

文章编号: 1005-5630(2022)05-0061-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.005.008

太赫兹光致力近场显微成像技术及应用研究

冯邱锴, 刘 逍, 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: 设计并搭建了太赫兹光致力显微成像系统 (THz PiFM), 首次在太赫兹波段实现了近场光力纳米显微成像测量。该系统基于原子力显微镜, 利用探针对所受力的灵敏检测能力, 通过探测探针与样品之间近场偶极相互作用产生的光场梯度力, 实现无探测器的太赫兹近场显微成像。利用该系统, 对可见光激发下的单层 MoS_2 晶粒进行了近场纳米显微成像表征, 并分析了晶粒边缘近场光力信号增强的机制。研究表明, THz PiFM 对二维材料中的载流子具有高灵敏的探测能力。与传统的太赫兹近场显微成像技术相比, THz PiFM 无需太赫兹探测器, 而且可获得更加优越的空间分辨率和成像信噪比, 是一种低成本、高性能的新型太赫兹近场显微成像技术。

关键词: 光致力显微镜; MoS_2 ; 太赫兹近场成像; 载流子分布

中图分类号: O 433 **文献标志码:** A

Terahertz photoinduced force near-field microscopy and application

FENG Qiukai, LIU Xiao, YOU Guanjun

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

Abstract: In this paper, terahertz photoinduced force microscopy (THz PiFM) is designed and built, which realizes the near-field photoinduced force nanoscopic imaging measurement in the terahertz band for the first time. Based on the atomic force microscopy, the system uses the sensitive detection ability of the probe to the force, and realizes the terahertz near-field microscopic imaging without detector. The system detected the light field gradient force generated by the near-field dipole interaction between the probe and the sample. The near-field nanoscopic imaging characterization of monolayer MoS_2 grains excited by visible light was carried out, and the mechanism of near-field optical signal enhancement at the grain edge was analyzed. The results show that THz PiFM has a highly sensitive detection capability for carriers in two-dimensional materials. Compared with the traditional terahertz near-field microscopy imaging technology, THz

收稿日期: 2022-03-18

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

作者简介: 冯邱锴 (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: 875868877@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: youguanjun@126.com

PiFM does not require terahertz detector, and is a new low-cost, high-performance terahertz near-field microscopy imaging technology, and can achieve superior spatial resolution and imaging signal-to-noise ratio.

Keywords: photoinduced force microscopy; MoS₂; terahertz near-field imaging; carrier distribution

引 言

随着太赫兹科学与技术的飞速发展, 太赫兹显微测量技术被广泛应用于微纳器件和新材料的研究^[1], 例如, 可以利用太赫兹波探测二维材料薄层结构和载流子分布信息。但由于太赫兹波长较长, 传统太赫兹显微成像技术的空间分辨率被限制在微米量级。通过将光谱技术与原子力显微镜(atomic force microscopy, AFM)结合, 可以检测表征材料的物理和化学性质, 同时使成像分辨率提升到纳米量级, 如尖端增强拉曼散射^[2-4]、红外散射式扫描近场光学显微镜^[5-7]及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)^[8]。THz s-SNOM利用纳米探针把样品表面的近场倏逝波转化为可传播的散射波, 然后使用太赫兹探测器在远场检测散射信号。由于探针的近场散射效率较低, 近场散射信号非常微弱, 需使用高灵敏的太赫兹探测器检测近场信号, 噪声等效功率一般需达到 pW/Hz^{1/2}量级, 而且需具有大动态范围和亚微秒的响应时间, 因此 THz s-SNOM对探测器有较苛刻的要求, 这是进一步提升其性能的一大困难。另一方面, 由于 THz s-SNOM探针和样品的远场散射产生了较多的背景信号, 从背景中分离出实际的近场信息具有很大的挑战性, 通常需要复杂的背景抑制方法, 如伪外差技术或高阶解调技术, 这往往会导致信号退化。除了上述直接检测光学信号的显微成像技术, 通过探测入射光场和样品相互作用产生的间接信号(如光电流、光力、热致膨胀等)也能获得超分辨的显微成像。其中, 光致力显微镜(photoinduced force microscopy, PiFM)利用原子力探针检测探针与样品之间近场相互作用产生的光力, 可以实现无探测器的近场显微成像。近年来, 研究人员已成功研发了可见光和红外波段

的 PiFM 系统^[9-16], 可以在纳米尺度探测样品表面结构^[12]和近场分布^[9,13], 但截至目前还没有太赫兹波段 PiFM 的相关报道。

本文在前期自主成功研发 THz s-SNOM 技术和系统的基础上^[17-19], 进行了无探测器、非散射式的新型太赫兹近场显微成像技术研究。报道了所开展的太赫兹波段 PiFM 技术研发工作, 及其应用于二维材料载流子显微检测表征的相关研究。以太赫兹倍频源、太赫兹量子级联激光器等为辐射源, 在太赫兹波段首次实现了近场光致力显微成像。该显微技术直接检测探针尖端和样品之间的近场作用力, 所以无需太赫兹探测器来探测散射光, 因此这种近场检测方法几乎没有远场背景的干扰, 最终实现了低背景噪声的高分辨率成像, 空间分辨率优于 20 nm。

1 光致力显微镜(PiFM)原理

光致力显微镜探测的是光场诱导的探针尖端与待测样品之间的作用力, 包括光场梯度力和散射力^[10], 以及样品表面的非光学色散力^[20], 这些力主要与探针和样品之间的偶极-偶极相互作用相关。将探针尖端和样品粒子视为两个可极化的球体, 其有效偶极矩分别为 μ_i 和 μ_p , 它们之间的相互作用如图 1 所示。

探针尖端和样品粒子之间时间平均的光诱导力^[21-22]可简化为:

$$\langle F \rangle \propto \sum_i \operatorname{Re}\{P_i^*(r) \nabla E_i(r)\} \quad (1)$$

式中: $i = x, y, z$ 为偏振(极化)方向; r 为两个偶极子之间的距离; $P_i^*(r)$ 为探针尖端的光极化导致的偶极矩; $E_i(r)$ 为针尖周围的光电场强度; 合力 F 主要由针尖的光致极化力与样品粒子周围的光电场梯度力组成, 可以分别用散射力 F_{sc} 和梯度力 F_g 表示, 散射力 F_{sc} 由光场的不均匀性产生, 与探针和样品间距离无关, 梯度力

F_g 由光场与可极化物体之间的动量传递产生, 与探针和样品间距离有关^[23-24]。时间平均光诱导力也可以写为:

$$F = F_g + F_{sc} \quad (2)$$

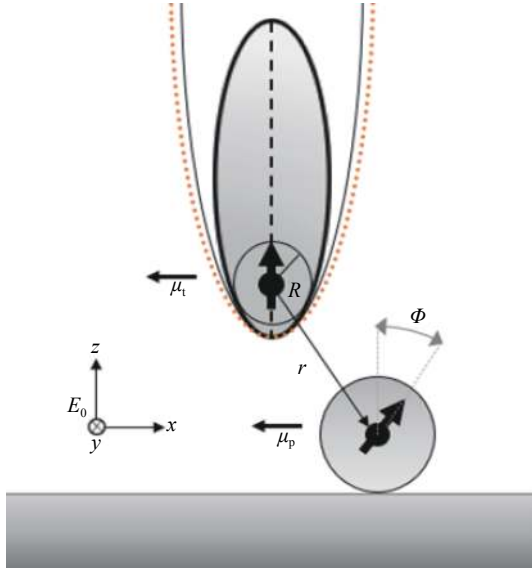


图 1 偶极子模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dipole model

考虑探针针尖和样品之间距离较小, 假设针尖与样品交界处电场的空间相位不变, 可得到散射力 F_{sc} 和梯度力 F_g 的简化表达式^[21]:

$$F_{sc} \propto \alpha_t'' |E_x|^2 \quad (3)$$

$$F_g \propto \frac{1}{Z^4} \alpha_s' \alpha_t' |E_z|^2 \quad (4)$$

式中: Z 为探针与样品间距离; α_s' 和 α_t' 分别为样品及探针的极化率的实部; α_t'' 为探针极化率的虚部; E_z 为电场的垂直方向(探针针轴方向)的极化分量。其中探针的极化率为^[25]:

$$\alpha_t = 4\pi R^3 (\epsilon_t - 1) / (\epsilon_t + 2) \quad (5)$$

样品的极化率为^[25]:

$$\alpha_s = \frac{\alpha_t (1 + \beta)}{1 - \frac{\alpha_t \beta}{16\pi(R+z)^3}} \quad (6)$$

式中: R 为探针尖端的曲率半径; β 为样品表面对探针的响应函数 ($\beta = (\epsilon_s - 1) / (\epsilon_s + 1)$); ϵ_t 为探针材质的相对介电常数; ϵ_s 为样品的相对介电常数。由式(3)可知散射力主要与探针尖端极化率虚部相关, 所以对被测样品的光学性质不敏

感。由式(4)可以看出梯度力与样品的光学性质相关, 且其大小非线性依赖于探针与样品间距离, 当探针与样品间距离为纳米量级时, 梯度力对样品粒子的光学性质十分敏感。计算了梯度力与探针-样品间距离的关系, 设置入射太赫兹频率为 220 GHz, 采用德鲁德模型计算出金属 Pt 探针及样品 Au 薄膜在 220 GHz 的相对介电常数 ($\epsilon_t = -4710.786525 + 463090i$, $\epsilon_s = -10000 + 2514i$), 针尖曲率半径为 40 nm, 计算结果如图 2 所示。当探针与样品间距离增大时, 梯度力非线性地迅速减小。当探针和样品距离小于 30 nm 时, 系统探测主导力为梯度力, 散射力可以忽略^[11], 此时基本无背景噪声的影响。

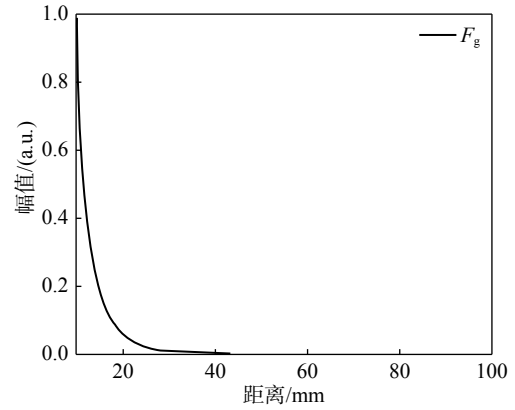


图 2 梯度力与探针随样品距离变化的曲线

Fig. 2 Calculated curve of gradient force varying with probe-sample distance

2 实验部分

2.1 实验装置

图 3 为自主设计和搭建的 THz PiFM 系统示意图。系统基于已建立的 THz s-SNOM, 太赫兹源由一个射频信号发生器和一个电子学毫米波倍频器组成, 辐射的太赫兹波(频率为 0.15 THz)经抛物面镜聚焦于扫描探针的尖端。对入射的太赫兹波进行脉冲调制, 调制频率设置为探针的一阶和二阶共振频率之和。AFM 的力反馈激光经探针悬臂反射后被四象限探测器收集, 使用锁相放大器检测四象限探测器的输出信号, 设置探针的一阶共振频率用于检测样品表面形貌, 二阶共振频率用于检测样品表面光力信号。

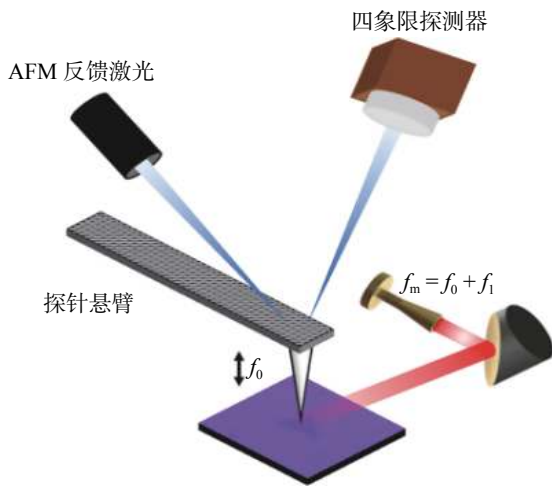


图 3 太赫兹光致力显微系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of THz PiFM

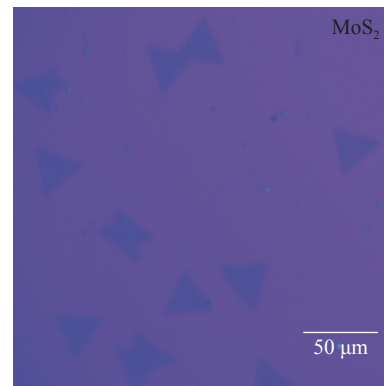
2.2 样品制备

过渡金属硫化物 MoS_2 是近年来被广泛研究的一种新型的半导体。单层厚度的 MoS_2 带隙为 1.85 eV ^[26-27]，是一种直接带隙半导体，具有非常高的激子束缚能^[28-29]，独特的光学、电学及催化特性^[30-32]。当 MoS_2 晶粒受光激发时，其光生载流子浓度上升，导致晶粒在太赫兹波段的介电常数改变，从而使太赫兹近场信号出现明显的变化^[33-34]。在本研究中，将光致力显微镜与太赫兹技术相结合，实现了对单层 MoS_2 晶粒中光生载流子的太赫兹近场显微表征。

单层 MoS_2 晶粒采用化学气相沉积法 (chemical vapor deposition, CVD) 制备，以三氧化钼 (MoO_3) 和硫粉 (S) 作为生长原料，使用氩气作为生长载气，生长气压为 4000 Pa ，通过 S 和 MoO_3 在双温区管式炉中的热蒸发反应获得 MoS_2 和 MoO_2 的混合物。然后在富硫环境中退火将大部分过剩的 MoO_2 转变为层状 MoS_2 ，继续生长 10 min 后，得到 Si/SiO_2 基底上的单层 MoS_2 晶粒。样品的晶粒形貌和分布如图 4 (光学显微图) 所示。

3 实验结果与讨论

使用 THz PiFM 系统对单层 MoS_2 晶粒进行了太赫兹近场显微成像表征。图 5(a) 为 AFM 测试的单层 MoS_2 晶粒形貌图，该晶粒边长约

图 4 单层 MoS_2 晶粒的光学显微图Fig. 4 Optical micrograph of monolayer MoS_2 grains

$8 \mu\text{m}$ ，厚度约 0.8 nm 。图 5(a) 中可以看到样品表面有一些杂质颗粒，这应源于晶粒老化导致表面吸附空气中的污染物^[35]。图 5(b) 为未被可见激光辐照时 MoS_2 晶粒的光力显微图，可以看出晶粒与基底 (SiO_2) 之间几乎没有可分辨的对比度。这是因为晶粒本身载流子浓度较低，在没有外部激光辐照时晶粒中没有光生载流子产生，因此晶粒与衬底间没有明显的近场信号对比度。图 5(c) 是激光辐照时 THz PiFM 测试的晶粒显微图。此时基底与晶粒间出现了明显的近场信号对比度，晶粒的轮廓被清晰完整地呈现出来。这是因为激光辐照引起晶粒中载流子浓度上升，改变了晶粒的极化率，而针尖和晶粒之间的太赫兹近场梯度力对晶粒的极化率变化具有很高的灵敏度，所以出现了明显的近场信号对比度。在相同激光辐照条件下，测试了晶粒的 THz s-SNOM 显微图，如图 5(d) 所示，也可以清晰地观测到晶粒的轮廓。对比图 5(c) 和 (d)，PiFM 显微图中样品-基底间的对比度和晶粒表面的细节丰富度都要明显优于 s-SNOM 显微图。

进一步对比 PiFM 和 s-SNOM 的成像效果，图 5(e) 中的绿色和红色曲线分别为图 5(c) 和图 5(d) 中虚线对应的近场信号强度，PiFM 检测的 MoS_2 与基底之间近场信号强度对比度约为 $6:1$ ，而 s-SNOM 检测的 MoS_2 与基底之间对比度约为 $4:1$ ，且 PiFM 的成像信噪比及分辨率要明显优于 s-SNOM。两者的成像性能差异主要由于信号采集方式不同，在 s-SNOM 检测中样品的表面近场通过探针的散射被外部的太赫兹探测器接收，经锁相解调出近场信号，这种远

场探测方法会导致能量的耗散且存在较多的背景噪声;而在 PiFM 检测中样品表面变化的近场,改变了探针与样品间光场梯度力的大小,作用力的变化被系统中的四象限探测器直接检测,由于是在纳米尺度下直接探测力的变化,所以相比于 s-SNOM 系统, PiFM 探测中基本没有能量的耗散及背景噪声的影响。

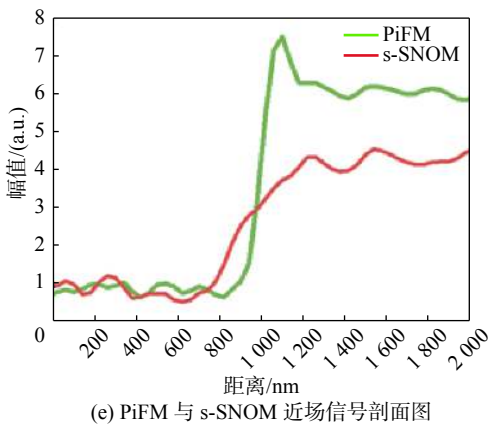
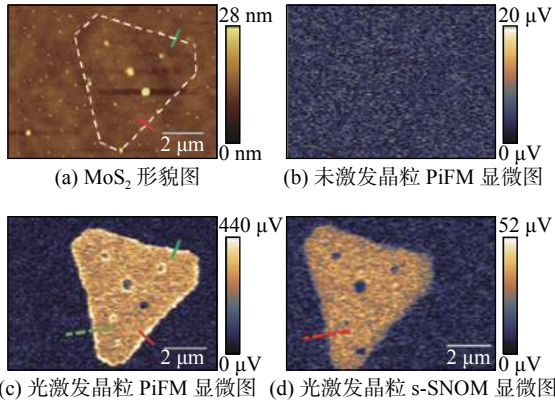
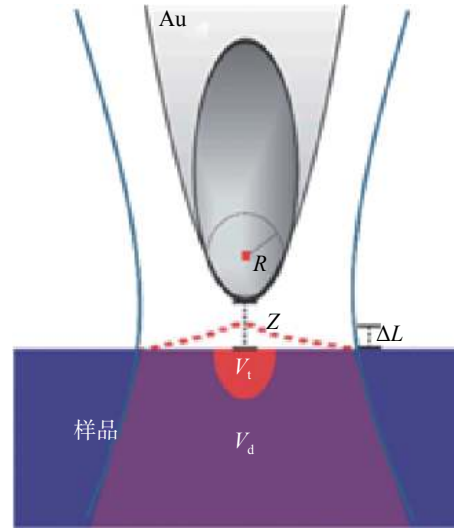


图 5 MoS₂ 的形貌、太赫兹光致力显微和散射近场显微图

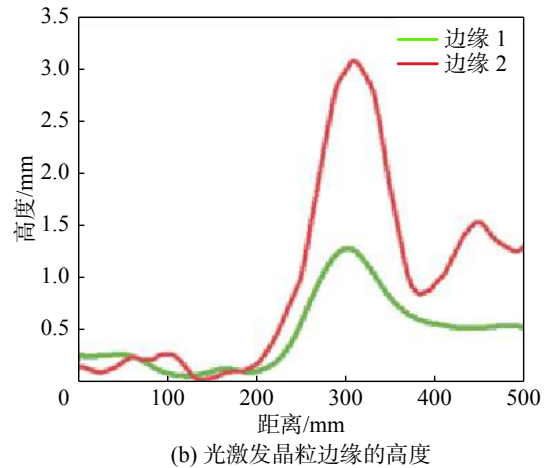
Fig. 5 Topography, THz PiFM and THz s-SNOM micrograph of MoS₂

在图 5(d) 和图 5(e) 中还发现 PiFM 探测下的 MoS₂ 晶粒边缘信号出现增强的现象。这可能源于光激发累积的热量导致样品边缘出现热膨胀^[36], 样品的热膨胀改变了针尖与样品间的距离, 从而使 PiFM 信号出现了增强, 其原理如图 6(a) 所示。为验证这一猜想, 分别在 MoS₂ 晶粒形貌图及 PiFM 信号图中引入红色和绿色剖面线, 由图 6(b) 可知 MoS₂ 晶粒边缘确实出现了热膨胀现象, 且红色截线处的热膨胀要大于绿色截线处。图 6(c) 为对应截线处的光力信号强度大小, 通过对比发现样品边缘的膨胀厚度越

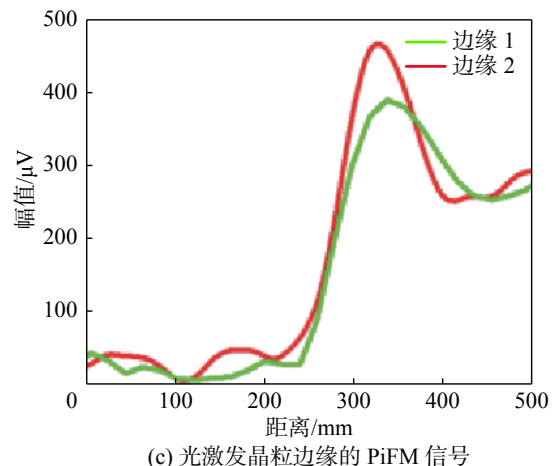
大, 边缘信号增强越多, 晶粒边缘的膨胀将会导致光力信号的增强。



(a) 样品热膨胀示意图



(b) 光激发晶粒边缘的高度



(c) 光激发晶粒边缘的 PiFM 信号

图 6 光激发时 MoS₂ 晶粒边缘的高度和 PiFM 信号

Fig. 6 The height and PiFM signal at the edge of MoS₂ under optical excitation

除了上述原因, 还应考虑 $\text{MoS}_2/\text{SiO}_2$ 界面处的缺陷^[37], 材料的缺陷会吸附空气中的杂质从而使样品边缘氧化, 导致 N 型载流子堆积^[38], 从而改变样品的光学性质。为了更好地分析这种现象, 对 MoS_2 晶粒进行了电子显微镜表征和光致发光测试。图 7(a) 为电子显微镜测试结果, 发现 MoS_2 晶粒中 3 种不同的缺陷结构: (i) 边缘的氧化; (ii) 边缘处结构破损; (iii) 杂质吸附。这是由于材料长期暴露在空气中, 导致样品表面结构发生变化^[39]。图 7(b) 为晶粒光致发光测试结果, 可以看出晶粒边缘处存在峰位蓝移现象, 这是由于材料边缘辐射的波长变短, 说明样品边缘的带隙增大。这种带隙增大的现象可能如上述样品的热膨胀所导致, 也可能是因晶粒边缘被氧化导致带隙增大^[40]。但带隙的变化是否会导致光力信号的改变, 后续还需要更加系统的实验和理论研究。

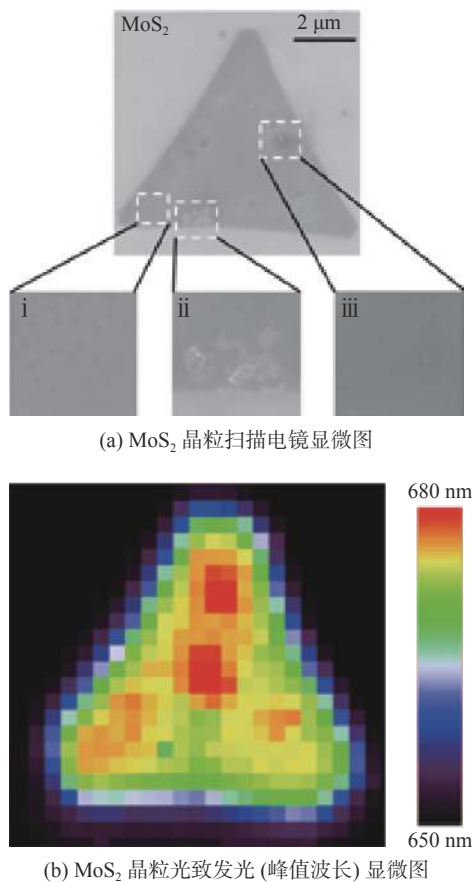


图 7 MoS_2 晶粒的扫描电子显微镜和光致发光显微表征图

Fig. 7 Scanning electron microscopy and micro-PL characterizations of MoS_2

4 结 论

本文首次将光致力显微成像技术应用于太赫兹波段, 实现了高分辨率、高信噪比的太赫兹近场显微成像。对比散射式近场光学显微镜, THz PiFM 通过非光学方法探测太赫兹近场响应, 表现出更加优越的成像分辨率及信噪比。利用 THz PiFM 观察到单层 MoS_2 晶粒中光生载流子的近场响应, 后续的发展将会使这项技术成为纳米科学中的重要研究工具。

参考文献:

- [1] ZHANG X C, XU J Z. Introduction to THz wave photonics[M]. New York: Springer, 2010.
- [2] STÖCKLE R M, SUH Y D, DECKERT V, et al. Nanoscale chemical analysis by tip-enhanced Raman spectroscopy[J]. *Chemical Physics Letters*, 2000, 318(1/3): 131 – 136.
- [3] HARTSCHUH A, SÁNCHEZ E J, XIE X S, et al. High-resolution near-field Raman microscopy of single-walled carbon nanotubes[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(9): 095503.
- [4] POZZI E A, SONNTAG M D, JIANG N, et al. Tip-enhanced Raman imaging: an emergent tool for probing biology at the nanoscale[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(2): 885 – 888.
- [5] KNOLL B, KEILMANN F. Near-field probing of vibrational absorption for chemical microscopy[J]. *Nature*, 1999, 399(6732): 134 – 137.
- [6] OCELC N, HUBER A, HILLENBRAND R. Pseudoheterodyne detection for background-free near-field spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(10): 101124.
- [7] POLLARD B, MULLER E A, HINRICHS K, et al. Vibrational nano-spectroscopic imaging correlating structure with intermolecular coupling and dynamics[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3587.
- [8] NOZAKI J, MORI S, MIYATA Y, et al. Local optical absorption spectra of MoS_2 monolayers obtained using scanning near-field optical microscopy measurements[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, 55(3): 038003.
- [9] HUANG F, TAMMA V A, MARDY Z, et al. Imaging

- nanoscale electromagnetic near-field distributions using optical forces[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10610.
- [10] JAHNG J, BROCIOSUS J, FISHMAN D A, et al. Gradient and scattering forces in photoinduced force microscopy[J]. *Physical Review B*, 2014, 90(15): 155417.
- [11] NOWAK D, MORRISON W, WICKRAMASINGHE H K, et al. Nanoscale chemical imaging by photoinduced force microscopy[J]. *Science Advances*, 2016, 2(3): e1501571.
- [12] JAHNG J, LADANI F T, KHAN R M, et al. Visualizing surface Plasmon Polaritons by their gradient force[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 5058 – 5061.
- [13] TUMKUR T U, YANG X, CERJAN B, et al. Photoinduced force mapping of Plasmonic nanostructures[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(12): 7942 – 7949.
- [14] JAHNG J, BROCIOSUS J, FISHMAN D A, et al. Ultrafast pump-probe force microscopy with nanoscale resolution[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(8): 083113.
- [15] JAHNG J, POTMA E O, LEE E S. Tip-enhanced thermal expansion force for nanoscale chemical imaging and spectroscopy in photoinduced force microscopy[J]. *Analytical Chemistry*, 2018, 90(18): 11054 – 11061.
- [16] RAJAPAKSA I, WICKRAMASINGHE H K. Raman spectroscopy and microscopy based on mechanical force detection[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(16): 161103.
- [17] 彭涛, 朱亦鸣, 游冠军. 散射型近场扫描光学显微镜的探针振动参数优化研究 [J]. *光学仪器*, 2019, 41(2): 60 – 65.
- [18] 岳东东, 游冠军. 散射式太赫兹扫描近场光学显微技术研究 [J]. *光学仪器*, 2020, 42(2): 64 – 69.
- [19] 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.
- [20] AMBROSIO A, DEVLIN R C, CAPASSO F. Observation of nanoscale refractive index contrast via photoinduced force microscopy[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(4): 846 – 851.
- [21] DHOLAKIA K, ZEMÁNEK P. *Colloquium*: gripped by light: optical binding[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2010, 82(2): 1767 – 1791.
- [22] ARIAS-GONZÁLEZ J R, NIETO-VESPERINAS M. Optical forces on small particles: attractive and repulsive nature and Plasmon-resonance conditions[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2003, 20(7): 1201 – 1209.
- [23] JAHNG J, FISHMAN D A, PARK S, et al. Linear and nonlinear optical spectroscopy at the nanoscale with photoinduced force microscopy[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2015, 48(10): 2671 – 2679.
- [24] NOVOTNY L, HECHT B. Principles of nano-optics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [25] KNOLL B, KEILMANN F. Enhanced dielectric contrast in scattering-type scanning near-field optical microscopy[J]. *Optics Communications*, 2000, 182(4/6): 321 – 328.
- [26] Gmelin handbook of inorganic and organometallic chemistry[M]. 8th ed. Berlin: Springer, 1995.
- [27] MAK K F, LEE C, HONE J, et al. Atomically thin MoS₂: a new direct-gap semiconductor[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(13): 136805.
- [28] HE K L, KUMAR N, ZHAO L, et al. Tightly bound excitons in monolayer WSe₂[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(2): 026803.
- [29] MAK K F, HE K L, LEE C, et al. Tightly bound trions in monolayer MoS₂[J]. *Nature Materials*, 2013, 12(3): 207 – 211.
- [30] MAK K F, SHAN J. Photonics and optoelectronics of 2D semiconductor transition metal dichalcogenides[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(4): 216 – 226.
- [31] LEE P A. Physics and chemistry of materials with layered structures: optical and electrical properties[M]. Dordrecht, Holland: Reidel Publishing Company, 1976.
- [32] COELHOORN R, HAAS C, DE GROOT R A. Electronic structure of MoSe₂, MoS₂, and WSe₂. II. The nature of the optical band gaps[J]. *Physical Review B*, 1987, 35(12): 6203 – 6206.
- [33] 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.
- [34] 叶鑫林, 游冠军. 单层 MoS₂ 和 WS₂ 的太赫兹近场显微成像研究 [J]. *光学仪器*, 2022, 44(1): 63 – 69.
- [35] CHEN X, YANG Z B, FENG S Z, et al. How universal is the wetting aging in 2D materials[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(8): 5670 – 5677.
- [36] DE BARTOLOMEO A, GENOVESE L, FOLLER T, et al. Electrical transport and persistent

- photoconductivity in monolayer MoS₂ phototransistors [J]. *Nanotechnology*, 2017, 28(21): 214002.
- [37] LANG D V, LOGAN R A. Large-lattice-relaxation model for persistent photoconductivity in compound semiconductors[J]. *Physical Review Letters*, 1977, 39(10): 635 – 639.
- [38] WU Y C, LIU C H, CHEN S Y, et al. Extrinsic origin of persistent photoconductivity in monolayer MoS₂ field effect transistors[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11472.
- [39] GAO J, LI B C, TAN J W, et al. Aging of transition metal dichalcogenide monolayers[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(2): 2628 – 2635.
- [40] PARK J H, VISHWANATH S, WOLF S, et al. Selective chemical response of transition metal dichalcogenides and metal dichalcogenides in ambient conditions[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(34): 29255 – 29264.

(编辑: 李晓莉)