文章编号：1005-5630(2025)05-0023-08 **DOI**: 10.3969/j.issn.1005-5630.202404080070

二氧化钒相变的太赫兹近场显微成像研究

刘孟楠，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：利用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）表征分析了二氧化钒（VO_2）单晶微米棒和多晶薄膜的热致相变过程。在样品升温过程中，VO_2 单晶的近场信号在 344.9 K 时发生突变，这是由于单晶内部结构的有序性使其能够迅速地从单斜结构变为四方金红石结构，从而表现出迅速且均一的相变；而 VO_2 多晶薄膜在相变过程中则表现出成核的纳米岛生长并相互连接的现象，这可能是由于 VO_2 多晶薄膜中存在晶界等缺陷导致了非均匀的相变。研究结果表明，THz s-SNOM 系统具有在纳米尺度上灵敏探测材料电导率相对变化的能力，是对相变过程进行显微表征分析的有力工具。

关键词：太赫兹散射式扫描近场光学显微镜；二氧化钒单晶；二氧化钒多晶薄膜；非均匀相变
中图分类号：O 433 **文献标志码**：A

Terahertz near-field microscopy of vanadium dioxide phase transition

LIU Mengnan，YOU Guanjun
（School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, shanghai 200093, China）

Abstract: The thermoinduced phase transformation process of vanadium dioxide (VO_2) single crystal micron rods and polycrystalline films was characterized and analyzed by terahertz scattering-type scanning near-field optical microscopy (THz s-SNOM). During the heating process, the near-field signal of VO_2 single crystal changed abruptly at 344.9 K, which was due to the orderliness of the internal structure of the single crystal, which enabled it to rapidly change from monoclinic structure to tetragonal rutile structure, showing rapid and uniform phase transition. While the VO_2 polycrystalline film exhibited the phenomenon of nucleated nanoisland growth and interconnection during the phase transition, which was due to the existence of defects such as grain boundaries in the VO_2 polycrystalline film, resulting in non-uniform phase transition. The results

收稿日期：2024-04-08
基金项目：国家重点研发计划 (2017YFF0106304)
第一作者：刘孟楠 (1995—)，男，硕士研究生，研究方向为太赫兹近场光学显微技术。
E-mail：18256616609@163.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

show that the THz s-SNOM system has the ability to sensitively detect the relative change of conductivity of materials at the nanoscale, and is a powerful tool for microscopic characterization and analysis of the phase transformation process.

Keywords: terahertz scattering-type scanning near-field optical microscopy; vanadium dioxide single crystal; vanadium dioxide polycrystalline film; non-uniform phase transition

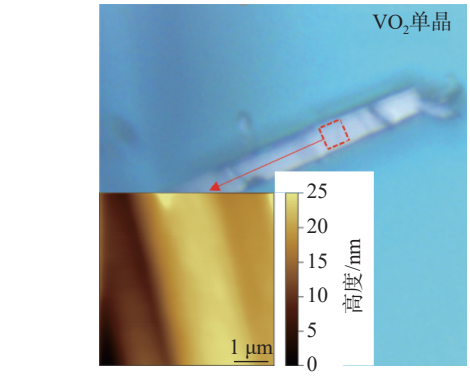
二氧化钒（VO_2）的相变特性自 1959 年被首次报道以来就受到了广泛的关注[1]。作为一种强关联电子材料，VO_2 在 341 K 附近会发生从低温绝缘相到高温金属相的可逆性转变。相变时，VO_2 的晶体结构、光学特性和电学特性会发生突变，其电阻率会发生 3～5 个数量级变化[2-4]。VO_2 的相变在强关联电子物理等方面具有独特的基础研究价值，在红外探测、热致变色、光电开关、太赫兹器件等方面具有重要的应用价值，因此，研究人员对 VO_2 的制备方法、电子与晶体结构、相变机制、器件应用等方面展开了大量研究[5-8]。在结构表征方面，他们使用原子力显微镜（atomic force microscopy，AFM）测量 VO_2 材料表面的形貌，利用透射电子显微镜（transmission electron microscopy，TEM）观测畴结构在相变过程中的演变，利用 X 射线衍射（X-ray diffraction，XRD）技术揭示其结晶状态的变化[3]，通过拉曼光谱研究其在不同温度下振动模式的演变[2]。

近年来，太赫兹（terahertz，THz）测量技术被广泛应用于 VO_2 材料和器件的特性表征。太赫兹波以其强大的穿透能力，可与多种材料特异性相互作用的能力，以及优秀的检测成像能力而著称[8]，但由于衍射极限的限制，传统的太赫兹成像系统无法实现纳米级光学分辨率[9]。散射式扫描近场光学显微镜（scattering-type scanning near-field optical microscopy，s-SNOM）具有突破衍射极限的纳米级光学成像能力[10-11]，将 THz 测量技术与 s-SNOM 技术相结合能极大地促进太赫兹技术在纳米尺度成像和检测领域的进步[7,10-11]。THz s-SNOM 系统中近场信号的幅值变化与材料的局部电导率具有相关性[10]，通过测量近场散射信号的幅值变化，可以分析材料电导率在微观层面上的相对变化。因此，THz s-SNOM 技术具有空间分辨率高、对样品电导率敏感、非接触测量等优点，适合在微观层面上表征 VO_2 的相变过程[12-14]。利用 THz s-SNOM 系统，对 VO_2 单晶微米棒和多晶薄膜进行了太赫兹近场显微成像表征，对比分析了它们在热致相变过程中表现出的差异。

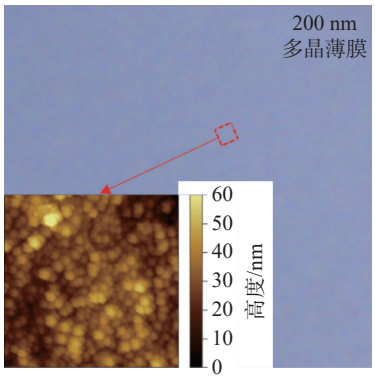
1　实验样品与方法

采用电阻加热法制备 VO_2 单晶微米棒。选取片状高纯钒，通过精确控制加热温度和氧分压，使钒表面逐步氧化生成 VO_2 单晶聚集体，用酒精浸泡后再用镊子剥离，便可获得 VO_2 单晶。VO_2 单晶具有较低的韧性[15]，以及高度有序的紧密结构，通常呈棒状。本文中选取的 VO_2 单晶微米棒在光学显微镜下的图像如图 1（a）所示，其上表面尺寸约为 7 μm×120 μm，厚度约为 32 μm。使用 AFM 测量图 1（a）中红色框区域，扫描范围为 5 μm×5 μm，详见图 1（a）中插图，VO_2 单晶表面光滑，无颗粒状或岛状结构。通过磁控溅射法制备了 4 片 VO_2 多晶薄膜，衬底为蓝宝石，薄膜厚度分别为 200、150、100 和 50 nm。厚度为 200 nm 的 VO_2 多晶薄膜的光学显微图如图 1（b）所示，由于光学显微镜的分辨率有限，无法观察到薄膜表面的微结构。用原子力显微镜观测图 1（b）中的红色框选取区域，扫描范围为 5 μm×5 μm，结果如图 1（b）中插图所示，可以观察到致密的颗粒状结构。多晶体系中晶界和晶粒间存在的取向差异，以及制备工艺的影响都会导致多晶薄膜表面形成颗粒状的结构，使其表面相对粗糙[16]。测试结果显示，厚度为 200、150、100 和 50 nm 的 VO_2 多晶薄膜的表面粗糙度分别约为 7.1、6.2、2.2 和 0.8 nm，这也表明可以通过制作不同厚度的薄膜来间接控制颗粒的尺寸与薄膜的粗糙度[17]。

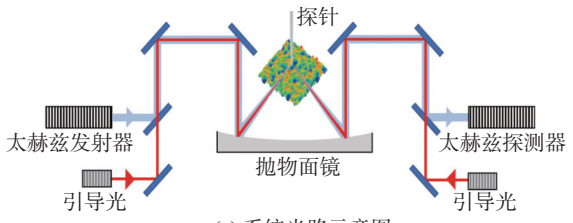
为了对 VO_2 单晶与多晶薄膜进行变温状态



(a) VO_2单晶光学显微图和形貌图



(b) VO_2薄膜光学显微图和形貌图



(c) 系统光路示意图

图 1　样品及 THz s-SNOM 系统光路示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the sample and the optical path of the THz s-SNOM system

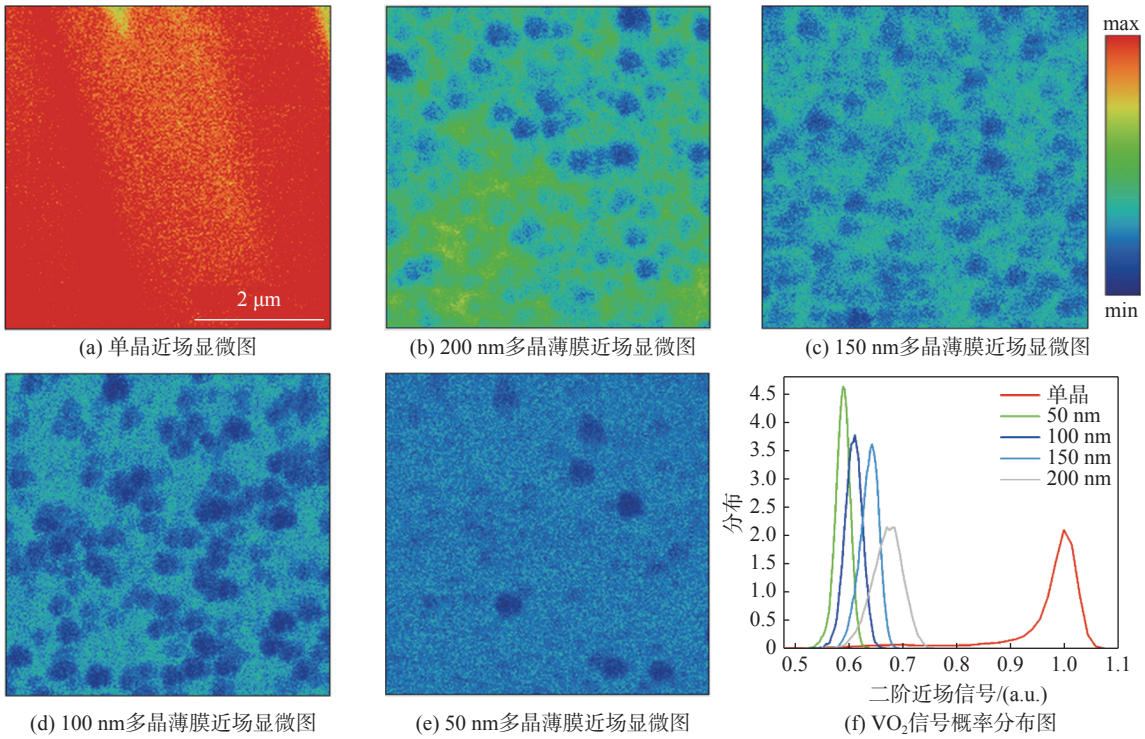
下的太赫兹近场显微测试，设计并制作了一个加热平台。该平台的加热部分采用金属陶瓷加热器，通过数字源表控制供电电流。在加热器上方安装了铂电阻温度传感器作为测温元件，通过多用电表检测其阻值，并将电阻值转换为相应的温度，以实现对加热器温度的精确测量和控制。

THz s-SNOM 系统的光路示意图如图 1(c)所示。该系统结合了太赫兹时域光谱(terahertz time-domain spectroscopy，THz–TDS)技术和原子力显微镜，其中 THz–TDS 用来发射和探测太赫兹波，AFM 则用作精确的扫描平台。AFM 采用轻敲模式工作，使用 Rocky Mountain Nanotechnology 公司生产的铂铱涂层探针，这些探针的共振频率 Ω 为 30～90 kHz，针尖半径约为 20～50 nm。全光纤耦合的 THz–TDS 系统中，天线的型号为 TERA15-HP/TERA15-FC，由波长为 1 560 nm 的近红外激光脉冲泵浦，能产生功率为数十微瓦级别的太赫兹波，动态范围大于 100 dB。这些太赫兹波随后被离轴抛物面镜聚焦到 AFM 探针的针尖处[15]，该位置的局域电场会因此得到增强，并散射出携带有样品信息的近场信号[4]。THz 探测器在此系统中的角色至关重要，它具有高灵敏度和宽频带，能够精确测量经探针调制的太赫兹波的电场强度，为获取样品介电常数的变化提供了可能。散射的近场信号通过同一抛物面镜收集，并被耦合到该 THz 探测器以进行分析。散射信号同时包含了针尖散射的近场信号和探针悬臂等散射的远场背景信号。将探针的振动信号作为参考，采用高阶解调技术可以从散射信号中提取出纯净的近场信号[18-19]。THz s-SNOM 测得的近场信号会因样品介电常数的改变而产生对比度，从而能反映材料电导率的相对变化。采用这种技术可以在纳米尺度上灵敏地探测材料电导率的变化和分布[18-20]。

2　实验结果与讨论

首先，在室温(294 K)下对 VO_2 单晶与多晶薄膜进行了太赫兹近场显微成像表征，结果如图 2 所示。在相同系统状态下，近场二阶散射信号的幅值大小反映了样品电导率的相对强弱。利用镜像偶极子理论来简化探针的散射信号分析。散射信号与系统的有效极化率成正比，系统的有效极化率与样品的相对介电常数有关，所以可以根据散射信号的大小来分析样品的相对电导率。图 2(a)为 VO_2 单晶的近场显微图，图 2(b)～(e)为 VO_2 多晶薄膜的近场显微图。可以发现，VO_2 单晶的近场散射信号强度高于 VO_2 多晶薄膜，这是由于 VO_2 单晶具有较为有序和完整的内部结构，形成了低缺陷率的晶格结构，从而显著减少了电子在运动过程中遇到的障碍，并降低了散射，使得材料具有更高的电导率[2,12]。图 2(b)～(e)中大量的岛状区域则表明 VO_2 多晶薄膜的近场散射信号强度分布具有非均匀性，这是由 VO_2 薄膜中晶界、缺陷或杂质等引起的[2]。为了

定量地对比 VO_2 单晶与薄膜的近场信号分布，对 294 K 下各样品的近场信号进行了归一化处理和统计分析，结果如图 2(f)所示。可以发现，VO_2 单晶的太赫兹近场散射信号强度大于 VO_2 多晶薄膜，这是由于 VO_2 单晶具有规则且连续的晶体结构，使得其在太赫兹波段的光学响应更为一致和强烈。相反，VO_2 多晶薄膜由众多晶粒组成，晶粒间存在的边界和缺陷，削弱了散射信号的强度。VO_2 单晶与厚度为 200、150、100 和 50 nm 的多晶薄膜相比，近场信号强度的比值为 1∶0.67∶0.64∶0.61∶0.58。测试结果表明，THz s-SNOM 系统具有纳米级的光学分辨率，近场信号的幅值能够反映 VO_2 局部电导率的相对差异[10]。



(a) 单晶近场显微图　(b) 200 nm多晶薄膜近场显微图　(c) 150 nm多晶薄膜近场显微图

(d) 100 nm多晶薄膜近场显微图　(e) 50 nm多晶薄膜近场显微图　(f) VO_2信号概率分布图

图 2　294 K 时 VO_2 的近场显微图与信号概率统计图

Fig. 2　Near-field micrograph and signal probability statistics of VO_2 at 294K

为了表征 VO_2 在临界温度(341K 附近)发生的相变，对 VO_2 单晶微米棒和多晶薄膜分别进行了变温太赫兹近场显微成像测量，扫描范围为 5 μm×5 μm，结果如图 3 所示。图中蓝色区域表示近场散射幅度较低，对应于绝缘相；红色区域表示近场散射幅度较高，对应于金属相：所以可以通过分析近场显微图中散射信号幅值的变化来观察 VO_2 的相变。在温度从 330 K 逐渐升高至 350 K 的过程中，VO_2 单晶在 344.9 K 发生迅速且统一的相变；厚度分别为 200、150、100 nm 的 VO_2 多晶薄膜分别在 345.2、346.0、346.9 K 时，大范围发生相变[21-22]。如图 3(a)所示，VO_2 单晶在 344.9 K 时的新相形成量急剧增加，二阶近场信号(S2)由 3.8 mV 突变为 7.8 mV，反映了 VO_2 单晶的相变是迅速均一的[23-25]。因为 VO_2 单晶中钒原子和氧原子的有序排列构成了稳定的晶格结构，这种内部有序的原子排列有助于单晶 VO_2 在相变过程中迅速响应，表现为均匀成核的特征[2]。VO_2 多晶薄膜相变的近场显微图如图 3(b)～(d)所示。图 3(b)中展示了厚度为 200 nm 的 VO_2 多晶薄膜在临界温度附近的相变渗透过程，图中多处位置近场散射信号的逐渐增强反映了 VO_2 多晶薄膜的非均匀相变。为了更直观地观察相变中纳米岛的变化，对图 3(b)中典型区域做白色圆圈标注。随着温度升高，可以观察到白色圆框区域内相变成核的纳米岛逐渐向外生长并相互连接，这反映了 VO_2 多晶薄膜相变过程中显著的非均匀性，与之前的研究相符

合[16]。VO_2 多晶薄膜结构中存在大量晶界和缺陷，这些晶界作为不同晶粒的交界，其附近的原子排列存在不规则性，从而可能导致非均匀的相变过程[26]。此外，晶格重排和电子结构变化也会导致 VO_2 薄膜在局部结构与性质的不均匀，进而影响相变过程中的局部应力分布、相变动力学以及晶界结构，导致 VO_2 多晶薄膜在相变过程中呈现出非均匀的相变特性[26-28]。图 3(c)和(d)是厚度为 150 nm 和 100 nm 的 VO_2 多晶薄膜在相变过程中的近场显微图，二者也表现出非均匀相变的特点，但相变成核纳米岛的尺寸较小，这可能是由于薄膜中的晶粒尺寸较小。

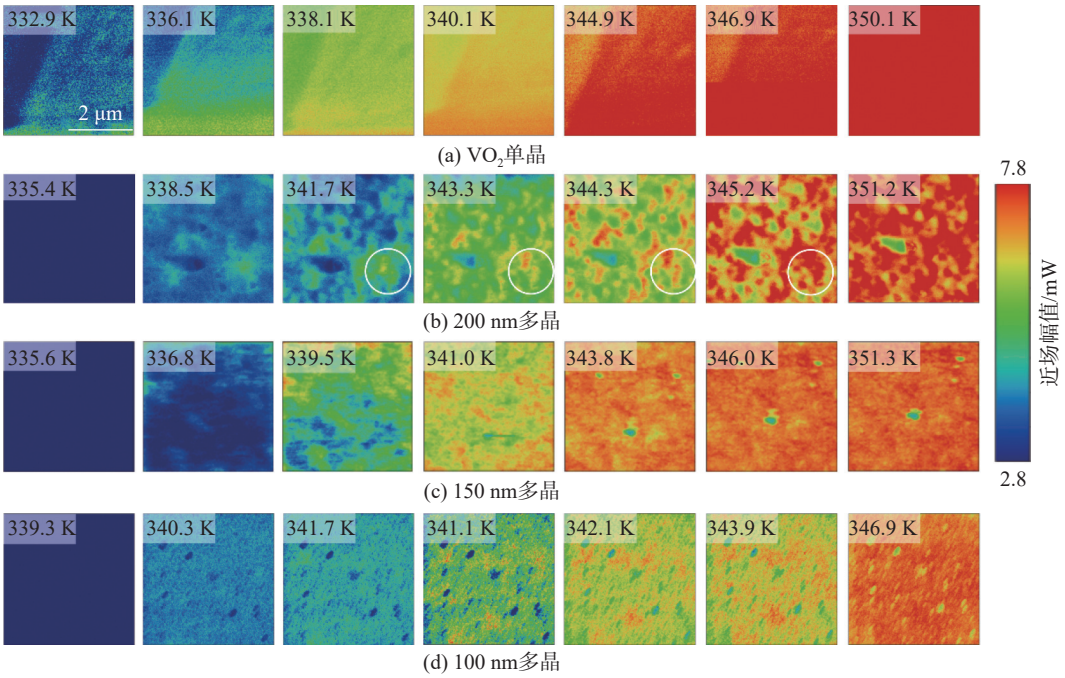


图 3　VO_2 单晶与不同厚度的多晶薄膜在变温状态下的近场信号显微图

Fig. 3　Near-field signal micrographs of VO_2 single crystals and films of different thicknesses at varying temperatures

对图 3(b)中厚度为 200 nm 的 VO_2 多晶薄膜在不同温度下的二阶近场信号做概率分布分析，结果如图 4 所示。数据显示，随着温度的升高，VO_2 多晶薄膜的太赫兹近场散射信号缓慢增大，反映了 VO_2 多晶薄膜相变的非均匀性，表征了相变过程中近场信号变化的非均匀分布，从宏观上表征了电导率在空间上由绝缘态向金属态的过渡[16]。

VO_2 相变的微观机制主要可以从电子相关性、晶体结构的变化、电子能带结构的改变、电子–声子相互作用、相变动力学等方面来进行解释[1,7,14,21,26]。在低温绝缘相中的 VO_2，钒原子通过强 V—V 键配对形成一维链状结构，使电子局域化，从而表现出绝缘性[1]。从绝缘相到金属相的相变过程中，电子相关性的强度减弱，电子脱局域化，从而使电导率增加。电子相关性的减弱与 VO_2 的晶体结构变化密切相关。相变时，VO_2 的晶体结构从单斜结构转变为四方金红石结构[7]。这一结构变化伴随着钒原子间距的变大，钒原子的配对解除，电子的局域化消除，使得电子能够在晶格中自由移动，电导率急剧增

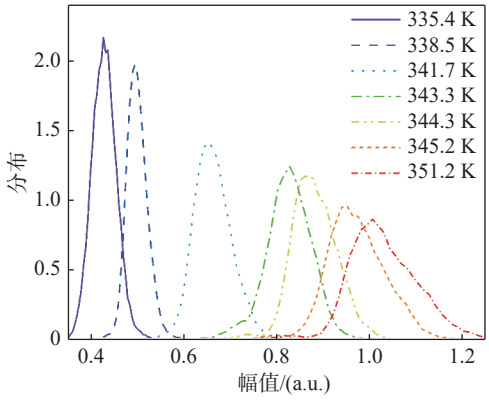
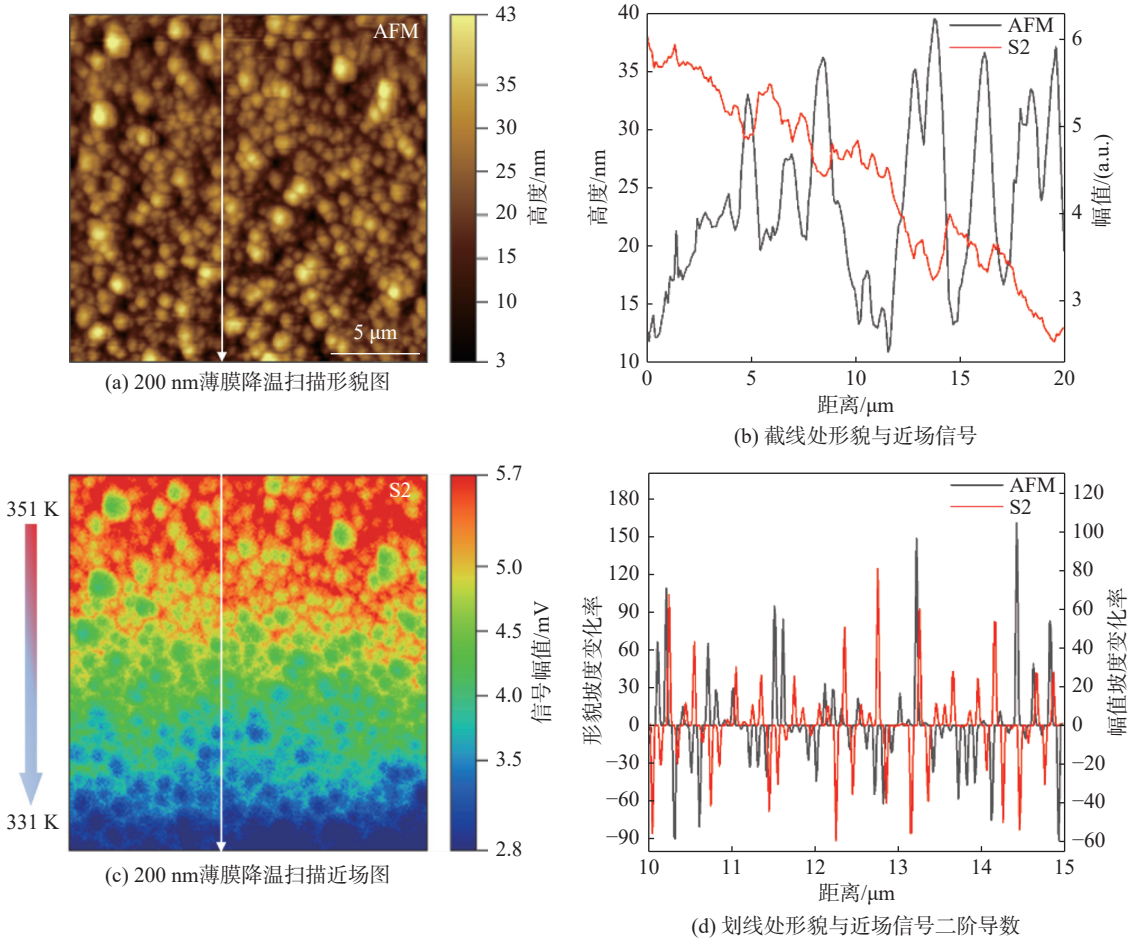


图 4　200 nm 的 VO_2 多晶薄膜近场信号概率分布图

Fig. 4　Probability distribution of the near-field signal of a VO_2 polycrystalline film with a thickness of 200 nm

加。伴随晶体结构的转变，VO_2的电子能带结构也会发生显著改变。在绝缘体相中，由于电子的强局域化，能带间存在较大的能隙。在金属相中，能隙关闭，形成了部分填充的能带，允许电子自由移动，导致金属行为的出现[14]。在 VO_2 的相变中，电子–声子相互作用也扮演着重要角色。相变过程中晶格的重排会导致声子模式的改变，这些改变可以调制电子能带，进一步促进电子的脱局域化，提高材料的电导率[21]。VO_2 相变的动力学也对电导率变化有着重要影响，相变过程中，相界的移动、新相的形成和增长等动态过程会影响电子的运输[26]。因此，表征和理解这些微观过程对于准确预测和调控 VO_2 等材料的相变至关重要。

为了进一步表征 VO_2 多晶薄膜的相变过程，对持续降温过程中的 VO_2 多晶薄膜进行太赫兹近场显微成像测量。选取厚度为 200 nm 的 VO_2 多晶薄膜，温度由 351 K 持续下降到 331 K。测量区域的表面形貌如图 5(a)所示，可以看到薄膜表面具有颗粒状结构。太赫兹近场显微图如图 5(c)所示，在 351 K 与 331 K 状态下，VO_2 多晶薄膜的近场信号对比度约为 2∶1。图 5(b)中黑色和红色曲线分别对应图 5(a)和图 5(c)中截线位置表面高度变化与近场信号幅值变化。随着温度的降低，近场信号幅值从 5.7 mV 降至 2.8 mV。从图 5(b)可以看到，VO_2 薄膜晶粒位置处的近场信号幅值发生变化。为进一步探究晶粒分布对近场信号的影响，对图 5(b)中的形貌与近场散射信号曲线进行了二阶求导，其中 10～15 μm 处的结果如图 5(d)所示。通过二阶导数分析形貌与近场信号，发现两者在大部分位置呈相反的变化趋势，这表明 VO_2 多晶薄膜的相变与晶界可能存在密切关联[22,24]。综上所述，THz s-SNOM 对 VO_2 的相变具有良好的显



(a) 200 nm薄膜降温扫描形貌图

(b) 截线处形貌与近场信号

(c) 200 nm薄膜降温扫描近场图

(d) 划线处形貌与近场信号二阶导数

图 5　200 nm 的 VO_2 多晶薄膜的连续变温太赫兹近场扫描

Fig. 5　Continuous thermostat terahertz near-field scan of a VO_2 polycrystalline film with a thickness of 200 nm

微表征能力。

为分析 VO_2 多晶薄膜中晶粒的晶格振动在相变前后的变化，对厚度为 200 nm 的 VO_2 多晶薄膜进行拉曼光谱测试，结果如图 6 所示。黑色、红色绿色曲线分别代表 293.9、346.2 和 348.2 K 状态下的拉曼光谱。在 293.9 K 时，由于单斜晶体结构 VO_2 多晶薄膜表现出强烈的拉曼活性[29]，在图谱中 200、226、267、314、397 和 620 cm^{-1} 处观测到明显的拉曼峰。随着相变的发生，VO_2 转变为四方晶系的金属相，其晶格振动模式也由原来典型的离子振动转变为金属相特有的电子–声子耦合振动[29]，这种结构和振动模式的改变使 VO_2 拉曼活性显著减弱甚至消失，拉曼光谱中 VO_2 的峰值减小，峰宽变宽，导致在金属相中观察不到明显的拉曼峰[29-31]。有关 VO_2 的拉曼散射光谱的分析进一步表明 THz s-SNOM 系统对 VO_2 的相变具有良好的表征能力。

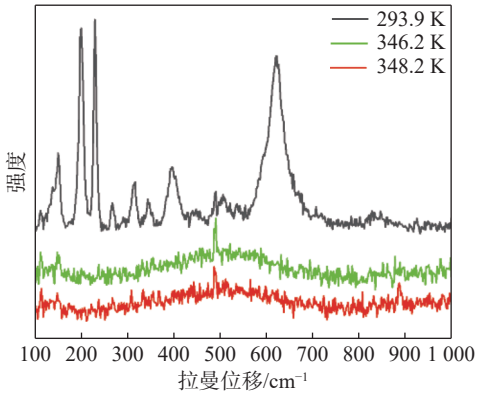


图 6　200 nm 的 VO_2 多晶薄膜的拉曼光谱

Fig. 6　Raman spectra of VO_2 polycrystalline films with a thickness of 200 nm

3　结　语

本研究使用 THz s-SNOM 系统对 VO_2 单晶和多晶薄膜的相变进行了近场显微成像表征，观测到了 VO_2 单晶的均匀相变和 VO_2 多晶薄膜的非均匀性相变，结果表明 THz s-SNOM 系统对于 VO_2 单晶和多晶薄膜的相变过程具有良好的显微检测能力。本研究为进一步研究材料相变过程中的微观机制提供了重要的表征手段。

参考文献：

[1] MORIN F J. Oxides which show a metal-to-insulator transition at the Neel temperature[J]. Physical Review Letters, 1959, 3(1): 34 – 36.

[2] ZHANG Y Q, XIONG W M, CHEN W J, et al. Recent progress on vanadium dioxide nanostructures and devices: fabrication, properties, applications and perspectives[J]. Nanomaterials, 2021, 11(2): 338.

[3] 崔景贺, 蒋权伟, 高忙忙, 等. 掺锗提高 VO_2 薄膜的相变温度机理研究 [J]. 人工晶体学报, 2022, 51(4): 666 – 672.

[4] 侯典心, 路远, 杨玚. VO_2 薄膜常见制备方法综述 [J]. 红外技术, 2016, 38(12): 1020 – 1025.

[5] LU Q J, GAO M, LU C, et al. Probing thermal properties of vanadium dioxide thin films by time-domain thermoreflectance without metal film[J]. Chinese Physics B, 2021, 30(9): 096801.

[6] XU M, YIN X N, HUANG J J, et al. Dynamically controlled asymmetric transmission of linearly polarized waves in VO_2-integrated dirac semimetal metamaterials[J]. Chinese Physics B, 2022, 31(6): 067802.

[7] CHEN X Z, LIU X, GUO X D, et al. THz near-field imaging of extreme subwavelength metal structures[J]. ACS Photonics, 2020, 7(3): 687 – 694.

[8] LASSEN H B, KELLEHER E J R, ILIUSHYN L, et al. Terahertz s-SNOM reveals nanoscale conductivity of graphene[J]. Physics. optics, arXiv: 2310.07479v2, 2023.

[9] GAO M, WANG X, LUO S X, et al. Terahertz transmission properties of vanadium dioxide films deposited on gold grating structure with different periods[J]. Materials Research Express, 2020, 7(5): 056404.

[10] NISHIKAWA K, NISHIDA J, YOSHIMURA M, et al. Metastability in the insulator–metal transition for individual vanadium dioxide nanoparticles[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2023, 127(33): 16485 – 16495.

[11] KONG L J, LU Y H, ZHUANG X Y, et al. Determining Hubbard U of VO_2 by the quasi-harmonic approximation[J]. Chinese Physics B, 2023, 33(1): 016302.

[12] 胡德波, 戴庆. 低维纳米材料的近场光学表征 [J]. 科学通报, 2018, 63(35): 3747 – 3759.

[13] SOLEMANIFAR A, GUO X, DONOSE B C, et al. Probing peptide nanowire conductivity by THz nanoscopy[J]. Nanotechnology, 2022, 33(6): 065503.
[14] WIECHA M M, KAPOOR R, ROSKOS H G. Terahertz scattering-type near-field microscopy quantitatively determines the conductivity and charge carrier density of optically doped and impurity-doped silicon[J]. APL Photonics, 2021, 6(12): 126108.
[15] 王康, 刘一, 宋立伟. 超快光场驱动的二氧化钒薄膜相变研究进展 [J]. 量子电子学报, 2023, 40(2): 238 – 257.
[16] 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.
[17] SHI Q W, HUANG W X, ZHANG Y X, et al. Giant phase transition properties at terahertz range in VO_2 films deposited by sol-gel method[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2011, 3(9): 3523 – 3527.
[18] 童海泉, 游冠军. 太赫兹近场光学亚表面检测技术研究 [J]. 光学仪器, 2023, 45(4): 9 – 16.
[19] 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.
[20] ZHANG J W, CHEN X Z, MILLS S, et al. Terahertz nanoimaging of graphene[J]. ACS Photonics, 2018, 5(7): 2645 – 2651.
[21] 孙肖宁, 曲兆明, 王庆国, 等. 电场诱导二氧化钒绝缘-金属相变的研究进展 [J]. 物理学报, 2019, 68(10): 233 – 242.
[22] 张化福, 沙浩, 吴志明, 等. 太赫兹波段二氧化钒薄膜的研究进展 [J]. 材料导报, 2019, 33(15): 2513 – 2523.
[23] WANG K, CHENG C, CARDONA E, et al. Performance limits of microactuation with vanadium dioxide as a solid engine[J]. ACS Nano, 2013, 7(3): 2266 – 2272.
[24] CAVALLERI A, DEKORSY T, CHONG H H W, et al. Evidence for a structurally-driven insulator-to-metal transition in VO_2: a view from the ultrafast timescale[J]. Physical Review B, 2004, 70(16): 161102.
[25] SHI R, CAI X B, WANG W J, et al. Single-crystalline vanadium dioxide actuators[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(20): 1900527.
[26] LIU K, LEE S, YANG S, et al. Recent progresses on physics and applications of vanadium dioxide[J]. Materials Today, 2018, 21(8): 875 – 896.
[27] SANG J X, WANG P F, MENG Y F, et al. Simple method preparation for ultrathin VO_2 thin film and control: nanoparticle morphology and optical transmittance[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2019, 58(5): 050917.
[28] BHADESHIA H K D H. Theory of transformations in steels[M]. Boca Raton: CRC Press, 2021.
[29] SHVETS P, DIKAYA O, MAKSIMOVA K, et al. A review of Raman spectroscopy of vanadium oxides[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2019, 50(8): 1226 – 1244.
[30] BAO K, LI X J. Chemical vapor deposition of vanadium dioxide for thermochromic smart window applications[J]. Journal of Inorganic Materials, 2023, 39(3): 233.
[31] SHI R, WU Y H, XIN Z Q, et al. Liquid precursor-guided phase engineering of single-crystal VO_2 beams[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2023, 62(16): e202301421.

（编辑：李晓莉）