

文章编号: 1005-5630(2023)04-0009-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.004.002

太赫兹近场光学亚表面检测技术研究

童海泉, 游冠军

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 研究了太赫兹散射式扫描近场光学显微镜(Terahertz scattering-type scanning near-field optical microscopy, THz s-SNOM)对亚表面金属微纳结构的显微成像检测。首次采用自主搭建的THz s-SNOM系统对表面覆盖了六方氮化硼薄膜的金微米线进行太赫兹近场显微测量, 获得了具有纳米量级空间分辨率和较高对比度的近场显微图。结合全波数值模拟, 分析了THz s-SNOM探测亚表面金属微纳结构的分辨率、近场散射信号强度和成像对比度。研究表明, THz s-SNOM具有优良的亚表面显微成像检测能力, 可应用于微纳电子器件的亚表面结构表征和缺陷检测。

关键词: 散射式扫描近场光学显微镜; 亚表面检测; 太赫兹成像

中图分类号: O 433 **文献标志码:** A

Research on Terahertz near-field optical subsurface detection technology

TONG Haiquan, YOU Guanjun

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: This paper investigated the microscopic imaging and detection of subsurface metal micro/nano structures using Terahertz scattering-type near-field optical microscopy (THz s-SNOM). For the first time, a self-built THz s-SNOM system was employed to measure the Terahertz near-field of gold micro wires covered with hexagonal boron nitride (h-BN) film on the surface, resulting in near-field microscopy images with nanometer-level spatial resolution and high contrast. Combined with full-wave numerical simulation, the spatial resolution, near-field scattering signal intensity, and imaging contrast of THz s-SNOM for detecting subsurface metal micro/nano structures were analyzed. The study shows that THz s-SNOM has excellent subsurface microscopic imaging and detection capabilities and can be applied to the subsurface structure characterization and defect detection of micro/nano electronic devices.

收稿日期: 2023-02-02

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0106304, 2016YFF0200306)

第一作者: 童海泉(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为太赫兹近场光学显微技术。E-mail: 870443588@qq.com

通信作者: 游冠军(1979—), 男, 副教授, 研究方向为近场光学显微技术与超快光谱技术。

E-mail: youguanjuan@126.com

Keywords: scattering-type scanning near-field optical microscopy; subsurface detection; Terahertz imaging

引 言

散射式扫描近场光学显微技术 (scattering-type scanning near-field optical microscopy, s-SNOM) 常用于半导体材料和器件中微纳结构、载流子、缺陷分布相关的显微检测和表征, 在现代电子和光子学研究中具有重要意义, 推动了半导体表面检测和载流子分布的研究^[1]。半导体中载流子浓度 ($10^{15} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) 所对应的德鲁德 (Drude) 吸收峰恰好位于太赫兹波段^[2-3], 但由于传统太赫兹测量技术的空间分辨率受到光学衍射极限的限制, 且太赫兹波的波长较长, 因此传统太赫兹测量技术的分辨率通常在亚毫米量级。

近年来, 太赫兹测量技术与散射式扫描近场光学显微技术的结合^[4-10] 促进了太赫兹测量技术的发展, 成功地让太赫兹测量技术的空间分辨率突破了太赫兹波的衍射极限, 极大地拓展了太赫兹测量技术在各领域中的应用。具体来说, THz s-SNOM 的扫描近场探针将材料表面的倏逝场散射转化为可由远场探测器接收的传播场, 从而实现了纳米尺度上的样品结构以及光场的表面显微成像^[11]。

基于扫描探针显微 (scanning probe microscope, SPM) 技术的 s-SNOM 受到探针实验平台的影响, 大多只能应用于样品结构和光场的表面显微成像。虽然近场探测的光学特性能够进行一定程度的亚表面探测, 但是目前关于太赫兹近场亚表面显微技术的研究还比较少^[12-13]。相比之下, 已有许多光学远场超分辨显微技术实现了样品的整体成像, 例如利用结构光提取高频空间分辨信息的结构光照明显微 (structured illumination microscopy, SIM)^[14-21] 和基于点扩散函数工程的受激激发耗散 (stimulated emission depletion, STED)^[22-25] 显微。然而, 这些远场超分辨显微技术通常需要使用特殊的荧光染料, 并且无法实现样品的亚表面内部探测。与之相比, 近场成像并不需要使用荧光染料, 是一种纯物理的显微方式, 而且中红外和太赫兹的近场显微技术更具有

亚表面显微检测的潜力。此外, 由于近场探测与样品的介电常数相关^[26-28], 样品局部表面下埋藏的缺陷或其他材料会对样品的局部介电分布产生影响, 探针接近样品近场时, 样品局部的任何成分变化或缺陷都会表现为近场散射信号的改变。因此, THz s-SNOM 透过材料表面探测其内部成分空间分布的能力可以帮助人们更深入地理解材料本身的性质和特征。

1 实验部分

1.1 实验装置搭建

本研究使用自制的 THz s-SNOM 系统进行太赫兹近场成像。该系统采用 12 倍谐波微波源, 通过太赫兹源产生太赫兹波 (110~170 GHz)。并通过两个抛物面镜聚焦在原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) (Multi Mode 8, Germany) 探针尖端, 形成近场的散射热点, 从针尖返回的散射信号通过高阻硅分光片反射到探测器端口。

为了提取样品的近场响应, 必须抑制其他类型的反射和散射贡献。因此, AFM 在轻敲模式下工作, 利用尖端的振动频率 Ω 和振幅 Δh 解调尖端的近场散射信号, 以抑制背景散射。太赫兹接收器探测探针散射的太赫兹波, 其产生的电磁频率与太赫兹源产生的略有不同。太赫兹源和接收器之间存在的频率差为 w , 利用锁相放大器在 $w + n\Omega$ 处进行解调, 以获得近场振幅 $S(n\Omega)$ 以及相位 $\varphi(n\Omega)$, 其中 Ω 作为尖端振动频率是近场的调制频率, n 为谐波次数。本研究使用适用于太赫兹近场的探针 (Rocky Mountain Nanotechnology, USA), 其悬臂长度 $L = 200 \mu\text{m}$, 探针轴长度 $h_{\text{tip}} = 80 \mu\text{m}$, 尖端半径 $a = 20 \mu\text{m}$ 。由于探针尖端与入射电磁波的共振特性, 当尖端长度与入射电磁波长满足天线共振关系时, 会出现更强的尖端增强效应^[29]。因此, 相比传统 AFM 探针, 这种探针具有更强的太赫兹散射能力与信噪比, 从而能更准确地定性测量样品的局部介电信息。图 1 为该系统的结构示意图。

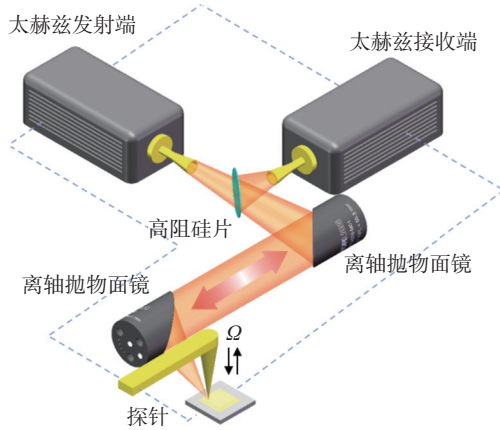


图 1 太赫兹散射式扫描近场光学显微系统结构图
Fig. 1 Structure of Terahertz scattering-type scanning near-field optical microscopic system

1.2 实验介绍及分析

利用 THz s-SNOM 系统探测了一种层叠结构, 如图 2(a)所示。其中, 六方氮化硼(h-BN)薄膜被覆盖在金线上方, 模拟介电绝缘材料下埋藏金属的情况, 这是经常会遇到的工程检测问题, 具有亚表面检测的代表性。金线长为 $30\ \mu\text{m}$, 端部横截面尺寸为 $3\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$, 覆盖的 h-BN 薄膜厚度分别为 $20\ \text{nm}$ (图 2(c)) 和 $40\ \text{nm}$ (图 2(d))。近场探针在扫描过程中, 样品局部的任何变化都会导致近场振幅的改变, 通过近场探针扫描结构时近场振幅的变化, 可判断亚表面下材料的空间分布。

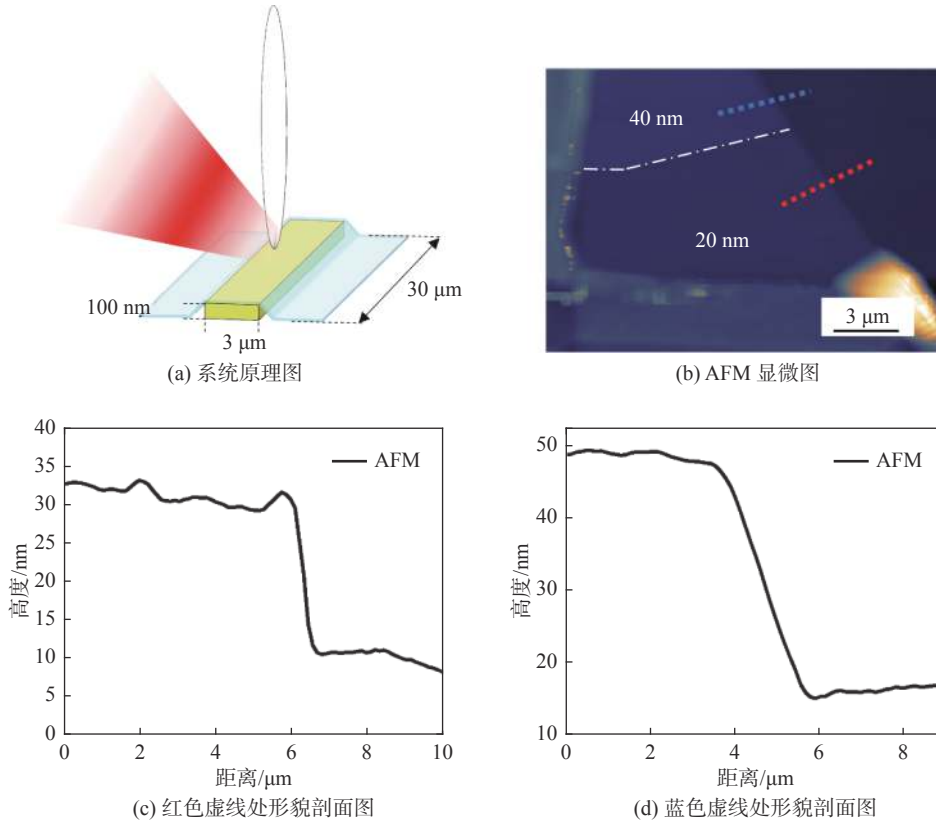


图 2 AFM 对结构的形貌成像

Fig. 2 Morphological imaging of structure by AFM

图 3 所示为在 $150\ \text{GHz}$ 的入射光场频率下, 利用 THz s-SNOM 测量 $20\ \text{nm}$ 厚的 h-BN 微结构样品得到的结果。由于重力的影响, h-BN 薄膜无法水平支撑在金线上方, 在两侧形成缓坡结构, 因此探针的形貌反馈无法准确给出真实的金线地形, 结果见图 3(c), 探测得到的形貌宽度为 $5\ \mu\text{m}$, 大于真实的金线宽度 $3\ \mu\text{m}$ 。然而,

THz s-SNOM 探针收集到的近场光学图像却能准确清晰地给出金线的真实宽度, 结果如图 3(d) 所示。为了更好地阐述这一现象, 引入近场点偶极子模型^[30]

$$\alpha_{\text{eff}} = [\alpha(1 + \beta)] / \{1 - \alpha\beta / [16\pi(a + z)^3]\} \quad (1)$$

式中: α_{eff} 为系统的有效极化率; α 是探针尖端

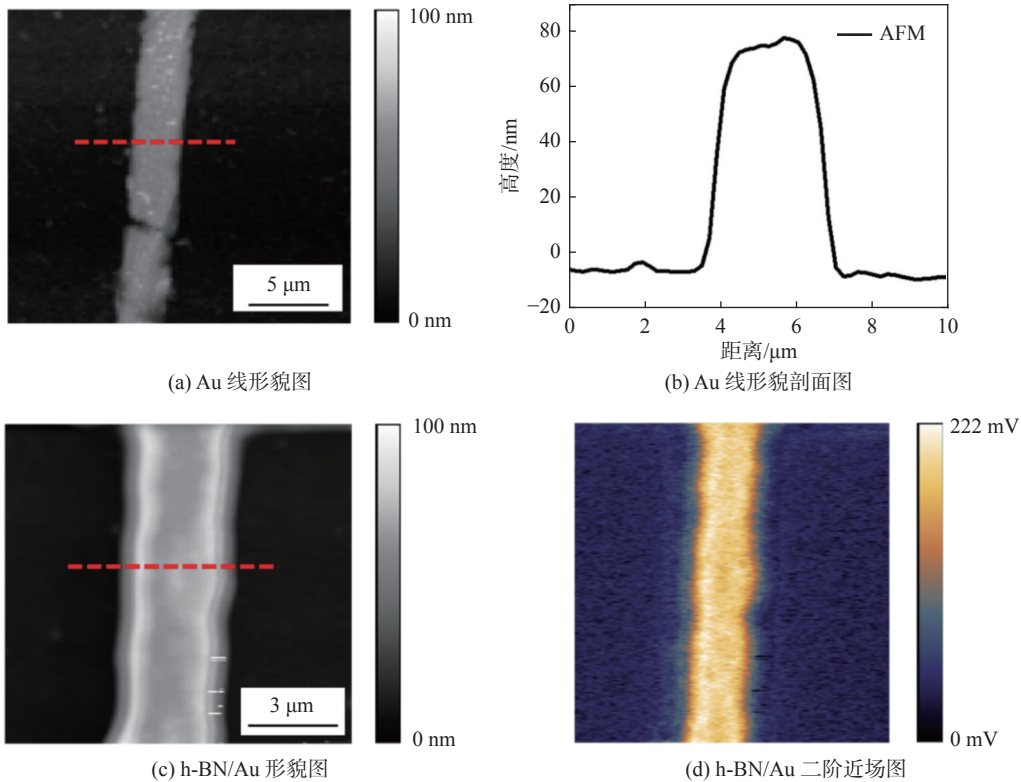


图 3 h-BN/Au/SiO₂ 微结构的 AFM 形貌图和太赫兹近场显微图

Fig. 3 AFM topography and terahertz near-field micrograph of h-BN/Au/SiO₂ microstructure

近似的介电小球的极化率； β 是样品内部镜像偶极子的极化率； a 是探针尖端半径； z 是探针尖端与样品表面的距离。一般认为尖端的散射场 $E_{sca} \propto \alpha_{eff}$ ，因此式(1)中包含了影响近场对比度变化的所有内容。金线对其上方 h-BN 薄膜的局部介电常数分布产生了影响，导致样品内部的镜像偶极子 β 增强， $\beta = (\epsilon_{sam} - 1) / (\epsilon_{sam} + 1)$ ，其中 ϵ_{sam} 是样品的局部介电常数。式(1)中的 z 表明，这种近场相互作用的距离是非常短的，且由入射场 E_{inc} 所诱导的偶极子只能指向 z 向(这是由于探针在 x - y 平面方向的强退极化作用)，因此只有当探针位于金线上方时，被金线增强的薄膜局域近场信号才会被探针所散射，并由远场探测器接收。太赫兹近场光学亚表面探测在这种情况下可以获得真实的材料空间分布。

通过测量 20 nm 厚的 h-BN 微结构样品的形貌和近场剖面图，发现在太赫兹近场亚表面探测过程中，金线边缘与 SiO₂ 衬底之间的近场空间分辨率有明显下降。造成这种下降的原因是表面 h-BN 薄膜在金线边缘的缓坡结构。该结构会让探针尖端对薄膜表面的散射截面增大，从而使

尖端对薄膜的近场信号散射增强。同时，金线边缘的 h-BN 薄膜还会因金线对局部近场探测的影响而产生较强的极化分布，导致金线边缘存在较大的信号增强区域。

在入射光场下，探针尖端与样品间存在强烈的耦合，由于倏逝波在 z 向的衰减距离只有半个波长左右，当间距 z 增加时，近场散射信号振幅会迅速减小，这种衰减是非线性的，并会产生一个锐利的电场梯度变化。这种陡峭的电场梯度变化使探针对于亚表面的厚度变化十分敏感，这一现象体现在近场光学图像振幅大小的变化上。因为近场幅值对探针-样品间距变化响应敏感，可以通过近场手段探测表层厚度的变化。

将覆盖在金线表面的 h-BN 薄膜厚度从 20 nm 调整为 40 nm，并得到其近场光学显微剖面图，见图 4(b)，其中，AFM 曲线代表对应厚度 h-BN 薄膜覆盖时 h-BN/Au/SiO₂ 微结构的形貌横截面变化，S2 曲线代表上述微结构的近场横截面变化。其中，归一化的近场光学信号的振幅由 0.9 下降至 0.7。这种显著的变化表明，太赫兹亚表面显微成像对亚表层厚度变化的分辨能力

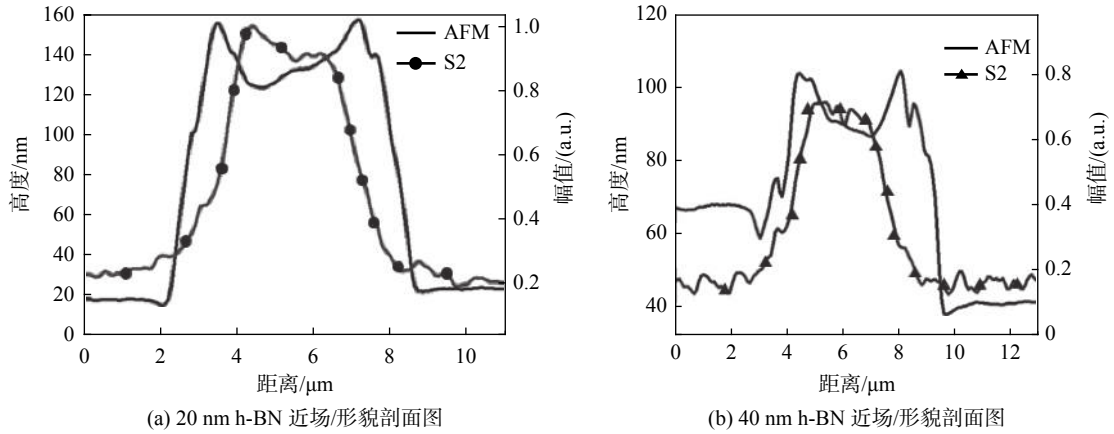


图4 h-BN/Au/SiO₂ 微结构的形貌和近场显微剖面图

Fig. 4 The morphology and near-field microscopic profile of h-BN/Au/SiO₂ microstructure

具有很大开发潜力。

2 仿真模拟

本研究的重点在于探究系统光学探针在远离金线样品表面时, 近场散射信号振幅的变化。为了模拟探针在亚表面探测实验中薄膜厚度不同的情况, 通过控制 AFM 的扫描管, 使探针以恒定的速率(20 nm/s)远离样品表面, 并在 1 000 nm 的距离中记录了三阶近场振幅信号变化的归一化曲线。这条曲线可以描述针尖与样品的距离和近场幅值之间的关系, 使用指数衰减函数对幅值与距离之间的关系进行拟合, 实验结果见图 5。

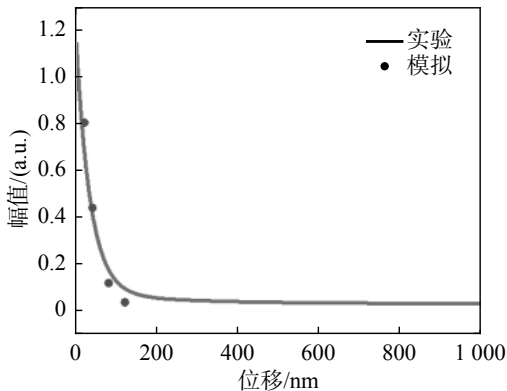


图5 Au-探针近场趋近曲线及仿真模拟结果

Fig. 5 Au-probe near field approach curve and simulation

使用多物理场建模, 采用仿真软件 COMSOL Multiphysics 模拟和优化各种复杂物理系统, 并模拟亚表面探测实验中探针与样品的近场相互作用。

用。所用模型基于有限差分域法的全波数值模拟以及高阶信号解调。该模型包括一个作为探针的截断圆锥, 一个覆盖有 h-BN 薄膜的金线作为样品, 以及模拟周围介电环境空间的 SiO₂ 衬底。探针的尖端具有 20 nm 的底面半径和 46.18 μm 的顶面半径, 这符合实验中探针的几何形状。在探针尖端与样品间隙处单独划分了网格, 同时去除了所有可能影响模拟准确性的几何奇点, 使模拟结果在收敛的同时具有有效性。分别选择了 20 nm, 40 nm, 80 nm 和 120 nm 共 4 种不同厚度的薄膜覆盖在金线上方, 以模拟不同厚度的薄膜对近场信号的影响, 验证系统对薄膜厚度的敏感性, 其近场幅值变化如图 5 中圆点所示。

由于尖端只有离样品较近的电荷参与了近场相互作用, 因此选取模型针尖区域 300 nm 的部分作为尖端。探针的尖端材料为 Pt, 其余部分则通过阻抗边界条件代替, 这并不会对模拟近场信号的变化造成很大的影响^[31]。在入射光场的照射下, 被照亮的尖端与样品表面耦合, 探针下方的电场分布被更强烈地局限在探针-样品的间隙处, 形成产生电磁辐射的近场偶极子, 其偶极矩为 P , 针尖散射电场为 E_{sca} 。散射场 E_{sca} 振幅正比于偶极矩 P 。

将 P 计算为探针尖端在入射光场照射下所诱导的表面电荷密度 σ_s 的电偶极矩

$$E_{sca} \propto P = \left| \iint \sigma_s \cdot l dS \right| \quad (2)$$

式中: l 为探针表面距离偶极子中心的距离;

dS 为面积微元。通过全波数值模拟真实探针的振动得到的有效极化率来计算远场解调的高次谐波信号

$$P(z + \Delta hc \cos(\Omega t)) = \sum_{n=0}^{\infty} E_{nf,n} \cos(n\Omega t) + \sum_{n=0}^{\infty} E_{bac,n} \cos(n\Omega t) \quad (3)$$

式中： z 表示探针尖端与样品表面之间的纵向距离； $\Omega = 60 \text{ kHz}$ 为探针的振动频率； $E_{nf,n}$ 表示 n 阶近场振幅； $E_{bac,n}$ 表示 n 阶背景振幅； n 为近场谐波数。 $E_{nf,n}$ 是近场作用，其与尖端-样品间距是非线性关系，并随着间距增大而急剧减小。而背景振幅是远场信息，其强度改变需要空间的变化达到波长量级，可近似地认为背景信号强度与针尖的位置是线性关系，因为针尖振幅远小于光波长。所以 $E_{nf,n}$ 的高阶项 ($n \geq 2$) 是非零的，而 $E_{bac,n}$ 的高阶项近似为零，因此可以从高阶谐波信号 ($n\Omega$) 中提取近场信息^[32]。结合与实验中相同的背景抑制方式，通过分析模拟结果，得到了探针三阶近场趋近曲线，该曲线不受背景散射

影响，如图 5 中圆点所示。在模拟结果和实验数据进行比较后，将近场振幅的衰减划分为两个阶段。在探针远离样品表面时，当位移小于 120 nm，模拟结果显示了更加陡峭的近场振幅梯度，这是由于仿真中加入了 h-BN 薄膜，其具有介电绝缘特性，导致金线的倏逝场衰减更快。而在探针-样品间距离位移超过 120 nm 之后，模拟和实验结果的近场幅值均变化开始变得平缓，这是由于太赫兹光源功率的限制所致。在探针远离样品表面一定距离后，部分近场信号被系统底噪淹没，使解调信号变得困难，因此实验结果显示近场振幅急剧下降。

为了验证探针与样品的间隙中电场梯度的陡峭变化对亚表面近场光学探测的影响，模拟了厚度为 50 nm 的 h-BN 薄膜在 3 种不同的探针调制振幅下的情况 (分别为 60 nm, 40 nm 和 20 nm)。通过模拟高阶信号的解调过程，得到了三阶近场幅值和 Au 与 SiO₂ 间近场对比度的变化，如图 6 所示。

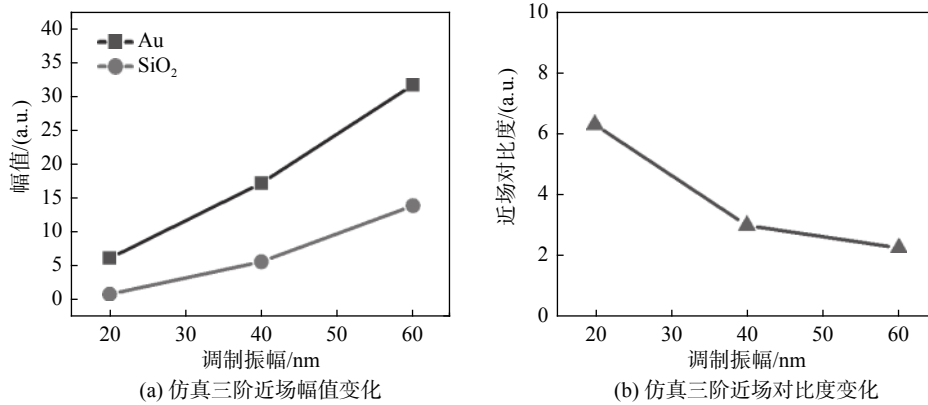


图 6 基于全波数值模拟得到的探针调制振幅对 Au 和 SiO₂ 近场幅值和对比度的影响
Fig. 6 Effect of probe modulation amplitude on the near-field amplitude and contrast of Au and SiO₂ based on full-wave numerical simulation

如图 6(a) 所示，随着探针调制振幅的增大，Au 和 SiO₂ 表面近场信号强度均有所增强。将探针幅值从 20 nm 增加至 60 nm，Au 样品上三阶近场信号幅值从 6.2 增加至 31.8，SiO₂ 样品上三阶近场信号幅值从 1 增加至 14。如图 6(b) 所示，在近场光学显微中，Au 和 SiO₂ 的对比度则从 6.2 降低至 2.2。这是因为当探针偶极子和样品中的镜像偶极子耦合时，探针和样品之间的间距较小，此时散射截面会急剧增大，通过调制

探针-样品间距，强烈的非线性行为会产生更高的谐波^[33]。由于 Au 在近场范围内比 SiO₂ 具有更强的反射能力，在不考虑背景散射信号的影响下，相较于 Au，更大的探针调制振幅会使 SiO₂ 产生更强烈的非线性行为。因此，在模拟中，较小的探针调制振幅反而会产生更好的对比效果。但是，由于背景散射的存在，过小的调制振幅会导致解调得到的近场信号幅值较弱，从而降低对比度。因此在实验中，不应选择过小的调

制振幅, 而应根据实际散射信号强弱来决定探针振幅的大小, 以得到最佳近场对比度和分辨率。

3 总结

本文介绍了通过自主搭建的 THz s-SNOM 系统对 h-BN/Au 结构样品进行太赫兹亚表面显微成像实验, 并验证了 THz s-SNOM 在亚表面显微成像方面的高信噪比。该系统可用于探测半导体微纳结构中的亚表面缺陷和材料。实验和模拟结果表明, 近场亚表面显微成像对样品表层厚度的变化具有很高的敏感性。研究还通过全波数值模拟研究了太赫兹近场亚表面显微过程, 发现系统在 AFM 的轻敲模式下, 探针振幅与成像对比度之间存在一定关系。本研究有助于推动近场亚表面显微在太赫兹领域的应用, 为光学亚表面显微成像的发展提供帮助。希望这项研究能够为近场光学显微的应用提供一些新的思路和方向。

参考文献:

- [1] CHEN X Z, HU D B, MESCALL R, et al. Modern scattering-type scanning near-field optical microscopy for advanced material research[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(36): 2205636.
- [2] CVITKOVIC A, OCELCIC N, HILLENBRAND R. Analytical model for quantitative prediction of material contrasts in scattering-type near-field optical microscopy[J]. *Optics Express*, 2007, 15(14): 8550 – 8565.
- [3] 刘道, 吴佩颖, 屈明翌, 等. 半导体载流子分布的太赫兹近场显微表征 [J]. *光学仪器*, 2020, 42(6): 28 – 34.
- [4] GIORDANO M C, MASTEL S, LIEWALD C, et al. Phase-resolved terahertz self-detection near-field microscopy[J]. *Optics Express*, 2018, 26(14): 18423 – 18435.
- [5] STINSON H T, STERNBACH A, NAJERA O, et al. Imaging the nanoscale phase separation in vanadium dioxide thin films at terahertz frequencies[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3604.
- [6] ZHANG J W, CHEN X Z, MILLS S, et al. Terahertz nanoimaging of graphene[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(7): 2645 – 2651.
- [7] DAI G B, GENG G S, ZHANG X X, et al. W-band near-field microscope[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 48060 – 48067.
- [8] KLARSKOV P, KIM H, COLVIN V L, et al. Nanoscale laser terahertz emission microscopy[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(11): 2676 – 2680.
- [9] AGHAMIRI N A, HUTH F, HUBER A J, et al. Hyperspectral time-domain terahertz nano-imaging[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24231 – 24242.
- [10] LIEWALD C, MASTEL S, HESLER J, et al. All-electronic terahertz nanoscopy[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 159 – 163.
- [11] ABBASIRAD N, BARREDA A, ARSLAN D, et al. Investigation of dipole emission near a dielectric metasurface using a dual-tip scanning near-field optical microscope[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(18): 4511 – 4522.
- [12] REN Z, BOYBAY M S, RAMAHI O M. Near-field subsurface detection using metamaterial inspired probes[J]. *Applied Physics A*, 2011, 103(3): 839 – 842.
- [13] WANG Z B, GUO W, LI L, et al. Optical virtual imaging at 50 nm lateral resolution with a white-light nanoscope[J]. *Nature Communications*, 2011, 2: 218.
- [14] NEIL M A A, JUŠKAITIS R, WILSON T. Method of obtaining optical sectioning by using structured light in a conventional microscope[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(24): 1905 – 1907.
- [15] GUSTAFSSON M G L. Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy[J]. *Journal of Microscopy*, 2000, 198(Pt 2): 82 – 87.
- [16] DAN D, YAO B L, LEI M. Structured illumination microscopy for super-resolution and optical sectioning[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(12): 1291 – 1307.
- [17] WICKER K, MANDULA O, BEST G, et al. Phase optimisation for structured illumination microscopy[J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 2032 – 2049.
- [18] ORIEUX F, SEPULVEDA E, LORIETTE V, et al. Bayesian estimation for optimized structured illumination microscopy[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(2): 601 – 614.
- [19] SHROFF S A, FIENUP J R, WILLIAMS D R. OTF compensation in structured illumination superresolution images[C]//Proceedings of SPIE 7094, Unconventional Imaging IV. San Diego: SPIE, 2008: 709402.
- [20] AYUK R, GIOVANNINI H, JOST A, et al. Structured illumination fluorescence microscopy with distorted

- excitations using a filtered blind-SIM algorithm[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4723 – 4726.
- [21] SCHAEFER L H, SCHUSTER D, SCHAFFER J. Structured illumination microscopy: artefact analysis and reduction utilizing a parameter optimization approach[J]. *Journal of Microscopy*, 2004, 216(Pt 2): 165 – 174.
- [22] CLAUSEN M P, SEZGIN E, DE LA SERNA J B, et al. A straightforward approach for gated STED-FCS to investigate lipid membrane dynamics[J]. *Methods*, 2015, 88: 67 – 75.
- [23] VICIDOMINI G, COTO HERNÁNDEZ I, D'AMORA M, et al. Gated CW-STED microscopy: a versatile tool for biological nanometer scale investigation[J]. *Methods*, 2014, 66(2): 124 – 130.
- [24] WANG Y F, KUANG C F, GU Z T, et al. Time-gated stimulated emission depletion nanoscopy[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 093107.
- [25] FUJITA K, KOBAYASHI M, KAWANO S, et al. High-resolution confocal microscopy by saturated excitation of fluorescence[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(22): 228105.
- [26] DOUHÉRET O, SWINNEN A, BRESELGE M, et al. High resolution electrical characterisation of organic photovoltaic blends[J]. *Microelectronic Engineering*, 2007, 84(3): 431 – 436.
- [27] FENWICK O, MAUTHOOR S, CACIALLI F. Mapping sub-surface structure of thin films in three dimensions with an optical near-field[J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2019, 2(6): 1900033.
- [28] TANTUSSI F, FUSO F, ALLEGRINI M, et al. Linear and circular dichroism in porphyrin J-aggregates probed by polarization modulated scanning near-field optical microscopy[J]. *Nanoscale*, 2014, 6(18): 10874 – 10878.
- [29] MASTEL S, LUNDEBERG M B, ALONSO-GONZÁLEZ P, et al. Terahertz nanofocusing with cantilevered terahertz-resonant antenna tips[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(11): 6526 – 6533.
- [30] GAY-BALMAZ P, MARTIN O J F. A library for computing the filtered and non-filtered 3D Green's tensor associated with infinite homogeneous space and surfaces[J]. *Computer Physics Communications*, 2002, 144(1): 111 – 120.
- [31] MAISSEN C, CHEN S, NIKULINA E, et al. Probes for ultrasensitive THz nanoscopy[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(5): 1279 – 1288.
- [32] 薛孟飞, 陈佳宁. 基于扫描探针技术的超分辨光学成像和谱学研究进展 [J]. *物理*, 2019, 48(10): 662 – 676.
- [33] KNOLL B, KEILMANN F. Enhanced dielectric contrast in scattering-type scanning near-field optical microscopy[J]. *Optics Communications*, 2000, 182(4/6): 321 – 328.

(编辑: 李晓莉)