

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

张倬铖 王月莹 张晓秋艳 张天宇 许星星 赵陶 宫玉彬 魏彦玉 胡旻

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

Zhang Zhuo-Cheng Wang Yue-Ying Zhang Xiao-Qiu-Yan Zhang Tian-Yu Xu Xing-Xing Zhao Tao  
Gong Yu-Bin Wei Yan-Yu Hu Min

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 248703 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20211715

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211715>

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

专题: 太赫兹生物物理

## 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\*

张倬铖<sup>1)2)</sup> 王月莹<sup>1)2)</sup> 张晓秋艳<sup>1)2)</sup> 张天宇<sup>1)2)</sup> 许星星<sup>1)2)</sup>  
赵陶<sup>1)2)</sup> 宫玉彬<sup>1)2)</sup> 魏彦玉<sup>1)2)</sup> 胡旻<sup>1)2)†</sup>

1) (电子科技大学电子科学与工程学院, 太赫兹科学技术研究中心, 成都 610054)

2) (太赫兹技术教育部重点实验室, 成都 610054)

(2021年9月14日收到; 2021年10月15日收到修改稿)

太赫兹散射式扫描近场光学显微镜 (scattering-type scanning near-field optical microscopy, s-SNOM) 在生物纳米成像、太赫兹纳米光谱学、纳米材料成像以及极化激元的研究中有着广泛的应用前景. 原子力显微镜探针作为太赫兹 s-SNOM 的重要组成部分, 起着近场激发、探测、增强等关键作用. 但是在测量过程中, 探针与样品的相互作用会影响测量结果. 本文通过仿真和实验, 分别揭示了太赫兹 s-SNOM 中探针与样品相互作用对近场激发、近场探测以及太赫兹近场频谱的影响. 首先, 研究了探针激发的近场的波矢权重分布, 发现波矢主要集中在  $10^5 \text{ cm}^{-1}$  量级, 与一般的太赫兹激元的波矢相差 2—3 个数量级, 这表明太赫兹近场很难激发太赫兹激元. 其次, 通过理论和实验研究, 发现金属针尖会干扰石墨烯圆盘结构的表面近场, 这表明太赫兹近场系统在探测结构的近场分布具有局限性; 最后研究了探针对近场频谱的影响, 发现探针长度和悬臂长度是影响近场频谱的重要参数, 可以通过增大探针长度或者悬臂长度的方法来减小探针对近场频谱的影响.

关键词: 探针-样品相互作用, 太赫兹近场光谱

PACS: 87.50.U-, 68.37.Uv

DOI: 10.7498/aps.70.20211715

## 1 引言

太赫兹散射式扫描近场光学显微镜 (scattering-type scanning near-field optical microscopy, s-SNOM) 是一种新兴的纳米分辨的成像设备, 能突破传统光学的衍射极限, 在太赫兹纳米光学成像、太赫兹纳米光谱学具有重要的应用<sup>[1–5]</sup>. 太赫兹 s-SNOM 原理如图 1 所示, 太赫兹波聚焦到原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 探针, 探针以频率  $\Omega$  振动的轻敲模式工作, 探针周期振动可以对太赫兹波进行调制. 接收到调制的太赫兹波

后, 进行高阶谐波解调, 可以有效去除背景信号和噪声, 得到近场信号. 采用 AFM 探针逐点扫描, 可得到样品各点的近场信号, 实现近场纳米成像.

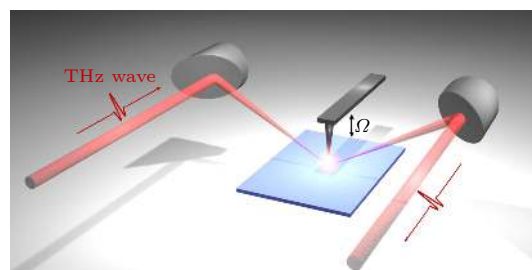


图 1 太赫兹 s-SNOM 示意图

Fig. 1. Schematic diagram of SNOM.

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0701000, 2020YFA0714001)、国家自然科学基金 (批准号: 61988102, 61921002, 62071108) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: ZYGX2020J003, ZYGX2020ZB007) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hu\_m@uestc.edu.cn

s-SNOM 的成像分辨率只跟探针的尖端尺寸相关, 与入射波的波长无关. 这使得 s-SNOM 能够突破传统光学成像的衍射极限, 获得与 AFM 媲美的纳米级分辨. 探针在近场成像中起着关键的激发、探测和增强作用, 主要由 4 种物理效应共同实现 [6]: 1) 偶极子效应, 是一种探针和样品之间的等离激元耦合效应; 2) 天线谐振效应, 光学天线的尺寸与入射波长相关而导致的谐振效应, 主要影响因素是入射波长和探针尺寸; 3) 等离子增强效应, 在入射场作用下, 自由电子在金属纳米结构附近形成强烈局域和增强的电磁场; 4) 避雷针效应, 是由物体外形突出结构或者尖端的奇异点引起局域表面电荷密度高度聚集而产生. 这些效应带来的探针与样品之间的相互作用, 不可避免地影响太赫兹 s-SNOM 测量的最终结果 [7–10]. 下文主要从近场激发、近场探测以及太赫兹近场频谱这三方面研究探针与样品之间的相互作用及其影响.

## 2 探针与样品相互作用及其影响

### 2.1 探针对近场激发的影响

探针是激发近场的一种重要方式, 起到波矢补偿的作用 [11]. 太赫兹波照射在探针上, 通过探针耦合激发成为近场, 把波矢较小的远场耦合成为波矢较大的近场. 但是, 探针对波矢范围的调节是有限的, 本文从理论上给出近场的波矢范围, 分析近场关于波矢的耦合权重分布 [12]. 为了方便研究, 把探针等效为点偶极子模型. 探针由以下参数表述: 探针半径  $a$ 、探针与有效偶极子之间的距离  $b$  (实验中大致满足  $b = 0.7a$ ), 探针在近场中的抖动频率为  $\Omega$ , 振幅  $\Delta z$ , 因此, 探针与样品之间的距离可表示为:  $z = b + \Delta z(1 - \cos \Omega t)$ . 可以得到近场耦合权重:

$$\alpha \propto \langle q^2 e^{-2qz} \rangle_t, \quad (1)$$

其中,  $\langle q^2 e^{-2qz} \rangle_t$  表示  $q^2 e^{-2qz}$  的时间平均值. 根据 (1) 式, 给出探针半径从 50—200 nm 的近场耦合权重. 如图 2(a) 所示, 近场耦合权重关于波矢非均匀分布, 主要集中在  $10^5 \text{ cm}^{-1}$  数量级. 通过图 2(a) 得出, 探针调节波矢的范围主要跟探针的半径有关. 而不管是红外 s-SNOM 还是太赫兹 s-SNOM, 采用 AFM 探针测得的半径差别通常并不大 (约为几十纳米到百纳米), 因此通过探针耦合得到的近场波矢都在  $10^5 \text{ cm}^{-1}$  量级. 比如, 1 THz 对应真空中的波矢大约在  $33.3 \text{ cm}^{-1}$ , 通过探针耦合成为近场之后波矢将增大 3 个数量级. 这意味着, 太赫兹 s-SNOM 对入射波具有较大的局域作用. 但是, 实际中太赫兹激元波矢很难达到  $10^5 \text{ cm}^{-1}$  数量级.

以石墨烯为例, 图 2(b) 是石墨烯表面等离激元 (surface plasmon polaritons, SPP) 色散图和半径 100 nm 探针的近场耦合权重 (白色虚线), line 1 是光速线, line 2 是石墨烯 SPP 色散曲线. 石墨烯弛豫时间设置为 0.1 ps, 化学势设置为 0.5 eV. 可以看出, 在小于 5 THz 波段, 石墨烯 SPP 的波矢小于  $10^4 \text{ cm}^{-1}$ , 这时对应的近场耦合权重很小, 所以很难通过太赫兹 s-SNOM 去激发太赫兹波段的石墨烯 SPP. 除了石墨烯, 其他太赫兹激元材料也面临着同样的问题, 这就限制了太赫兹 s-SNOM 在激元研究中的应用. 相比于太赫兹波段, 红外波段激元的波矢更大, 更适合利用 s-SNOM 去激发, 相关红外激元材料的近场研究也更为广泛 [13–19]. 为解决太赫兹波段存在的这个问题, 需要极大地提高太赫兹激元的波矢, 而声学模式的石墨烯 SPP 正好满足该要求. Alonso-González 等 [1] 利用太赫兹 s-SNOM 实现了太赫兹激元的实空间成像, 观测到了声学模式的石墨烯 SPP 的干涉条纹.

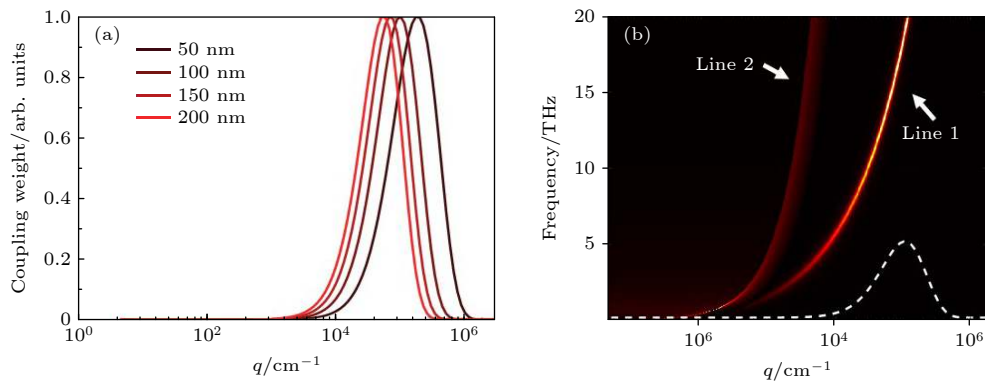


图 2 (a) 近场耦合权重; (b) 石墨烯色散曲线

Fig. 2. (a) Near-field coupling weight; (b) graphene dispersion curves.

## 2.2 探针对近场探测的影响

在太赫兹频段下,一般采用长金属探针提高 s-SNOM 的信噪比. 但当使用太赫兹 s-SNOM 去探测结构(比如太赫兹超表面)的近场分布时,金属探针会干扰样品本身的表面近场分布<sup>[20,21]</sup>. 为了研究这一现象,设计了石墨烯圆盘结构,利用团队自主搭建的 0.1 THz 的 s-SNOM 进行近场测试. 石墨烯在太赫兹近场中的反射率很高<sup>[22]</sup>,因此石墨烯圆盘结构的谐振特性和金属圆盘结构类似,而且石墨烯只有原子层级厚度,可以避免近场边缘效应<sup>[7]</sup>. 通过对比仿真和实验得到的石墨烯圆盘的近场分布,发现探针会对结构的近场分布形成干扰. 首先,采用时域有限差分法的全波仿真软件 CST,仿真得到石墨烯圆盘结构表面的电场分布. 仿真模型如图 3(a) 所示, P 偏振的太赫兹波以 30°(与水平面夹角)斜入射至直径为 10 μm 的石墨烯圆盘上,入射波频率为 0.1 THz,基底介电常数为 2,石墨烯的弛豫时间设置为 0.1 ps,化学势设置为 0.5 eV. 得到石墨烯圆盘的  $|E_z|$  电场分布图,如图 3(b) 所示. 可以看出,石墨烯圆盘结构具有类似天线的谐振,电场分布为边缘增强. 由于在太赫兹 s-SNOM 中,主要起作用的是  $E_z$  电场(方向为探针轴向或者说面外方向),因此在仿真中只考虑面外方向的  $E_z$  电场<sup>[21-24]</sup>. 由于模拟中太赫兹波为斜入射,因

此场分布左右是非对称的,左边稍强. 同样,入射波频率为 1 THz 时,石墨烯圆盘的  $|E_z|$  电场分布如图 3(c) 所示,与 0.1 THz 的电场分布基本一致.

根据仿真结果,制备了石墨烯圆盘结构. 加工步骤如下:将 CVD 生长的石墨烯通过湿法转移到带有 300 nm 氧化层的高阻硅基底,然后通过依次光刻和反应离子刻蚀得到石墨烯圆盘结构. 利用团队自主搭建的 0.1 THz 的 s-SNOM 对样品进行测试,得到了石墨烯圆盘结构的形貌图和一阶、二阶、三阶成像,如图 4 所示. 石墨烯圆盘的直径大约为 10 μm, AFM 形貌图与近场成像符合得很好. 而且相比于基底,石墨烯具有更高的近场强度,可以明显区分基底和石墨烯. 石墨烯材料在太赫兹近场中具有很高的反射率,这也与文献<sup>[22]</sup>报道的结果一致. 但石墨烯圆盘结构的近场成像比较均匀,没有观测到图 3 所示的天线谐振效应和非对称的场分布. 分析认为,未探测到圆盘结构谐振效应主要是由于金属探针与样品相互作用的干扰. 在太赫兹近场的测量中,由于探针与样品相互作用掩盖了样品本身的谐振效应,测量的结果实质上是探针与样品的相互作用. 尽管如此,近场成像依然能分辨基底和石墨烯材料的区别,这是因为探针-基底的相互作用和探针-石墨烯的相互作用相比差别很大. 因此,太赫兹近场通常能对不同介电常数的材料实现纳米分辨<sup>[25]</sup>,但是对于结构谐振的测量却表现得比较乏力.

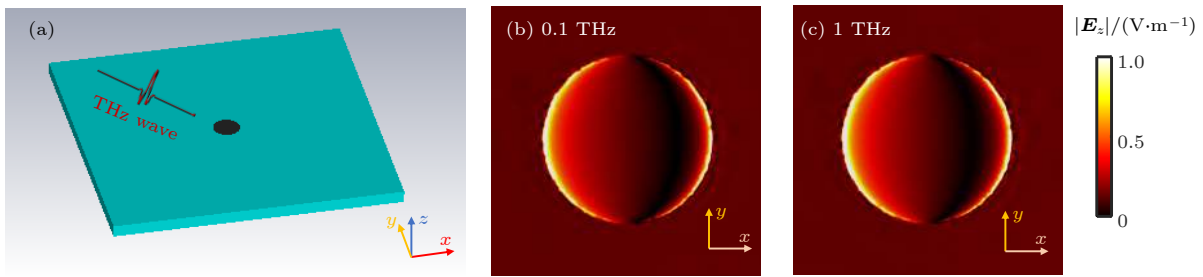


图 3 (a) 石墨烯圆盘结构的仿真模型示意图; (b), (c) 在 0.1 和 1 THz 石墨烯圆盘结构表面的  $|E_z|$  分布图

Fig. 3. (a) Schematic diagram of simulation of graphene disk; (b), (c) electric field  $|E_z|$  contour of graphene disk at 0.1 and 1 THz.

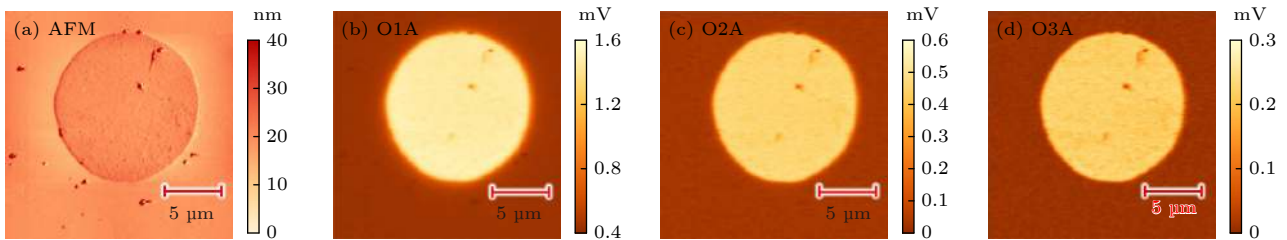


图 4 石墨烯圆盘结构的太赫兹近场成像 (a) 石墨烯圆盘的 AFM 形貌图; (b)–(d) 石墨烯圆盘的太赫兹近场一阶、二阶、三阶成像

Fig. 4. THz near-field imaging of graphene disk: (a) AFM topography of graphene disk; (b)–(d) THz near-field imaging of graphene disk with 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup> harmonics.

### 2.3 探针对太赫兹近场频谱的影响

太赫兹 s-SNOM 除了可以实现纳米分辨的近场成像外, 还可进行太赫兹纳米光谱分析, 这也是太赫兹 s-SNOM 的重要研究方向. 太赫兹纳米光谱技术一般采用太赫兹时域光谱系统 (time-domain spectroscopy, TDS) 作为宽谱光源, 结合 AFM 组成 TDS s-SNOM. 前文提到, 为提高太赫兹 s-SNOM 的信噪比, 在实际应用中一般选用较长的金属探针. 虽然长探针的天线谐振效应可以增强近场信号, 但探针本身强烈的谐振效应会影响样品的纳米光谱 [26–29], 采用 CST 软件研究探针对近场频谱的影响. 首先, 仿真了 80—2000  $\mu\text{m}$  不同长度探针的谐振谱. 如图 5(c) 所示, 一束 s 偏振的太赫兹皮秒脉冲以平面波方式入射, 与水平面成  $30^\circ$  夹角. 为与实验结果统一比较, 将实验测得的太赫兹远场信号, 导入 CST 软件中, 作为入射信号, 即为图 6(d) 中的 ref 信号. 为了缩短仿真时间, 探针尖端半径选用 200 nm, 虽然比实际情况稍大, 但是对仿真结果影响较小. 在探针尖端下方 200 nm 设置观测点, 得到不同长度探针的时域谱, 如图 5(a) 所示. 对时域信号做快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT), 得到不同长度探针的频域谱, 如图 5(b) 所示. 通过分析时域谱, 可以直观理解探针的谐振过程. 从图 5(a) 中 1000  $\mu\text{m}$  探针的时域谱可以明显看出, 时域谱由多次的信号组成, 各次信号又由两个脉冲信号叠加. 太赫兹脉冲照射在探针上, 可以分别在探针的顶端和底端激发近场, 然后

分别沿着探针以 Sommerfeld 波形式接近光速来回传播, 这就形成了两个脉冲信号叠加的多次信号. 探针顶端先激发, 形成第 1 个脉冲信号; 底端后激发, 形成第 2 个脉冲信号. 两个激发点的时延差为:  $t_1 = L(1 - \sin \theta)/c$ , 其中  $L$  为探针长度,  $\theta$  为入射角,  $c$  为真空中光速. 因此随着  $L$  的增大,  $t_1$  增大, 两个脉冲信号逐渐分开. 两个脉冲信号叠加的信号沿着探针表面来回传播, 形成了多次信号, 相隔的时延差为  $t_2 = 2L/c$ , 因此随着  $L$  的增大,  $t_2$  也增大, 各次信号逐渐分开. 从图 5(b) 可以看到, 不同长度探针的频谱差别很大, 这对分析近场频谱带来极大的干扰, 而且很难用数值方法消除探针的影响. 为了避免探针对近场频谱的干扰, Moon 等 [30,31] 加工了大于 4 mm 的长探针用以太赫兹纳米光谱的研究, 这样各次信号及其脉冲信号在时域谱上可以很容易分开, 就可以单独截取一个脉冲信号进行 FFT, 得到的近场频谱受到探针的影响较小.

另外值得注意的是, 虽然图 5 中仿真了多种长度探针的近场光谱, 但是与实验中使用的 80  $\mu\text{m}$  探针的近场光谱仍然差别很大. 因为实际使用的探针带有金属悬臂, 而探针的悬臂同样会影响探针频谱 [9,32]. 分别对不同悬臂长度探针的谐振频谱进行仿真, 仿真模型如图 6(c), 在图 5(c) 仿真模型基础上增加了悬臂, 悬臂长度为 100—500  $\mu\text{m}$ , 探针长度为 80  $\mu\text{m}$ . 仿真得到不同悬臂长度探针的时域谱和频域谱, 如图 6(a) 和图 6(b) 所示, 可以看出, 悬臂会影响探针的谐振. 当悬臂长度为 200  $\mu\text{m}$  时,

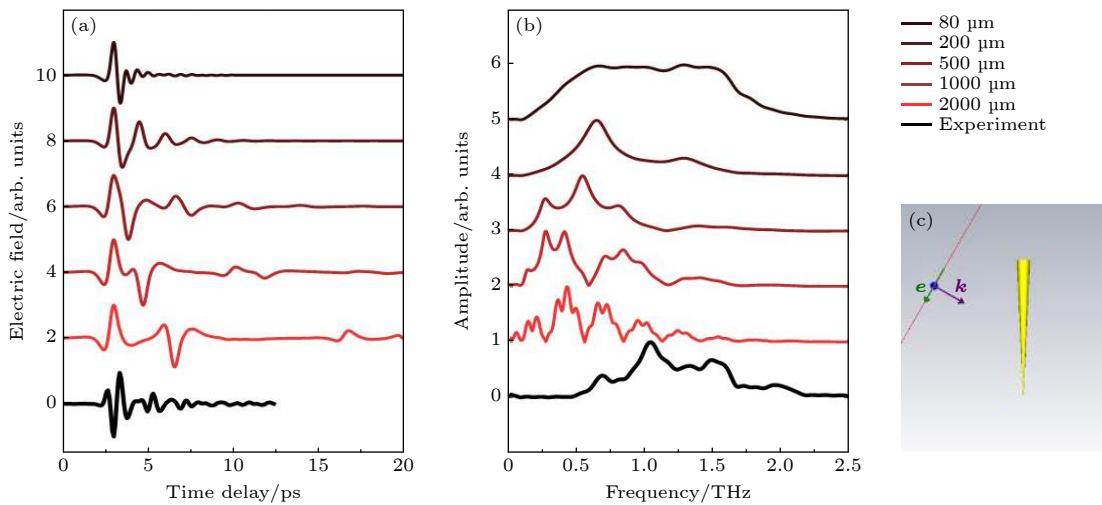


图 5 不同长度探针的仿真结果 (a) 时域谱; (b) 频域谱; (c) 仿真模型

Fig. 5. Simulation results of tips of different length: (a) Time domain signal; (b) frequency domain signal; (c) schematic diagram of simulation.

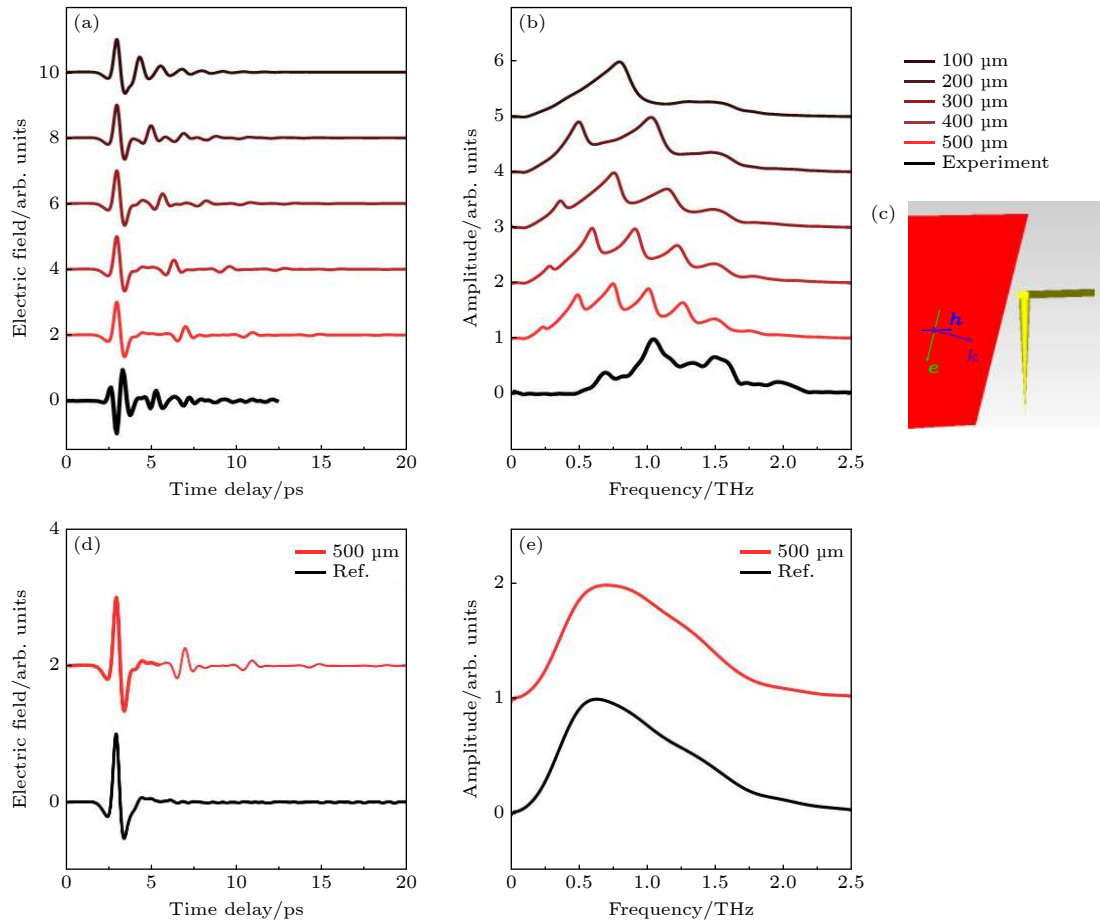


图6 不同长度悬臂的探针的仿真结果 (a) 时域谱; (b) 频域谱; (c) 仿真模型; (d) 长悬臂探针的时域谱; (e) 长悬臂探针的频域谱  
 Fig. 6. Simulation results of tips of different cantilever length: (a) Time domain signal; (b) frequency domain signal; (c) schematic diagram of simulation; (d) time domain signal of long cantilever tip; (e) frequency domain signal of long cantilever tip.

实验和仿真结果比较接近. 分析时域谱图 6(a) 分析得出, 在仿真模型中加入悬臂后仍然有多次信号, 但是各次信号只有 1 个脉冲信号. 通过增大悬臂长度, 可以将各次信号从时域上分开. 单独截取 500 μm 悬臂的 1 个脉冲信号进行 FFT, 如图 6(d) 和图 6(e) 所示, 得到的近场频谱和入射波频谱比较接近, 可以很好地去除探针对近场频谱的影响.

### 3 总结

本文分别从近场激发、近场探测和太赫兹近场光谱这三个方面, 对太赫兹 s-SNOM 中探针与样品相互作用及其影响进行了系统性的研究, 这对太赫兹近场光学研究具有指导意义. 在近场激发方面, 太赫兹 s-SNOM 激发的近场波矢在  $10^5 \text{ cm}^{-1}$  量级, 与一般太赫兹激元的波矢相差较大. 如果要利用探针激发太赫兹激元, 可以设计结构或者其他方法来增大太赫兹激元的波矢 (比如石墨烯声学等离子激

元<sup>[1]</sup>), 也可以适当增大探针的尖端半径来减小探针激发的波矢 (会牺牲一定的分辨率), 最终使得探针激发的波矢和太赫兹激元的波矢实现匹配. 在近场探测方面, 通过理论和实验研究, 发现金属探针会干扰石墨烯圆盘结构的表面近场, 这表明太赫兹 s-SNOM 在探测结构的近场分布具有局限性. 在实际应用中, 太赫兹近场能分辨不同介电常数样品, 这也是太赫兹近场十分重要的应用场景. 在太赫兹近场频谱方面, 由于探针对近场频谱的干扰, 这在很大程度上限制了太赫兹纳米光谱学的发展; 可以通过使用较长的音叉式探针 (文献 [31] 中探针长度大于 4 mm), 或者使用长悬臂探针 (500 μm 以上), 从时域上分离近场的各次反射信号来减小探针对近场频谱的干扰.

### 参考文献

[1] Alonso-Gonzalez P, Nikitin A Y, Gao Y, Woessner A, Lundeberg M B, Principi A, Forcellini N, Yan W, Velez S,

- Huber A J, Watanabe K, Taniguchi T, Casanova F, Hueso L E, Polini M, Hone J, Koppens F H L, Hillenbrand R 2017 *Nat. Nanotechnol.* **12** 31
- [2] Soltani A, Kuschewski F, Bonmann M, Generalov A, Vorobiev A, Ludwig F, Wiecha M M, Cibiraite D, Walla F, Winnerl S, Kehr S C, Eng L M, Stake J, Roskos H G 2020 *Light Sci. Appl.* **9** 97
- [3] Stinson H T, Sternbach A, Najera O, Jing R, McLeod A S, Slusar T V, Mueller A, Anderegg L, Kim H T, Rozenberg M, Basov D N 2018 *Nat. Commun.* **9** 1
- [4] Yang Z, Tang D, Hu J, Tang M, Zhang M, Cui H L, Wang L, Chang C, Fan C, Li J, Wang H 2020 *Small* **17** 2005814
- [5] Shigekawa H, Yoshida S, Takeuchi O 2014 *Nat. Photonics* **8** 815
- [6] McLeod A S, Kelly P, Goldflam M D, Gainsforth Z, Westphal A J, Dominguez G, Thiemens M H, Fogler M M, Basov D N 2014 *Phys. Rev. B* **90** 085136
- [7] Babicheva V E, Gamage S, Stockman M I, Abate Y 2017 *Opt. Express* **25** 23935
- [8] Chen X, Liu X, Guo X, Chen S, Hu H, Nikulina E, Ye X, Yao Z, Bechtel H A, Martin M C, Carr G L, Dai Q, Zhuang S, Hu Q, Zhu Y, Hillenbrand R, Liu M, You G 2020 *ACS Photonics* **7** 687
- [9] Mooshammer F, Plankl M, Siday T, Zizlsperger M, Sandner F, Vitalone R, Jing R, Huber M A, Basov D N, Huber R 2021 *Opt. Lett.* **46** 3572
- [10] Zhang Z, Hu M, Zhang X, Wang Y, Zhang T, Xu X, Zhao T, Wu Z, Zhong R, Liu D, Wei Y, Gong Y, Liu S 2021 *Appl. Phys. Express* **14** 102004
- [11] Zayats A V, Smolyaninov, I I 2003 *J. Opt. A-Pure and Appl. Op.* **5** S16
- [12] Fei Z, Andreev G O, Bao W, Zhang L M, McLeod A S, Wang C, Stewart M K, Zhao Z, Dominguez G, Thiemens M, Fogler M M, Tauber M J, Castro-Neto A H, Lau C N, Keilmann F, Basov D N 2011 *Nano Lett.* **11** 4701
- [13] Fei Z, Rodin A S, Andreev G O, Bao W, McLeod A S, Wagner M, Zhang L M, Zhao Z, Thiemens M, Dominguez G, Fogler M M, Castro Neto A H, Lau C N, Keilmann F, Basov D N 2012 *Nature* **487** 82
- [14] Fei Z, Goldflam M D, Wu J S, Dai S, Wagner M, McLeod A S, Liu M K, Post K W, Zhu S, Janssen G C A M, Fogler M M, Basov D N 2015 *Nano Lett.* **15** 8271
- [15] Luo W, Cai W, Xiang Y, Wu W, Shi B, Jiang X, Zhang N, Ren M, Zhang X, Xu J 2017 *Adv. Mater.* **29** 1701083
- [16] Duan J, Capote-Robayna N, Taboada-Gutierrez J, Alvarez-Perez G, Prieto I, Martin-Sanchez J, Nikitin A Y, Alonso-Gonzalez P 2020 *Nano Lett.* **20** 5323
- [17] Zhang Y, Hu C, Lyu B, Li H, Ying Z, Wang L, Deng A, Luo X, Gao Q, Chen J, Du J, Shen P, Watanabe K, Taniguchi T, Kang J H, Wang F, Zhang Y, Shi Z 2020 *Nano Lett.* **20** 2770
- [18] Venuthurumilli P K, Wen X L, Iyer V, Chen Y P, Xu X F 2019 *ACS Photonics* **6** 2492
- [19] Gerber J A, Berweger S, O'Callahan B T, Raschke M B 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 055502
- [20] Carney P S, Deutsch B, Govyadinov A A, Hillenbrand R 2012 *ACS Nano* **6** 8
- [21] Duan J H, Chen J N 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 110701 (in Chinese) [段嘉华, 陈佳宁 2019 *物理学报* **68** 110701]
- [22] Zhang J, Chen X, Mills S, Ciavatti T, Yao Z, Mescall R, Hu H, Semenenko V, Fei Z, Li H, Perebeinos V, Tao H, Dai Q, Du X, Liu M 2018 *ACS Photonics* **5** 2645
- [23] Ahn J S, Kihm H W, Kihm J E, Kim D S, Lee K G 2009 *Opt. Express* **17** 2280
- [24] Neuman T, Alonso-González P, Garcia-Etxarri A, Schnell M, Hillenbrand R, Aizpurua J 2015 *Laser Photonics Rev.* **9** 637
- [25] Cvitkovic A, Ocelic N, Hillenbrand R 2007 *Opt. Express* **15** 8550
- [26] Maissen C, Chen S, Nikulina E, Govyadinov A, Hillenbrand R 2019 *ACS Photonics* **6** 1279
- [27] Siday T, Hale L L, Hermans R I, Mitrofanov O 2020 *ACS Photonics* **7** 596
- [28] Mastel S, Lundeberg M B, Alonso-Gonzalez P, Gao Y, Watanabe K, Taniguchi T, Hone J, Koppens F H L, Nikitin A Y, Hillenbrand R 2017 *Nano Lett.* **17** 6526
- [29] Siday T, Natrella M, Wu J, Liu H, Mitrofanov O 2017 *Opt. Express* **25** 27874
- [30] Moon K, Park H, Kim J, Do Y, Lee S, Lee G, Kang H, Han H 2015 *Nano Lett.* **15** 549
- [31] Moon K, Do Y, Park H, Kim J, Kang H, Lee G, Lim J H, Kim J W, Han H 2019 *Sci. Rep.* **9** 169158
- [32] Wang Y Y, Hu M, Zhang Z C, Zhang T Y, Gong S, Wang W, Liu S G 2019 *44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* Maison de la Chimie, France, September 1–6, 2019 pp1,2

SPECIAL TOPIC—Terahertz biophysics

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

Zhang Zhuo-Cheng<sup>1)2)</sup> Wang Yue-Ying<sup>1)2)</sup> Zhang Xiao-Qiu-Yan<sup>1)2)</sup>  
 Zhang Tian-Yu<sup>1)2)</sup> Xu Xing-Xing<sup>1)2)</sup> Zhao Tao<sup>1)2)</sup>  
 Gong Yu-Bin<sup>1)2)</sup> Wei Yan-Yu<sup>1)2)</sup> Hu Min<sup>1)2)†</sup>

1) (*Terahertz Science and Technology Research Center, School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

2) (*Key Laboratory of Terahertz Technology, Ministry of Education, Chengdu 610054, China*)

( Received 14 September 2021; revised manuscript received 15 October 2021 )

**Abstract**

Terahertz scattering scanning near-field optical microscopy (s-SNOM), as an important means to break through the limits of conventional optical diffraction, can achieve super-resolution imaging on a nanoscale and has a wide range of applications in biological nano-imaging, terahertz nano-spectroscopy, nanomaterials imaging, and the study of polarized excitations. As an important component of the terahertz s-SNOM, the atomic force microscope tip plays a key role in implementing the near-field excitation, detection, and enhancement. However, the tip-sample interaction can greatly affect the results. In this paper, the effects of tip-sample interaction on near-field excitation, near-field detection, and terahertz near-field spectrum in terahertz s-SNOM are revealed through simulations and experiments. First, the wave vector coupling weight of the near field excited by the tip is investigated, and it is found that the wave vector is concentrated mainly on the order of  $10^5 \text{ cm}^{-1}$ , which differs from that of the general terahertz excitations by 2 to 3 orders of magnitude, indicating that the terahertz near field is difficult to excite terahertz excitations. Secondly, through theoretical and experimental studies, it is found that the metal tip interferes with the surface near-field of the graphene disk structure, which indicates the limitations of the terahertz s-SNOM in probing the near-field distribution of the structure. Finally, the influence of the tip on the near-field spectrum is studied. It is found that the tip length and cantilever length are important parameters affecting the near-field spectrum, and the influence of the tip on the near-field spectrum can be reduced by increasing the tip length or cantilever length.

**Keywords:** tip-sample interactions, terahertz near-field spectrum

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

**DOI:** 10.7498/aps.70.20211715

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2017YFA0701000, 2020YFA0714001), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61988102, 61921002, 62071108), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant Nos. ZYGX2020J003, ZYGX2020ZB007).

† Corresponding author. E-mail: [hu\\_m@uestc.edu.cn](mailto:hu_m@uestc.edu.cn)