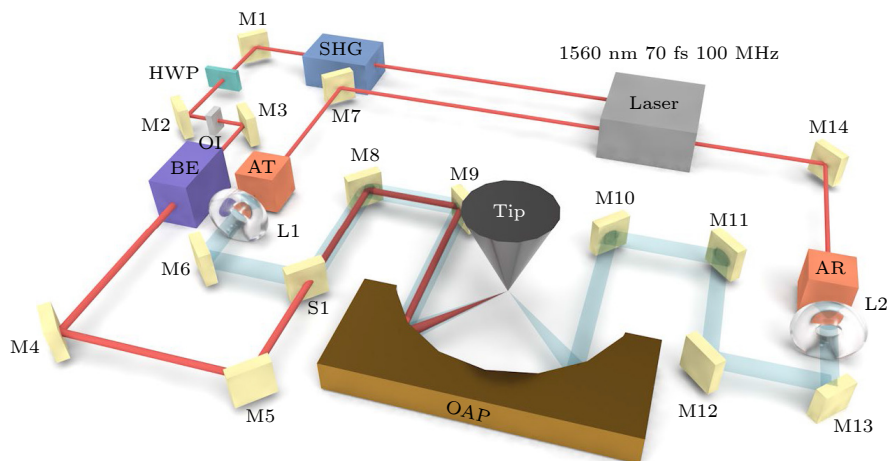


图 1 超快 THz s-SNOM 系统示意图, laser 为光纤飞秒激光器, SHG 为二次谐波转换器, HWP 为半波片, OI 为光隔离器, M1—M14 为光学反射镜, BE 为扩束器, S1 为分束器, AT 为发射光导天线, OAP 为离轴抛物面镜, AR 为接收光导天线, L1 和 L2 为镜头

Fig. 1. Schematic diagram of the ultrafast THz s-SNOM system. Laser represents the fiber femtosecond laser, SHG represents second harmonic trigger, HWP represents half-wave plate, OI represents optical isolator, M1–M14 represent mirror, BE represents beam spreader, S1 represents semi transparent and semi reflective mirror, AT represents transmitter antenna, OAP represents off-axis parabolic mirror, AR represents receiver antenna, L1 and L2 represent lenses.

重复频率为 100 MHz 的飞秒激光. 一束激光经过光学倍频器, 将光纤中传输的 1560 nm 激光脉冲转变为波长为 780 nm 的自由空间激光, 作为光泵浦-THz 探测技术和 THz 发射光谱技术的泵浦激光; 另外两束激光将作为光纤耦合的 THz 时域光谱仪的激发光和探测光, 用于激发一对 THz 光电导天线, 分别产生和探测 THz 波.

InGaAs-THz 光电导发射天线 (AT) 经中心波长为 1560 nm 的激光激发, 在材料内部产生光生载流子. 结合外加偏置电压, 光生载流子形成瞬态电流, 辐射出 THz 脉冲. 产生的 THz 脉冲经过若干 THz 反射镜和抛物面镜后, 通过纳米针尖耦合到样品表面. 样品表面和针尖组成近场偶极子, 不仅能够局域增强针尖处的 THz 场, 而且还能散射出携带了样品表面信息的 THz 波. 被散射的 THz 信号再经过一系列对称的光学元件到达接收光电导天线 (AR), 进行超快时间分辨检测.

当泵浦激光被阻断, AT 和 AR 均打开时, 系统处于静态 THz 时域光谱成像测量模式, 可以获得材料在 THz 频段的静态响应. 在该模式下, 可以通过打开中心波长为 780 nm 的自由空间调制激光来实现光泵浦-THz 探测功能. 在光泵浦-THz 探测模式下, 通过关闭 AT 并保持 AR 处于正常工作状态, 即可观察 THz 发射信号.

当激光与 THz 照射到纳米尖端时, 会产生针尖-样品-光相互作用, 形成近场信号. 这种近场信号的空间分辨率不再受限于 THz 波长的衍射极限, 而是由纳米尖端的半径决定, 实现了 THz 成像的空间分辨率由毫米量级到纳米量级的重大突破. 当超快激光脉冲激发样品时, 会在样品中产生载流子, 通过 AFM 纳米尖端的局域化探测, 可以获得纳米尺度下被测样品的空间载流子信息. 驱动整套系统的激光脉冲宽度在飞秒量级, 因此该系统还具有飞秒超快时间分辨率, 不仅可获得飞秒时间尺度的载流子动力学过程, 还可用于研究材料在纳米尺度下的 THz 波发射性能.

超快 THz s-SNOM 的核心工作原理主要包括针尖近场增强、THz 散射和信号相干探测等 3 个方面, 主要功能为静态近场 THz 时域光谱、光泵浦-THz 探测光谱, 以及 THz 发射光谱. 泵浦激光首先以  $36^\circ$  入射角倾斜入射到纳米针尖上, 由于针尖半径很小, 基于避雷针效应, 针尖可以对泵浦激光在样品表面激发的电磁场进行限制并实现局域

场增强<sup>[20-29]</sup>. 当针尖靠近样品上表面时, 一方面与 THz 波实现近场增强, 另一方面散射出被探测的 THz 信号. 这些包含了样品纳米尺度信息的散射信号通过针尖施加谐振频率为  $\sim 60$  kHz 的机械调制, 结合光电导天线的同步探测, 能够利用调制解调技术有效分离目标信号与背景噪声, 使信号信噪比显著提升, 为纳米尺度载流子动态过程的时空分辨研究提供有效检测手段.

在超快 THz s-SNOM 的信号提取方面, 如图 2 所示, 当飞秒激光打在针尖与样品之间时, 针尖以一定频率  $\Omega$  振动, 散射出的 THz 波信号被探测系统所收集. 上述散射信号主要有远场散射信号和近场散射信号两种<sup>[16]</sup>. 远场散射信号包含两种散射场: 一是来自针尖表面的散射场, 将其场强假设为  $E_{\text{tip}}(d)$ , 由于针尖到样品之间的距离  $d$  随时间  $t$  变化的曲线可以近似拟合为  $d(t) = d_0 + A\sin(\Omega t)$ , 其中  $d_0$  是平均距离,  $A$  是振幅,  $\Omega$  是振动频率, 针尖表面散射场场强可以表示为  $E_{\text{tip}}(d) \propto f(d(t))$ ,  $f(d(t))$  是描述散射场场强与距离  $d$  关系的函数; 二是来自样品表面的散射场, 其场强为  $E_{\text{sample}}$ , 不随  $d$  的变化而变化, 只影响来自针尖表面散射场的幅值, 而不改变其变化规律. 因此, 总远场散射场强可以表示为  $E_{\text{total}}^{\text{far-field}}(t) = (E_{\text{tip}}(t) + E_{\text{sample}})\gamma$ , 其中  $\gamma$  是其他调制因子. 近场散射信号随  $d$  发生非线性变化, 含有一阶、二阶、三阶等高次谐波分量, 其场强  $E_{\text{near-field}}$  可以表示为  $E_{\text{near-field}}(d) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n d^n \exp(\varphi_n)$ , 其中  $A_n$  是第  $n$  阶谐波分量的振幅,  $d$  是针尖与样品之间的距离,  $\varphi_n$  是第  $n$  阶谐波分量的相位.

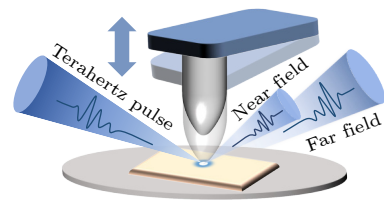


图 2 SNOM 针尖原理示意图

Fig. 2. Schematic diagram operational principle of the SNOM tip.

远场散射信号主要蕴含在一阶信号中, 而近场散射信号则包含高次谐波分量, 因此, 可以通过高阶解调原理提取出近场散射信号中二阶及以上的高次谐波信号, 有效消除远场散射背景噪声的干扰. 这种方法利用针尖与样品之间距离变化对近场

信号的非线性调制特性,使得高阶信号在背景噪声中的占比显著增大,从而实现对微弱近场信号的高灵敏度检测,提高了信号的纯净度.同时,相较于常用的自零差探测技术、外差探测、膺外差探测技术等<sup>[16]</sup>,THz s-SNOM系统可以直接测量电场矢量(包括振幅和相位),而不需要测量光强,也无须进行干涉测量、外差探测等,这种直接测量方式避免了其他耦合项的干扰,简化了信号处理过程,显著提高信噪比,使得系统能够在复杂的实验环境中获取高质量的近场信息.

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 原子力显微镜

本套 THz s-SNOM 系统以原子力显微镜为基础,其在大气下空间分辨率可达 10—20 nm<sup>[30,31]</sup>,这一分辨率远优于传统光学显微镜(通常为 200 nm 左右),并且突破了传统 THz 成像技术的限制(通常在亚毫米量级),能够在纳米尺度下对样品表面进行精细成像,可清晰观察到样品表面的微小结构和特征,如纳米颗粒、表面粗糙度、晶体缺陷等.

系统进行形貌扫描功能时,AFM 针尖接近样品表面并以一定的共振频率做小幅度振动,针尖与样品表面之间的相互作用力使得振动的振幅、相位等参数发生变化,系统通过检测这些变化来获取样品表面的高度信息.同时,系统还可以同步获取样品表面的 THz 近场显微图像,实现形貌与光学性质的双重表征.这种多信息获取能力是传统成像技术难以实现的.

在可见光到中红外频率下,通常使用长度为 10—20  $\mu\text{m}$ 、针尖顶点半径为 10—50 nm 的标准金属涂层 AFM 针尖,其能够提供足够大的信噪比和针尖半径量级的空间分辨率<sup>[32]</sup>.然而在 THz 频段,波长远大于针尖长度,标准 AFM 针尖的避雷针或天线效应显著减弱<sup>[33–35]</sup>,因此 THz s-SNOM 一般使用较长的针尖或更大的针尖半径<sup>[33,36–38]</sup>来获得更强的 THz 近场信号,但也制约了系统空间分辨率的提升.2023 年, Cai 等<sup>[39]</sup>利用本套系统评估了针尖顶点直径为 50 nm 时散射 THz 电场信号与针尖到样品表面距离之间的关系,结果显示,随着针尖到样品表面距离的增大,THz 信号峰值呈指数下降,表明存在强近场约束.随后,研究成员通过测量 THz 信号的  $1/e$  衰减宽度来评估针尖顶点附近纳米尺度场的约束,结果为  $\sim 68$  nm.这个指标展现了 THz s-SNOM 具有较高的分辨率,并且可以作为成像分辨率的近似值,直接验证了系统在纳米尺度场约束与成像分辨率方面的优越性.

通过针尖参数优化,系统使用长度为 80  $\mu\text{m}$ 、针尖直径 50 nm 的 PtIr 针尖对静态随机存取存储器(static random access memory, SRAM, 一种基于硅的集成电路)进行成像.图 3(a)所示为样品表面和针尖悬臂的光学照片,尺寸为 500  $\mu\text{m} \times 650 \mu\text{m}$ ,由该图可见,样品表面结构呈均匀有序排列,部分区域存在少量刮痕或缺陷.图 3(c)给出了针尖处 5  $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$  区域内的高度扫描图像,高度差仅为 478 nm,表明样品平整度较好,进一步验证了系统空间分辨率可达纳米量级,并可用于材料亚表面结构的检测,在微纳电子器件的缺陷检测和结构表征中具有重要应用价值.

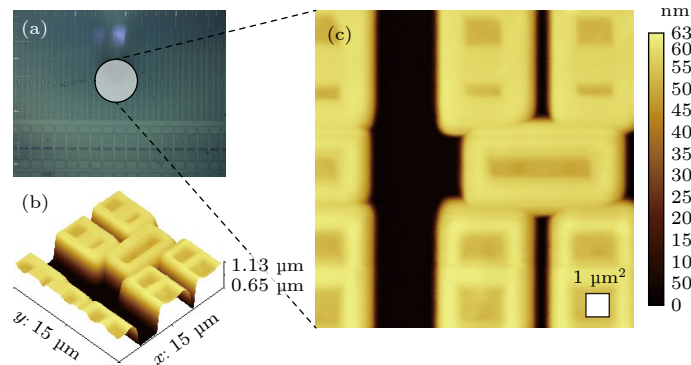


图 3 SRAM 样品的高度信息 (a) 表面光学照片; (b) 样品的三维立体图像; (c) AFM 高度形貌

Fig. 3. Height information of SRAM sample: (a) Optical photographs of the surface taken with the cantilever; (b) three-dimensional images of the sample; (c) AFM height topography of the sample.

### 3.2 静态 THz 时域光谱扫描

为了消除不同实验条件对测量结果的影响, 同时获得最佳信噪比, 通常使用已知样品 (如金或硅) 来校准光路, 并将其作为“参考样品”以便与后续信号进行归一化比较. 为此, 将厚度为 100 nm 的标准金纳米薄膜放置于样品架上, 并使用干燥的氮气充满系统, 待系统内部相对湿度降低到~4% 后开始测量.

挡住调制激光, 打开 THz 发射天线和探测天线, 将系统设置为静态 THz 时域光谱扫描模式. 进入粗扫页面, 微调光路中抛物面镜角度, 直至观察能够获得当前条件下最大散射信号后开始正式测量. 由于样品表面精细信息主要包含在近场信号中, 仅关注二阶等高阶解调信号. 测量得到金纳米薄膜的高阶静态 THz 时域散射信号, 如图 4 所示. 从图 4(a) 可以看出, 高阶 THz 时域散射信号也都表现为典型的单周期脉冲, 辐射峰值随着阶数增加而逐渐衰减, 并呈现出如图 4(c) 所示的指数衰减情况. 计算可知该系统二阶 THz 时域散射信号的信噪比为 56.34 dB, 并在五阶解调时仍有明显信号, 表明本系统在低噪声检测方面的优势. 这种高信噪比能力使其在复杂样品的检测中表现出色, 尤其是在纳米尺度下对微弱信号的检测方面. 图 4(b) 为不同阶数对应的 THz 频谱图, 随着阶数增加, THz 散射信号强度逐渐减小, 但是覆盖频段范围保持不变. 由对应的光谱图可知, 近场 THz 散射光谱宽度可以覆盖 0.2—2.2 THz 的范围.

图 5(a), (b) 所示为样品 SRAM 在不同掺杂浓度区域的静态 THz 时域光谱信息. 图 5(b) 展现的是样品在同一区域的 THz 散射强度图, 很明显, 由于样品当中掺杂浓度的不均匀性, 其在同一区域不同位置展现出较大的散射强度差异. 选取如图 5(b) 所示的 8 个点位进行静态 THz 时域光谱扫描. 为了排除远场散射信号的干扰, 系统提取出了二阶 THz 散射信号的时域波形, 结果如图 5(a) 所示. 实验结果显示, 可以通过测量 THz 时域光谱散射信号来进一步区分晶体内部的掺杂浓度情况, 为非均匀掺杂半导体材料的无损检测和特性分析提供了全新视角.

s-SNOM 的静态 THz 时域光谱测量可以用有限偶极子模型 (FDM) 来解释. 根据该模型, 利用 (1) 式—(3) 式可以计算出针尖和样品有效极化率  $\alpha_{\text{eff}}$ , 使用系统测量解调信号即可获取材料的准静态反射系数. 使用参考样品对解调信号进行归一化的过程可以描述为 (4) 式. 对于参考样品金, 其准静态反射系数约为 1. 通常, 电导率较大的样品表现出较大的反射系数, 也即归一化光谱越接近金的幅度, 由此体现出材料准静态反射系数与电导率的相关性, 进而可用于分析材料电导率<sup>[40]</sup>:

$$\alpha_{\text{eff}} \propto 1 + \frac{f_0 \beta}{2(1 - f_1 \beta)}, \quad (1)$$

$$f_{0,1} = \left( g - \frac{r_t + 2H + W_{0,1}}{2L_{\text{eff}}} \right) \times \frac{\ln(4L) - \ln(r_t + 4H + 2W_{0,1})}{\ln(4L_{\text{eff}}) - \ln r_t}, \quad (2)$$

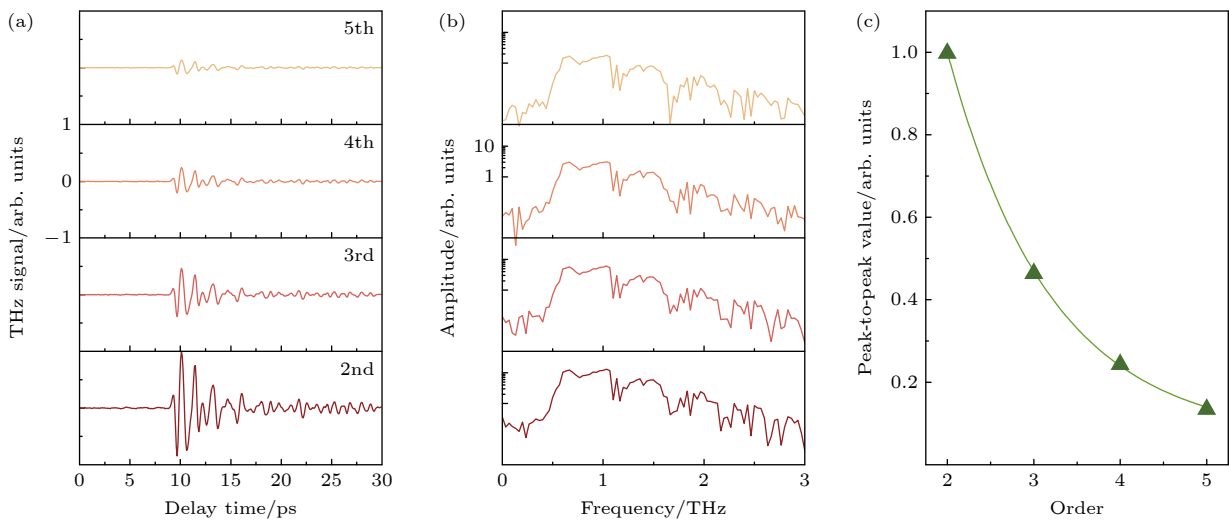


图 4 静态 THz 时域光谱扫描模式示意图 (a) 时域波形; (b) 频域波形; (c) 不同阶数信号峰值值

Fig. 4. Static THz time-domain spectroscopy scanning pattern mapping: (a) Time-domain waveforms; (b) frequency-domain waveforms; (c) peak value of signals at different orders.

$$S_n = (1 + r)^2 \alpha_{\text{eff},n}, \quad (3)$$

$$\frac{S_n}{S_{n,\text{ref}}} = \frac{E_{s,n}}{E_{s,n,\text{ref}}} = \frac{(1 + r)^2 \alpha_{\text{eff},n}}{(1 + r_{\text{ref}})^2 \alpha_{\text{eff},n,\text{ref}}}, \quad (4)$$

其中,  $g = 0.4\exp(0.06i)$ ,  $\beta = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1}$  为准静态反射系数,  $H$  为针尖与样品间高度,  $L_{\text{eff}}$  为探针有效长度.  $f_{0,1}$  为针尖几何参数, 与样品无关.  $W_0 \approx 1.31r_t$ ,  $W_1 \approx 0.5r_t$ , 其中  $r_t$  为针尖半径.

### 3.3 光泵浦-THz 探测

传统的测试载流子动力学方法, 如表面光电电压 (SPV) 等<sup>[41-43]</sup>, 分辨率通常被限制在微米级别以上, 且难以与半导体材料的纳米尺度结构特征实现原位对应. 然而, 本系统具有更高的分辨率和先进性, 能够深入探究半导体材料中的超快载流子动力学过程, 为理解和优化这些材料的性能提供了有力工具. 图 5(c) 给出了系统在泵浦激光功率为 14.51 mW 时, 拓扑绝缘体的超快时间分辨的光泵浦-THz 探测的二至五阶时域信号. 在静态 THz 时

域光谱扫描工作模式下, 打开调制激光, 即可获得低于 100 fs 时间分辨率的光泵浦-THz 探测动力学曲线, 如图 5(c) 所示. 当泵浦激光激发拓扑绝缘体样品时, 材料被激发形成光生载流子, 使得 THz 散射信号增强. 随着时间的推移, 载流子逐渐复合, THz 信号的幅值会逐渐下降. 图 5(d), (e) 分别给出了光激发前后样品的 THz 散射强度图, 可以看出光激发后的样品 THz 散射信号明显增强. 从图 5(e) 可以看出, 泵浦功率过高时, 样品产生了一定损坏, 且这种损坏能够被系统敏感的探测到, 这也说明了本套系统在缺陷检测等领域具有极大潜力.

### 3.4 激光 THz 发射光谱

在光泵浦-THz 探测的架构中, 关闭光导 THz 发射天线, 仪器的功能就被切换到了激光 THz 发射光谱. 图 6(a) 所示为 InAs 材料的二阶 THz 时域波形. 飞秒激光作用在 InAs 材料上, 通过 Photo-Dember 效应, 产生大量的光生载流子, 进而反射发射出大量 THz 波. 波形的峰值反映了样品对激

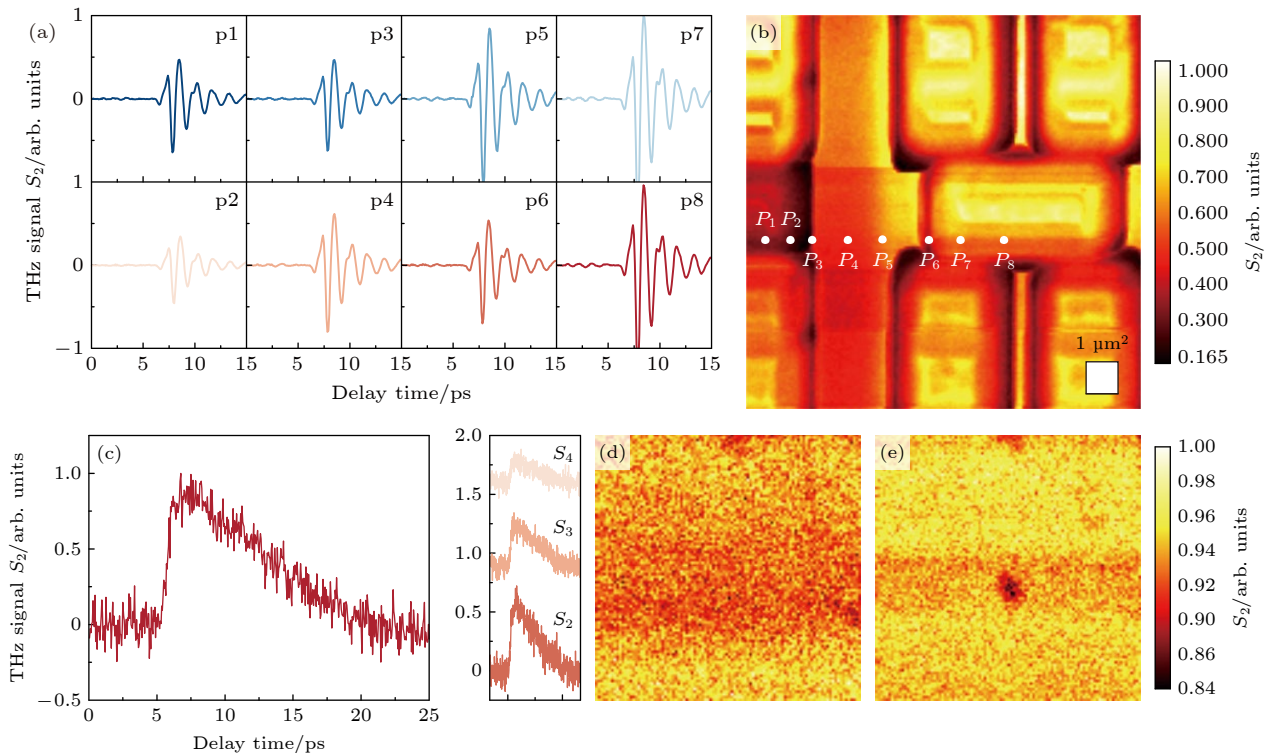


图 5 样品 SRAM 的 THz 散射强度映射及拓扑绝缘体的光泵浦-THz 探测响应 (a) THz 散射时域波形; (b) 同一区域的 THz 散射强度图; (c) 拓扑绝缘体的光泵浦-THz 探测时域波形; (d) 拓扑绝缘体光激发前 THz 散射强度图; (e) 拓扑绝缘体光激发后散射强度图  
Fig. 5. THz scattering intensity mapping of SRAM and optical pump-THz probe response of topological insulator: (a) THz scattering time-domain waveforms; (b) THz scattering intensity map of the same region; (c) optical pump-THz probe time-domain waveforms of topological insulator; (d) topological insulator morphology before photoexcitation; (e) topological insulator morphology after photoexcitation.

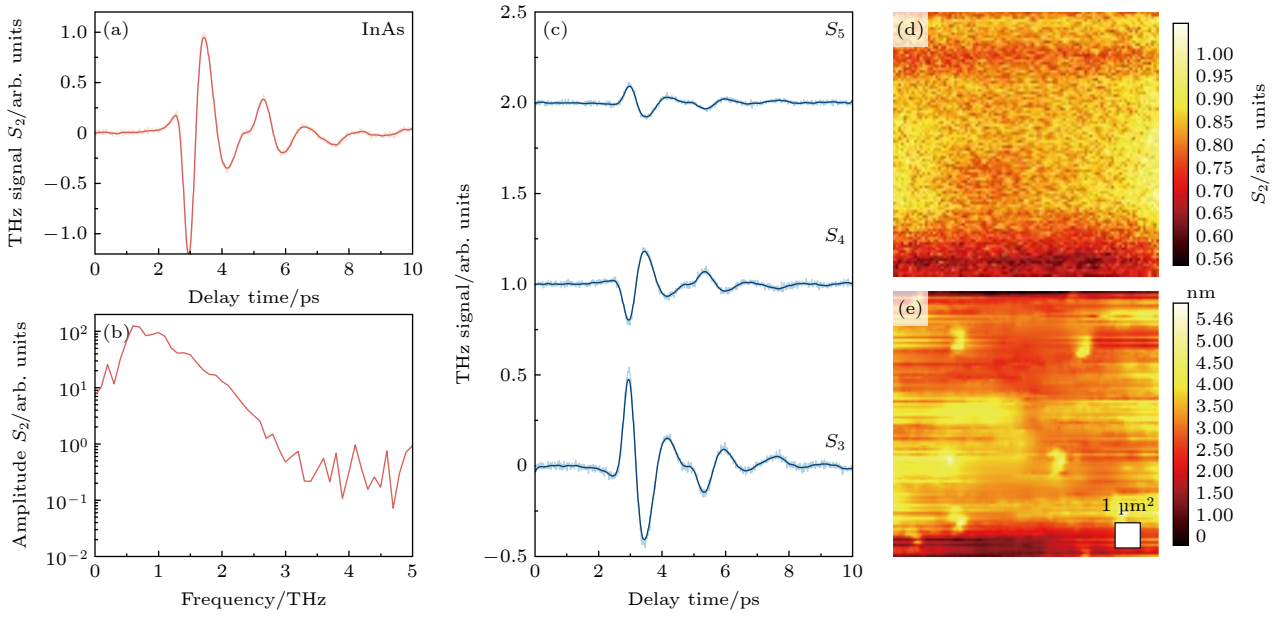


图6 InAs 样品 THz 发射信号 (a) 二阶时域波形; (b) 二阶频域波形; (c) 高阶时域波形; (d) 静态 THz 时域光谱散射扫描成像图; (e) AFM 高度形貌

Fig. 6. THz emission signals of the InAs sample: (a) Second-order time-domain waveform; (b) second-order frequency-domain waveform; (c) higher-order time-domain waveforms; (d) static THz time-domain spectral scattering scanning imaging; (e) AFM height topography of the sample.

光脉冲的最有效响应, 表明了光生载流子的瞬时产生和 THz 发射的高效性. 图 6(b) 进一步展示了 InAs 样品发射的二阶 THz 信号的幅度谱, 当泵浦激光激发半导体样品时, 材料中的电子和空穴吸收能量并形成光生载流子, 导致 THz 散射信号显著增强. 随着时间的推移, 载流子逐渐复合, THz 信号的幅值逐渐衰减. 发射信号的频谱范围主要集中在 0.2—2.2 THz 之间, 并在 1.1 THz 处出现明显的峰值. 这一结果表明, 该频段内的信号强度与载流子的激发和复合过程密切相关. 此外, 频谱的形状和强度还受到样品的材料特性 (如载流子浓度和迁移率) 以及泵浦激光功率的影响. 通过针尖耦合效应, 散射的 THz 信号被光电采样信号提取出来. 这种针尖耦合技术不仅增强了 THz 信号的局域场强度, 还提高了信号的空间分辨率, 使得纳米尺度下的载流子动力学研究成为可能. 这种结合光泵浦-THz 探测技术和针尖耦合的实验架构, 为研究半导体材料中的超快载流子动力学提供了高灵敏度和高分辨率的手段. 图 6(d) 所示为 InAs 样品在纳米尺度下的 THz 时域光谱散射成像结果. 对于表面均匀的 InAs 介质, 理论上其散射图像也呈现均匀分布, 但实验结果显示材料表面存在若干散射信号显著减弱的区域. 通过进一步分析发现, 这些

异常区域源于 InAs 表面存在的结构缺陷, 这一结论可通过如图 6(e) 所示 AFM 高度形貌图像得到验证.

## 4 总结与展望

本文系统介绍了超快 THz s-SNOM 系统. 通过结合 THz 光谱技术和扫描探针技术, 实现了对样品 SRAM 表面及亚表面结构纳米尺度的高分辨率成像, 表征了样品的 AFM 高度形貌, THz 散射强度谱和超快载流子动力学过程等, 突破了传统远场探测技术的衍射极限. 利用该显微镜, 我们不仅能够纳米尺度上精准提取材料的电导率等电学性质, 还能够进一步探究半导体材料中的超快载流子动力学过程, 获得材料在飞秒激光作用下, 纳米尺度的 THz 发射. 与扫描隧道显微镜 (STM) 和 AFM 相比, THz s-SNOM 避免了直接接触可能带来的损伤和污染; 与荧光超分辨显微镜和拉曼超分辨显微镜相比 [44], THz s-SNOM 不仅适用于无法进行荧光标记的样品, 还能提供样品表面的振幅、相位和偏振等丰富光学信息. 比如在低维量子材料的研究中 [45,44], THz s-SNOM 技术能够实现材料表面纳米级分辨率的光学成像, 并研究其载流子动力

学、异质结界面以及纳米光子学器件的光学性质等。因此, THz s-SNOM 技术作为一种无需荧光标记、非接触、无损伤的超分辨光谱技术, 为将 THz 技术推进到纳米材料科学、纳米自旋电子学及其交叉学科研究开辟了新的视野。

尽管 THz s-SNOM 技术在空间、时间和光谱分辨率方面展现出显著优势, 其性能优化仍存在多维突破路径。在空间分辨率维度, 通过集成超透镜/超表面技术优化近场耦合效应<sup>[45]</sup>, 结合尖端探针设计增强信号强度<sup>[46]</sup>, 可进一步突破现有纳米级分辨极限; 针对时间分辨率提升, 当前系统分辨率主要受限于飞秒激光脉宽与延迟线精度限制, 未来可通过优化激光源脉宽压缩以及引入定量相位成像技术<sup>[47-49]</sup>提高动态监测速度与灵敏度, 为瞬态过程分析提供更高效的手段; 光谱维度拓展方面, 借助宽频带量子级联激光光源与高分辨率光谱仪的协同工作<sup>[50-52]</sup>, 有望实现全频段精细光谱解析, 从而完善材料 THz 特性数据库。同时, 未来还可通过引入深度学习来简化成像过程、实现快速高分辨率成像<sup>[45]</sup>, 结合人工智能算法高效处理海量数据, 显著提升整体分析效率。这些技术的融合与创新, 将为 THz s-SNOM 技术多个领域的应用和发展提供新的思路, 有望开启 THz 成像技术的新篇章。

## 参考文献

- [1] Chen X L, Ma M W, Yang X M, Yang K, Ji T, Wu S W, Zhu Z Y 2008 *Acta Phys. -Chem. Sin.* **24** 1969 (in Chinese) [陈西良, 马明旺, 杨小敏, 杨康, 吉特, 吴胜伟, 朱智勇 2008 物理化学学报 **24** 1969]
- [2] Cocker T L, Jelic V, Hillenbrand R, Hegmann F 2021 *Nat. Photon.* **15** 558
- [3] Jepsen P U, Cooke D G, Koch M 2011 *Laser Photon. Rev.* **5** 124
- [4] Ulbricht R, Hendry E, Shan J, Heinz T F, Bonn M 2011 *Rev. Mod. Phys.* **83** 543
- [5] Kampfrath T, Tanaka K, Nelson, K A 2013 *Nat. Photon.* **7** 680
- [6] Lloyd-Hughes J 2005 *Phys. Rev. B* **71** 195301
- [7] Beard M C, Turner G M, Schmuttenmaer C A 2000 *Phys. Rev. B* **62** 15764
- [8] Xing X, Zhao L T, Zhang Z Y, Liu X K, Zhang K L, Yu Y, Lin X, Chen H Y, Chen J Q, Jin Z M, Xu J H, Ma G H 2017 *J. Phys. Chem. C* **121** 20451
- [9] Knoll B, Keilmann F, Kramer A, Guckenberger R 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 2667
- [10] Lahrech A, Bachelot R, Gleyzes P, Boccara A C 1996 *Opt. Lett.* **21** 1315
- [11] Knoll B, Keilmann F 1999 *Nature* **399** 134
- [12] van der Valk N C J, Planken P C M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 1558
- [13] Chen H T, Kersting R, Cho G C 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3009
- [14] Buerkens F, Kersting R, Chen H T 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 112
- [15] Chen X Z, Liu X, Guo X D, Chen S, Hu H, Nikulina E, Ye X L, Yao Z H, Bechtel H A, Martin M C, Carr G L, Dai Q, Zhuang S L, Hu Q, Zhu Y M, Hillenbrand R, Liu M K, You G J 2020 *ACS Photonics* **7** 687
- [16] Plankl M, Faria P E Jr, Mooshammer F, Siday T, Zizlsperger M, Sandner F, Schiegl F, Maier S, Huber M A, Gmitra M, Fabian J, Boland J L, Cocker T L, Huber R 2021 *Nat. Photon.* **15** 594
- [17] Chen S, Leng P L, Konečná A, Modin E, Gutierrez-Amigo M, Vicentini E, Martín-García B, Barra-Burillo M, Niehues I, Maciel Escudero C, Xie X Y, Hueso L E, Artacho E, Aizpuru J, Errea I, Vergniory M G, Chuvilin A, Xiu F X, Hillenbrand R 2023 *Nat. Mater.* **22** 860
- [18] Cocker T L, Jelic V, Gupta M, Molesky S J, Burgess J A J, de los Reyes G, Titova L V, Tsui Y Y, Freeman M R, Hegmann F A 2013 *Nat. Photon.* **7** 620
- [19] Eisele M, Cocker T L, Huber M A, Plankl M, Viti L, Ercolani D, Sorba L, Vitiello M S, Huber R 2014 *Nat. Photon.* **8** 841
- [20] Wu X J, Kong D Y, Hao S B, Zeng Y S, Yu X Q, Zhang B L, Dai M C, Liu S J, Wang J Q, Ren Z J, Chen S, Sang J H, Wang K, Zhang D D, Liu Z K, Gui J Y, Yang X J, Xu Y, Leng Y X, Li Y T, Song L W, Tian Y, Li R X 2023 *Adv. Mater.* **35** 2208947
- [21] Jin Z M, Guo Y Y, Li B Y, Li Z S, Ma G H, Cao S X, Peng Y, Zhu Y M, Zhuang S L 2022 *Acta Photon. Sin.* **51** 0751410 (in Chinese) [金钻明, 郭颖钰, 季秉煜, 李章顺, 马国宏, 曹世勋, 彭滢, 朱亦鸣, 庄松林 2022 光子学报 **51** 0751410]
- [22] Seifert T, Jaiswal S, Martens U, Hannegan J, Braun L, Maldonado P, Freimuth F, Kronenberg A, Henrzi J, Radu I, Beaurepaire E, Mokrousov Y, Oppeneer P M, Jourdan M, Jakob G, Turchinovich D, Hayden L M, Wolf M, Münzenberg M, Kläui M, Kampfrath T 2016 *Nat. Photon.* **10** 483
- [23] Kong D Y, Wu X J, Wang B, Nie T X, Xiao M, Pandey C, Gao Y, Wen L G, Zhao W S, Ruan C J, Miao J G, Li Y T, Wang L 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1900487
- [24] Wang B, Shan S Y, Wu X J, Wang C, Pandey C, Nie T X, Zhao W S, Li Y T, Miao J G, Wang L 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 121104
- [25] Chen X H, Wang H T, Wang C, Ouyang C, Wei G S, Nie T X, Zhao W S, Miao J G, Li Y T, Wang L, Wu X J 2021 *Adv. Photonics Res.* **2** 2000099
- [26] Liu S J, Guo F W, Li P Y, Wei G S, Wang C, Chen X H, Wang B, Zhao W S, Miao J G, Wang L, Xu Y, Wu X J 2022 *Adv. Mater. Interfaces* **9** 2101296
- [27] Chen X H, Wang H T, Liu H J, Wang C, Wei G S, Fang C, Wang H C, Geng C Y, Liu S J, Li P Y, Yu H M, Zhao W S, Miao J G, Li Y T, Wang L, Nie T X, Zhao J M, Wu X J 2022 *Adv. Mater.* **34** 2106172
- [28] Liu S J, Lu C H, Fan Z Q, Wang S X, Li P Y, Chen X H, Pan J, Xu Y, Liu Y, Wu X J 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 172404
- [29] Li P Y, Liu S J, Liu Z, Li M, Xu H, Xu Y, Zeng H P, Wu X J 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 201102
- [30] Klarskov P, Kim H, Colvin V L, Mittleman D M 2017 *ACS Photonics* **4** 2676
- [31] Pizzuto A, Ma P C, Mittleman D M 2023 *Light Sci. Appl.* **12** 96
- [32] Hillenbrand R, Abate Y, Liu M, Chen X, Basov D N 2025 *Nat. Rev. Mater.* **10** 285

- [33] von Ribbeck H G, Brehm M, van der Weide D W, Winnerl S, Drachenko O, Helm M, Keilmann F 2008 *Opt. Express* **16** 3430
- [34] Siday T, Hale L L, Hermans R I, Mitrofanov O 2020 *ACS Photonics* **7** 596
- [35] Mastel S, Lundeborg M B, Alonso-González P, Gao Y, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J, Koppens F H L, Nikitin A Y, Hillenbrand R 2017 *Nano Lett.* **17** 6526
- [36] Maissen C, Chen S, Nikulina E, Govyadinov A, Hillenbrand R 2019 *ACS Photonics* **6** 1279
- [37] Moon Y, Lee H, Lim J, Lee G, Kim J, Han H 2023 *AIP Adv.* **13** 065211
- [38] Pistore V, Schiattarella C, Viti L, Siday T, Johnston M B, Mitrofanov O, Vitiello M S 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 221105
- [39] Cai J H, Dai M C, Chen S, Chen P, Wang J Q, Xiong H T, Ren Z J, Liu S J, Liu Z K, Wan C H, Bai M, Wu X J 2023 *Appl. Phys. Rev.* **10** 041414
- [40] Huang Z Y, Li J, Li P Y, Du L, Dai M C, Cai J H, Ren Z J, Nie T X, Wu X J 2025 *iScience* **28** 111840
- [41] Tanaka S, More S D, Murakami J, Itoh M, Fujii Y, Kamada M 2001 *Phys. Rev. B* **64** 155308
- [42] Maeda N, Hata H, Osada N, Shen Q, Toyoda T, Kuwahara S, Katayama K 2013 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **15** 11006
- [43] Shingai D, Ide Y, Sohn W Y, Katayama K 2018 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20** 3484
- [44] Huang S Y, Wang C, Xie Y G, Yu B Y, Yan H G 2023 *Photonics Insights* **2** R03
- [45] Astratov V N, Sahel Y B, Eldar Y C, Huang L, Ozcan A, Zheludev N, Zhao J, Burns Z, Liu Z, Narimanov E, Goswami N, Popescu G, Pfitzner E, Kukura P, Hsiao Y-T, Hsieh C-L, Abbey B, Diaspro A, LeGratiet A, Bianchini P, Shaked N T, Simon B, Verrier N, Debailleul M, Haeberlé O, Wang S, Liu M, Bai Y, Cheng J-X, Kariman B S, Fujita K, Sinvani M, Zalevsky Z, Li X, Huang G-J, Chu S-W, Tzang O, Hershkovitz D, Cheshnovsky O, Huttunen M J, Stanciu S G, Smolyaninova V N, Smolyaninov I I, Leonhardt U, Sahebdivan S, Wang Z, Luk'yanchuk B, Wu L, Maslov A V, Jin B, Simovski C R, Perrin S, Montgomery P, Lecler S 2023 *Laser & Photonics Rev.* **17** 2200029
- [46] Tao W H, Zhao S H, Dong H J, Zhang G F, Yang S M 2024 *Metro. Sci. Technol.* **68** 76 (in Chinese) [陶伟灏, 赵书浩, 董涵瑾, 张国锋, 杨树明 2024 *计量科学与技术* **68** 76]
- [47] Park Y, Depeursinge C, Popescu G 2018 *Nat. Photon.* **12** 578
- [48] Paturzo M, Merola F, Grilli S, Nicola S D, Finizio A, Ferraro P 2008 *Opt. Express* **16** 17107
- [49] Jiaji L, Alex C M, Yunzhe L, Qian C, Chao Z, Lei T 2019 *Adv. Photon.* **1** 066004
- [50] Lü X, Röben B, Biermann K, Wubs J R, Macherius U, Weltmann K D, van Helden J H, Schrottke L, Grahm H T 2023 *Semicond. Sci. Technol.* **38** 035003
- [51] Dean P, Valavanis A, Keeley J, Bertling K, Lim Y L, Alhathloul R, Burnett A D, Li L H, Khanna S P, Indjin D, Taimre T, Rakić A D, Linfield E H, Davies A G 2014 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47** 374008
- [52] Hübers H W, Eichholz R, Pavlov S G, Richter H 2013 *J. Infrared Milli. Terahz. Waves* **34** 325

## INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT

**Ultrafast terahertz scattering scanning near-field optical microscope**WANG Youwei MA Yihang WANG Jiayi WANG Ziquan RAO Xinyu  
DAI Mingcong HUANG Ziyu WU Xiaojun<sup>†</sup>*(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)*

( Received 21 February 2025; revised manuscript received 11 April 2025 )

**Abstract**

Terahertz (THz) time-domain spectroscopy and imaging techniques on a nanoscale are crucial for material research, device detection, and others. However, traditional far-field THz time-domain spectroscopy faces inherent diffraction limitations, which limits the applications of carrier dynamics analysis that require femtosecond time resolution and nanoscale spatial precision. We present a scattering-type scanning near-field optical microscopy that overcomes these limitations by combining ultrafast THz time-domain spectroscopy with atomic force microscopy (AFM). The utilization of the near-field interaction between the needle tip and the sample surface is demonstrated to facilitate the study of semiconductor materials and devices by using static THz spectroscopy with a lateral spatial resolution of  $\sim 60$  nm. This, in turn, enables the acquisition of static THz conductivity distributions of the semiconductor materials. Additionally, it facilitates the acquisition of transient conductivity distributions of semiconductor materials and laser THz emission ultrafast via photoexcited transient carrier kinetic processes, which provides substantial support for studying the performances of materials and devices in nanometer spatial resolution, ultrafast time resolution, and THz spectroscopic imaging. The experimental results show that the system has a signal-to-noise ratio as high as 56.34 dB in the static THz time-domain spectral mode, and can effectively extract the fifth-order harmonic signals covering the 0.2–2.2 THz frequency band with a spatial resolution of up to  $\sim 60$  nm. Carrier excitation and complexation processes in topological insulators are successfully observed by optical pump-THz probe with a time resolution better than 100 fs. Imaging of SRAM samples by the system reveals differences in THz scattering intensity due to non-uniformity in doping concentration, thereby validating its potential application in nanoscale defect detection. This study not only provides an innovative means for studying the nanoscale electrical characterization of semiconductor materials and devices, but also opens a new way for applying the THz technology to interdisciplinary subjects such as nanophotonics and spintronics. In the future, by integrating the superlens technology, optimizing the probe design, and introducing deep learning algorithms, it is expected to further improve the temporal- and spatial-resolution and detection efficiency of the system.

**Keywords:** terahertz electromagnetic wave, scanning near-field optical microscope, semiconductor materials, devices

**PACS:** 87.50.U-, 68.37.Uv, 82.53.Mj**DOI:** [10.7498/aps.74.20250211](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250211)**CSTR:** [32037.14.aps.74.20250211](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250211)<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [xiaojunwu@buaa.edu.cn](mailto:xiaojunwu@buaa.edu.cn)



## 超快太赫兹散射型扫描近场光学显微镜

王有为 马一航 王嘉毅 汪子权 饶馨予 代明聪 黄滋宇 吴晓君

## Ultrafast terahertz scattering scanning near-field optical microscope

WANG Youwei MA Yihang WANG Jiayi WANG Ziquan RAO Xinyu DAI Mingcong HUANG Ziyu  
WU Xiaojun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 148703 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250211

CSTR: 32037.14.aps.74.20250211

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250211>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

太赫兹散射式扫描近场光学显微镜中探针与样品相互作用及其影响探究

Tip-sample interactions in terahertz scattering scanning near-field optical microscopy and its influences

物理学报. 2021, 70(24): 248703 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211715>

基于半导体纳米线/锥形微光纤探针的被动式近场光学扫描成像

Passive near-field optical scanning imaging based on semiconductor nanowire/tapered microfiber probe

物理学报. 2022, 71(4): 044201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211810>

用于超快扫描电子显微镜的光发射电子枪及电子光学模拟

Photo-emission electron gun and electron optical simulation for ultrafast scanning electron microscope

物理学报. 2024, 73(22): 222901 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241245>

偏振调制扫描光学显微镜方法

Polarization modulation scanning optical microscopy method

物理学报. 2024, 73(15): 157801 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240688>

太赫兹实时近场光谱成像研究

Research on terahertz real-time near-field spectral imaging

物理学报. 2022, 71(16): 164201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220131>

基于近场光学成像技术的极化激元学研究进展

Research advances in polaritonics based on near-field optical imaging technique

物理学报. 2024, 73(8): 080701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20232001>