

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.06.016

WTe₂在室温下的红外纳米成像

罗国语¹, 代珍兵¹, 李志强¹, 王冲^{2,3}, 晏湖根^{2,3}, 于白茹¹

(1. 四川大学物理学院, 成都 610065; 2. 复旦大学应用表面物理国家重点实验室, 上海 200438;

3. 复旦大学物理学系, 上海 200438)

摘要: 本文用扫描散射近场光学显微镜(s-SNOM)在室温下研究了碲化钨(WTe₂)的近场光学响应, 利用有限偶极模型计算了WTe₂样品与金刚石基底的近场散射信号比, 发现观测结果并不能完全由块材所描述, 从而推测出样品表面具有与块材无耦合作用的WTe₂纳米薄层, 并对在样品边缘发现的很强的亮纹做出了可能的解释. 这个工作为今后对拓扑材料的光学研究提供了参考.

关键词: 碲化钨; 拓扑材料; 近场光学; 边缘态

中图分类号: O469 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2019)06-1093-04

Infrared nanoimaging of WTe₂ at room temperature

LUO Guo-Yu¹, DAI Zhen-Bing¹, LI Zhi-Qiang¹, WANG Chong^{2,3}, YAN Hu-Gen^{2,3}, YU Bai-Ru¹

(1. College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Key Laboratory of Applied Surface Physics, Fudan University, Shanghai 200438, China;

3. Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200438, China)

Abstract: We use scattering scanning near field optical microscopy to investigate the near field response of tungsten ditelluride (WTe₂). By using finite-dipole model we calculate the scattered signal ratio of sample to diamond substrate and find that it cannot be fully described by bulk property. This difference is most likely contributed to the decoupled layer on the bulk WTe₂. Then we give possible explanations to the bright fringe at the sample edge. This work provides a reference for the optical research of topological materials in the future.

Keywords: WTe₂; Topological material; Near field; Edge conductive mode

1 引言

拓扑材料是凝聚态物理的重要研究方向, 其受拓扑保护的手性边缘态有助于自旋电子学的研究与低耗能电子元件的制作, 获得拓扑超导态是寻找马约拉纳费米子的一种途径, 这对于基础物理研究是非常有意义的. 而在众多拓扑材料之中过渡金属硫化物(TMD)WTe₂以其优良的物理性质倍受关

注. WTe₂的块材已被确认为第二类外尔半金属^[1-2], 最近其单层材料被发现在低温下不仅是一种拓扑绝缘体^[3-4], 还可以在电场调控下超导^[5-6]. 双层和三层WTe₂在室温下也具有电场可调的铁电性^[7]. 然而, WTe₂的光学性质暂时缺乏研究. 因此, 本文用扫描散射近场光学显微镜对WTe₂进行纳米成像并研究其红外光学性质.

收稿日期: 2018-12-07

作者简介: 罗国语(1993-), 男, 四川省彭州市人, 硕士生, 研究方向为低维层状材料的光学.

通讯作者: 于白茹. E-mail: yubrsu@126.com

2 实验方法与结果

图 1 是 s-SNOM 的示意图,一束红外光由量子级联激光器(QCL)发射经抛物物镜汇聚以 60° 角入射到针尖和样品的间隙中,通过伪外差的方法获得散射场. 针尖一定的共振频率振动来抑制远场背景噪音,散射场通过锁相放大器解调获得 n 倍于针尖共振频率下的高次谐波信号,也就是实验获得的近场信号.

从原子力显微镜(AFM)下的 WTe_2 薄片在金刚石基底上的形貌(图 2a)和其切线图(图 2b)可以得知,样品的厚度为 50 nm. 图 2c 和图 2d 分别是在 1550 cm^{-1} 红外光下的近场信号与其切线图. 可以看到样品上的光学响应相比较于基底要大些,并且在样品边缘出现亮条纹,这个亮条纹的强度要比之前报道过的在黑磷^[8]或者碲化铋^[9](Bi_2Te_3)材料上发现的类似条纹大得多. 以下将用有限偶极

模型^[10-12]去计算样品与基底的光学响应之比,从而对观察到的振幅极大的亮纹做出可能的解释.

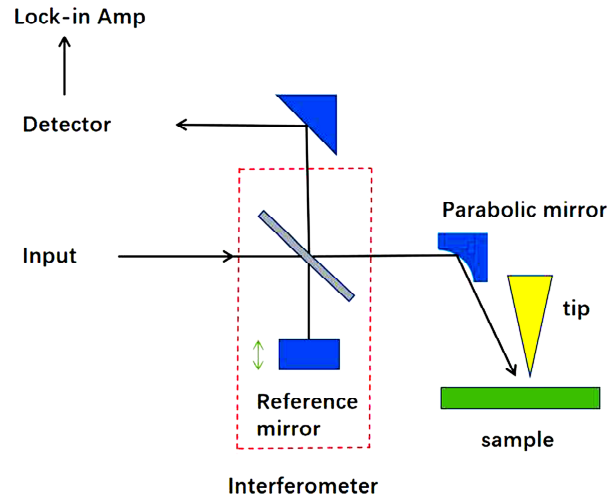


图 1 s-SNOM 的光路图

Fig. 1 Schematic of s-SNOM set-up

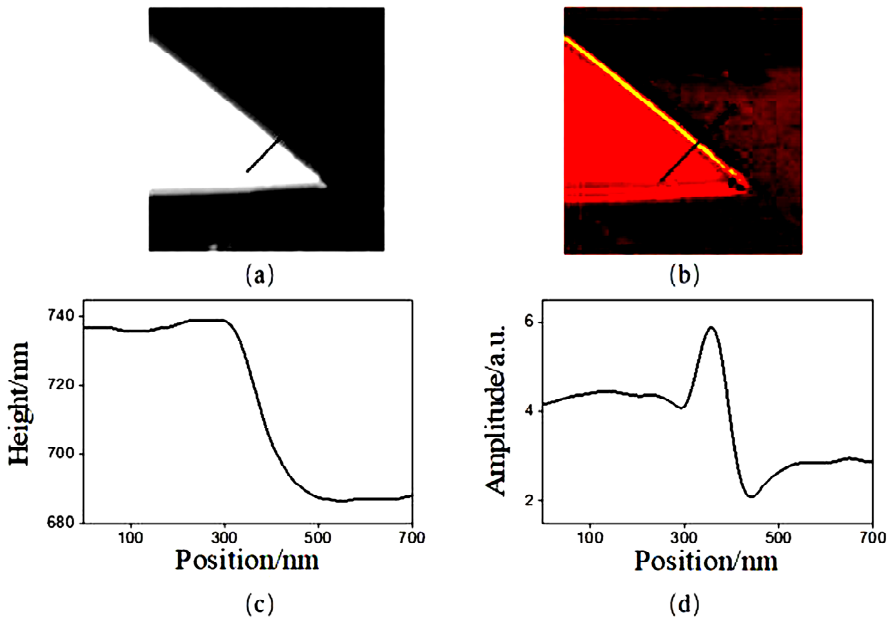


图 2 (a) WTe_2 三角状样品的形貌图;(b) 1550 cm^{-1} 入射光下的近场 3 阶信号;(c)和(d)分别对应(a)和(b)中的黑色切线的数据

Fig. 2 (a) Topography of triangle type WTe_2 ; (b) $n=3$ near field signal at IR frequency of 1550 cm^{-1} ; (c) and (d) refer to the line profile of (a) and (b), respectively

3 计算与讨论

有限偶极模型将针尖看作一个椭圆形的电偶极矩,针尖散射的场 E_s 分别由入射场 E_i 和样品反射场 $r_s E_i$ 组成(图 3 所示), r_s 为样品反射率,散射场 E_s 的大小则为:

$$E_s = \alpha_{\text{eff}} (1 + r_s)^2 E_i \quad (1)$$

其中, α_{eff} 代表有效极化率,并可以由准静态反射系数 $\beta = (\epsilon - 1)/(\epsilon + 1)$ 泰勒展开:

$$\alpha_{\text{eff}} = \sum_{j=0}^{\infty} \alpha_j \beta_j^j \quad (2)$$

在实验中,为了除掉远场背景噪音,针尖以 Ω 的频率(本实验 $\Omega = 234 \text{ kHz}$) 振动,针尖与样品的距离可表示为 $H(t) = A(1 + \cos(\Omega t))$, 远场背景

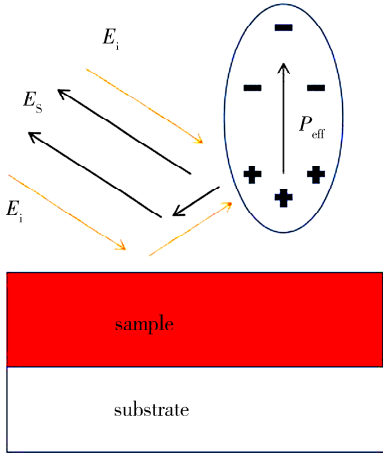


图 3 有限偶极模型下的针尖样品散射示意图

Fig. 3 Illumination of tip-sample scattering in finite-dipole model

噪音对于 $H(t)$ 的变化比较敏感并且几乎呈线性关系, 相反近场信号对于 $H(t)$ 的变化是非线性的, 所以散射信号在高次 $n \geq 2$ 的谐波下(本实验 $n=3$) 主要由近场信号组成. 记高次谐波信号为 U_n , $U_n = s_n \exp(i\varphi_n)$, 其中 s_n 为振幅, φ_n 为相位. U_n 应正比与散射场的 n 阶傅里叶变换, 即:

$$U_n \propto F_n[E_s(H(t))] = \int E_s(H(t)) e^{in\Omega t} dt \quad (3)$$

所以样品与基底的光学信号之比为:

$$\eta_n = s_n / s_{n, \text{ref}} e^{i(\varphi_n - \varphi_{n, \text{ref}})} \quad (4)$$

联立以上方程可得:

$$\eta_n = \frac{(1+r_s)^2}{(1+r_{s, \text{ref}})^2} \sum_{j=0}^{\infty} \beta_j^i \frac{F_n[\alpha_j]}{F_n[\alpha_{\text{eff}, \text{ref}}]} \quad (5)$$

α_{eff} 与针尖的几何构型和介电常数有关, 详细请参考文献[10]. 所以对于公式(5), 只需要知道 r_s 与 $r_{s, \text{ref}}$ 就可以得到 η_n . 对于在一个厚的基底上的薄膜的反射率, 有:

$$r_s = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(2i\xi)}{1 + r_{12} r_{23} \exp(2i\xi)} \quad (6)$$

其中, $\xi = k_2 \Delta$ 是光在薄膜两个表面产生的相位差; $k_i = 2\pi \sqrt{\epsilon_i - \sin^2 \theta} / \lambda$ 是在第 i 个材料中沿针尖方向的波数(θ 是入射角, $i=1, 2, 3$ 分别代表空气、 WTe_2 和金刚石基底). 对于薄膜来说 $\xi \propto \Delta / \lambda \ll 1$, 所以公式(6)可简化为:

$$r_s \approx \frac{r_{12} + r_{23}}{1 + r_{12} r_{23}} \quad (7)$$

r_{ij} 是两种材料 i 和 j 交界面的菲涅尔反射系数, 有:

$$r_{ij} = \frac{k_i \epsilon_j / \epsilon_i - k_j}{k_i \epsilon_j / \epsilon_i + k_j} \quad (8)$$

为了得到样品介电常数 ϵ_2 , 本文用 Drude-

Lorentz 模型来拟合 WTe_2 块材在常温下的红外反射谱(数据来自文献[13]), 得到在 1550 cm^{-1} 的波数下样品的介电常数 $\epsilon_2 = 16 + 55i$, 基底的介电常数 $\epsilon_3 = 5.61 + 0.00015i$, 这样就可以求得 η_n .

图 4 给出了不同样品厚度在 1550 cm^{-1} 波数下的 η_n 的模型结果与实验结果的对比, 它们之间的差异说明了样品的光学性质并不能完全由块材所描述, 它的表面很可能具有与块材无耦合作用的纳米薄层, 这种表面纳米薄层在以前的工作中也有报道[3, 14]. 在图 2b 中所观察到的样品边缘很强的散射峰, 可能存在两种机制, 一是这个薄层甚至是单层存在一个受拓扑保护的边缘态[15], 二是由于针尖与样品的尖端热点效应导致样品边缘产生局域性的等离激元[8]. 这两种可能性还需要进一步的实验来论证.

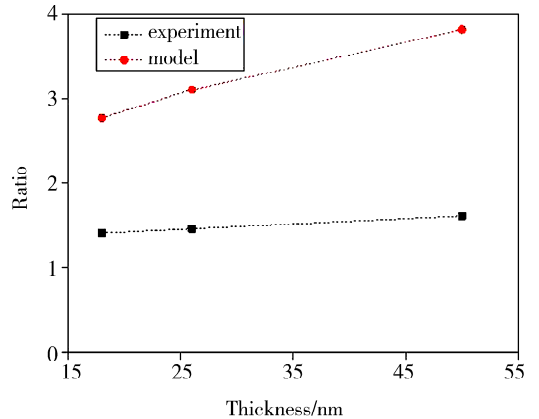


图 4 不同样品厚度下的样品/基底光学信号之比
Fig. 4 The ratio of sample/substrate near field signal with different sample thickness

4 结论

综上所述, 本文用扫描散射近场光学显微镜在室温下研究了 WTe_2 的红外近场光学响应, 利用有限偶极模型计算了 WTe_2 样品与金刚石基底的近场散射信号比. 结果表明, WTe_2 的近场光学性质不能完全由块材所描述, 根据以前的实验研究, 其表面存在一层与块材无耦合作用的 WTe_2 , 这层样品可能存在的边缘态或者由热点效应产生的局域等离激元使得样品边缘红外散射增强, 这一猜测还需要以后的工作来验证.

参考文献:

[1] Di S D, Das P K, Bigi C, et al. Three-dimensional electronic structure of the type-II Weyl semimetal

- WTe₂[J]. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 026403.
- [2] Frenzel A J, Homes C C, Gibson Q D, *et al.* Anisotropic electrodynamics of type-II Weyl semimetal candidate WTe₂ [J]. *Phys Rev B*, 2017, 95: 245140.
- [3] Wu S F, Fatemi V, Gibson Q D, *et al.* Observation of the quantum spin Hall effect up to 100 kelvin in a monolayer crystal [J]. *Science*, 2018, 359: 76.
- [4] Jia Z Y, Song Y H, Li X B, *et al.* Direct visualization of a two-dimensional topological insulator in the single-layer 1T'-WTe₂ [J]. *Phys Rev B*, 2017, 96: 041108.
- [5] Sajadi E, Palomaki T, Fei Z, *et al.* Gate-induced superconductivity in a monolayer topological insulator [J]. *Science*, 2018, 362: 922.
- [6] Fatemi V, Wu S F, Cao Y, *et al.* Electrically tunable low-density superconductivity in a monolayer topological insulator [J]. *Science*, 2018, 362: 926.
- [7] Fei Z Y, Zhao W J, Palomaki T A, *et al.* Ferroelectric switching of a two-dimensional metal [J]. *Nature*, 2018, 560: 336.
- [8] Yohannes A, Sampath G, Zhen L, *et al.* Nanoscopy reveals surface-metallic black phosphorus [J]. *Light: Sci Appl*, 2016, 5:16162.
- [9] Yuan J, Ma W L, Zhang L, *et al.* Infrared nanoimaging reveals the surface metallic plasmons in topological insulator [J]. *ACS Photon*, 2017, 4: 3055.
- [10] Govyadinov A A, Mastel S, Golmar F, *et al.* Recovery of permittivity and depth from near-field data as a step toward infrared nanotomography [J]. *ACS Nano*, 2014, 8: 6911.
- [11] Hillenbrand R, Keilmann F. Complex optical constants on a subwavelength scale [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 3029.
- [12] Govyadinov A A, Amenabar I, Huth F, *et al.* Quantitative measurement of local infrared absorption and dielectric function with tip-enhanced near-field microscopy [J]. *J Phys Chem Lett*, 2013, 4: 1526.
- [13] Homes C C, Ali M N, Cava R J, *et al.* Optical properties of the perfectly compensated semimetal WTe₂[J]. *Phys Rev B*, 2015, 92: 161109.
- [14] Peng L, Yuan Y, Li G, *et al.* Observation of topological states residing at step edges of WTe₂[J]. *Nat Commun*, 2017, 8: 65.
- [15] Shi Y M, Kahn J, Niu B, *et al.* Imaging quantum spin hall edges in monolayer WTe₂ [J]. *Sci Adv*, 2019, 5: 8799.

引用本文格式:

中文: 罗国语, 代珍兵, 李志强, 等. WTe₂在室温下的红外纳米成像[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2019, 56: 1093.

英文: Luo G Y, Dai Z B, Li Z Q, *et al.* Infrared nanoimaging of WTe₂ at room temperature [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2019, 56: 1093.