

自驱动拓扑半金属  $\text{NiTe}_2$  太赫兹探测器赖志鸿<sup>1,2</sup>, 许永姜<sup>1,2</sup>, 徐淮淮<sup>1,2</sup>, 刘远<sup>1,2</sup>, 沈云<sup>1\*\*</sup>, 邓晓华<sup>2\*</sup><sup>1</sup>南昌大学物理与材料学院, 江西 南昌 330031;<sup>2</sup>南昌大学空间科学与技术研究院, 江西 南昌 330031

**摘要** 太赫兹在高速通信、生物医学、无损检测、空间探测和安全防护等众多领域有广阔的应用前景,然而高灵敏室温太赫兹探测器是其亟待解决的难题之一。新兴拓扑材料特殊的光电子学性质为太赫兹探测开辟了新路径。基于第一性原理计算第 II 类狄拉克半金属  $\text{NiTe}_2$  的能带结构及拓扑表面态,采用机械剥离法得到  $\text{NiTe}_2$  纳米片,通过集成电路工艺制备金属- $\text{NiTe}_2$ -金属场效应晶体管,并测量其太赫兹光电流响应。结果表明,室温下  $\text{NiTe}_2$  响应度可达 2.44 A/W,噪声等效功率约为 14.96 pW/Hz<sup>1/2</sup>,在零偏压自驱动下,响应度仍有 2.25 A/W,噪声等效功率下降到 9.55 pW/Hz<sup>1/2</sup>,可与同类探测器媲美,且具有较大的线性度范围,在空气中也具有良好的稳定性。该器件良好的性能对进一步促进室温太赫兹探测器实际应用及集成具有重要意义。

**关键词** 太赫兹; 拓扑半金属; 探测器; 自驱动; 场效应晶体管

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231427

Self-Driven Terahertz Detector Based on Topological Semimetal  $\text{NiTe}_2$ Lai Zhihong<sup>1,2</sup>, Xu Yongjiang<sup>1,2</sup>, Xu Tantan<sup>1,2</sup>, Liu Yuan<sup>1,2</sup>, Shen Yun<sup>1\*\*</sup>, Deng Xiaohua<sup>2\*</sup><sup>1</sup>College of Physics and Materials Science, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China;<sup>2</sup>Institute of Space Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China

**Abstract** Terahertz radiation has broad application prospects in many fields, including high-speed communication, biomedicine, nondestructive testing, space exploration, and security. However, the development of a highly sensitive room-temperature terahertz detector is an urgent issue that must be addressed. The special optoelectronic properties of emerging topological materials open up new paths for terahertz detection. In this study, the band structure and topological surface states of the type II Dirac semimetal  $\text{NiTe}_2$  were calculated based on first-principles calculations.  $\text{NiTe}_2$  nanosheets were obtained by mechanical exfoliation, and metal- $\text{NiTe}_2$ -metal field effect transistors were fabricated using integrated-circuit processing technology. The photoelectric response of the device to terahertz radiation was measured. The results show that the  $\text{NiTe}_2$ -based terahertz detector has a high response rate of 2.44 A/W and a noise equivalent power of approximately 14.96 pW/Hz<sup>1/2</sup>. Particularly, even at a zero bias voltage, the response rate remains 2.25 A/W, and the noise equivalent power decreases to 9.55 pW/Hz<sup>1/2</sup>. These characteristics are better than those of similar terahertz detectors, and the device is stable in air and has excellent linearity within a certain range. These results are of great significance for further promoting the practical application and integration of room-temperature terahertz detectors.

**Key words** terahertz; topological semimetal; detector; self-driving; field effect transistor

## 1 引言

太赫兹波 (THz) 具有光子能量低、穿透性强、宽频谱和高分辨率等优点,在高速通信、生物医学、无损检测、空间探测和安全防护等众多领域有广阔的应用前景<sup>[1-4]</sup>。目前常见商用太赫兹探测器主要有高莱管、热

释电探测器和辐射热测量计等<sup>[5-7]</sup>。但由于需要在液氮温度下运行且样品合成具有一定的复杂性,其器件制造工艺仍具有挑战性。

相较而言,二维材料的发展为克服其中的一些问题提供了途径<sup>[8]</sup>。二维材料具有低维材料独有的新奇性质,其电子的量子行为与其块状母体材料截然不同,

收稿日期: 2023-06-01; 修回日期: 2023-06-02; 录用日期: 2023-08-01; 网络首发日期: 2023-08-11

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(61927813)、国家自然科学基金(61865009)

通信作者: \*Dengxiaohua0@gmail.com; \*\*shenyun@ncu.edu.com

如超高的载流子迁移率、载流子表现出独特的狄拉克费米子行为、反常量子霍尔效应、Klein隧穿效应等众多特异的物理性质<sup>[9-12]</sup>,在太赫兹领域得到了广泛的应用<sup>[13]</sup>。基于石墨烯和黑磷的场效应管实现了太赫兹范围的低能光子检测<sup>[14-15]</sup>,但由于薄层弱的光吸收与不匹配的带隙,其也有光响应性相对较低、响应时间较长等问题存在。目前,一类全新的拓扑量子材料体系的出现给上面的问题带来了转机。在拓扑材料中,Weyl和Dirac半金属值得特别关注,因为它们在受晶体对称性保护的简并带交叉处表现为无质量相对论准粒子。拓扑半金属为探索受拓扑保护的无间隙量子材料中无耗散载流子输运的奇异物理效应提供了理想平台。一些基于拓扑半金属和拓扑绝缘体的太赫兹探测器已经被开发出来,如PtTe<sub>2</sub>、NbIrTe<sub>4</sub>、CoTe<sub>2</sub>、Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>和MnBi<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>等<sup>[16-20]</sup>。然而高灵敏的太赫兹探测器的构建仍然亟待进一步研究。

本文通过第一性原理(QE)计算NiTe<sub>2</sub>的能带结构以及表面态,计算得到NiTe<sub>2</sub>的狄拉克点在费米能级附近,因此在室温下表现出优异的载流子传输,非常有利于构建高性能太赫兹探测器<sup>[21-22]</sup>。然后使用机械剥离法得到NiTe<sub>2</sub>纳米片,随后基于集成电路工艺制备金属-NiTe<sub>2</sub>-金属场效应晶体管,并对其电学性能及太赫兹光电流响应进行测试。结果表明,基于NiTe<sub>2</sub>的太赫兹探测器具有较大的线性度动态范围且栅压无法对其调控,在空气中有着良好的稳定性,在室温下响应度达到2.44 A/W,噪声等效功率约为14.96 pW/Hz<sup>1/2</sup>,在零偏压下仍然有2.25 A/W响应度,噪声等效功率下降到9.55 pW/Hz<sup>1/2</sup>。

## 2 计算与实验

### 2.1 材料的结构和表征

NiTe<sub>2</sub>单晶来自宋凤麒教授的赠送,X射线衍射(XRD)测量是在室温下使用具有Cu K<sub>α</sub>辐射和石墨单色仪的日本理学(Rigaku)LX-57B衍射仪进行的,还进行了摇摆曲线的测量。为了检查样品的实际化学成分,使用配有OXFORD公司ULTIM MAX硅漂移型探测器能谱仪的Thermoscientific Scios2聚焦离子束-电子束双束显微镜,对剥离在硅片上的样品进行能量色散X射线(EDS)光谱分析。在入射电子束能量为20 keV的情况下,通过对表面多点扫描以减少单点的误差,在样品表面选择约10个不同大小的点进行EDS分析,从而确认样品的化学计量,并进行面扫以确定纳米片元素分布是否均匀。使用WITec公司的Alpha300R激光共焦拉曼光谱仪对其进行拉曼表征,光谱由硅衬底520.7 cm<sup>-1</sup>声子模式校准,扫描范围为0~200 cm<sup>-1</sup>,测试精度为1 cm<sup>-1</sup>。

### 2.2 第一性原理计算

NiTe<sub>2</sub>的结构优化和电子结构计算是在基于QE中实施的密度泛函理论(DFT)框架内进行的。使用模

守恒赝势和(PBE)函数进行广义梯度近似(GGA)<sup>[23]</sup>,截止能量为400 eV,布里渊区(BZ)的k点采样使用(16×16×8)的monkhorst-pack网格来计算能带和态密度。Wannier Tools是一种开源软件包,它能够利用生成的实空间Wannier哈密顿量计算材料的各种拓扑性质<sup>[24]</sup>。为了计算体系的表面态,构建原子轨道的Wannier哈密顿量,其中,原子轨道投影选取的是Ni的d轨道和Te的s、p轨道。

### 2.3 结构制备

采用机械剥离法得到NiTe<sub>2</sub>纳米片,其制备过程如下:先夹取适量NiTe<sub>2</sub>块材于蓝膜胶带上,将胶带对叠数次获得薄层NiTe<sub>2</sub>,然后将胶带与沾在玻璃片的聚二甲基硅氧烷(PDMS)紧密接触后分离,随后通过光学显微镜和二维转移平台寻找表面平整均匀的NiTe<sub>2</sub>薄纳米片,并采用定位干法将其转移到预先准备好的SiO<sub>2</sub>/Si的基底上(300 nm SiO<sub>2</sub>,500 μm厚的高阻Si)。然后通过Lift-Off工艺制备器件,在基底上旋涂AZ5214光刻胶,接着使用激光直写进行电极曝光,显影后使用电子束蒸发镀膜蒸镀金属电极10 nm Cr(黏附层)和70 nm Au。最后将剩余光刻胶和上面金属薄膜一起剥离便得到了器件。

### 2.4 器件性能的测量

NiTe<sub>2</sub>的电学性能采用Keythley 4200A半导体参数测试仪进行测试。在室温空气环境下,测量器件的光电性能。本实验使用飞秒激光器产生的脉冲宽度为35 fs的800 nm飞秒激光照射(N-benzyl-2-methyl-4-nitroanilin,BNA)有机晶体上产生的3 THz频谱宽度太赫兹复色光对器件进行测试,通过Gentec-EO公司的THZ-B-DZ系列太赫兹功率计对其功率进行标定。图1是太赫兹光响应探测系统的示意图。

## 3 分析与讨论

NiTe<sub>2</sub>的晶体结构如图2(a)所示,NiTe<sub>2</sub>以中心对称三角晶体结构结晶,具有CdI<sub>2</sub>型结构且属于 $p\bar{3}m1$ 空间群和D<sub>3d</sub>点群,是1T相过渡金属二硫族化合物大家族的一员。从晶格结构角度出发,相邻Te原子层间距为0.343 nm,褶皱原子层通过层间范德瓦耳斯力作用,每个Ni原子由同一层中的6个Te原子八面体配位,相邻层之间形成共价Te-Te键。图2(b)是NiTe<sub>2</sub>的XRD图,可以看出峰强很强而且没有杂峰,晶体表面对应于(001)面,从插图的摇摆曲线可以看出半高宽很窄,表明结晶质量很好。从图2(c)可以看出,NiTe<sub>2</sub>的振动峰出现在83 cm<sup>-1</sup>,对应于E<sub>g</sub>振动峰,位置与之前文献报道结果一致<sup>[25]</sup>。从扫描电子显微镜(SEM)和EDS的元素扫描表征实验可以直观看到,样品材料只含Ni和Te元素且原子比接近1:2[图2(d)],质量较好没有污染。

为了探索NiTe<sub>2</sub>的电子结构特性,计算了沿Γ—

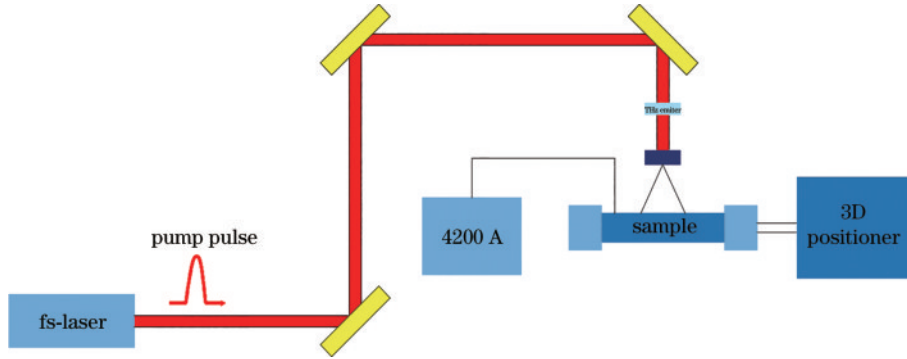


图 1 太赫兹光电探测系统示意图

Fig. 1 Illustration of terahertz optoelectronic detection system

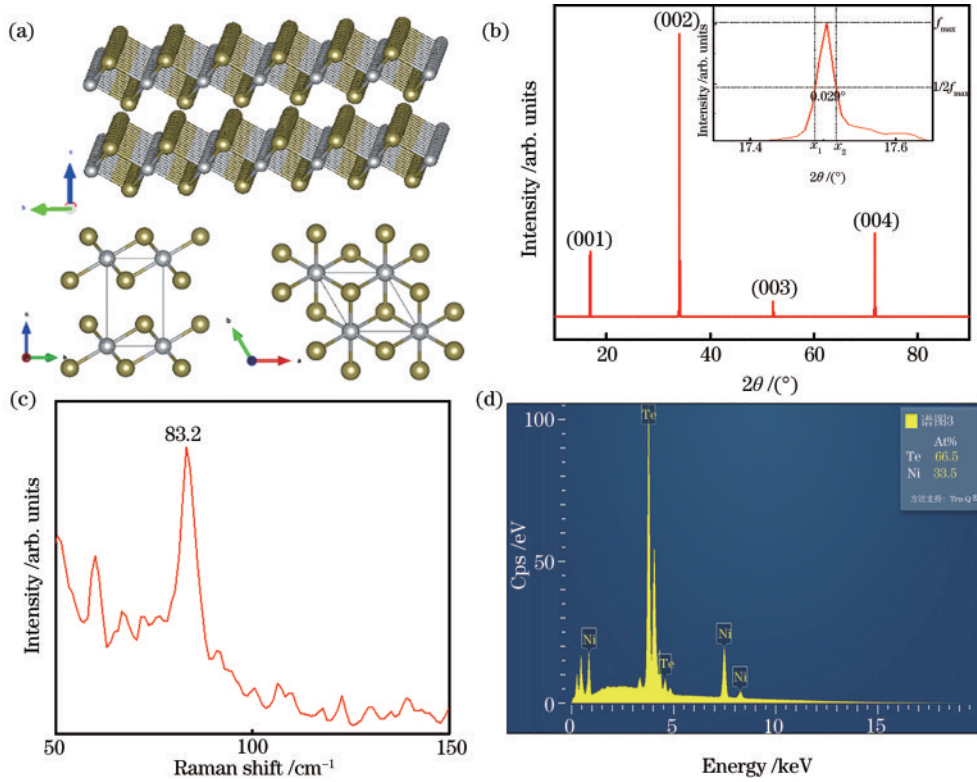


图 2 NiTe<sub>2</sub>的结构和材料表征。(a)过渡金属二硫族化合物NiTe<sub>2</sub>的原子结构;(b)生长的NiTe<sub>2</sub>晶体的X射线衍射图,插图是对应的摇摆曲线;(c)用532 nm激光激发制造的样品收集的拉曼光谱,在83 cm<sup>-1</sup>处观察到的峰对应于E<sub>g</sub>声子;(d)NiTe<sub>2</sub>薄片的能量色散X射线光谱

Fig. 2 Structural and material characterization of NiTe<sub>2</sub>. (a) Atomic structure of the NiTe<sub>2</sub> transition-metal dichalcogenide; (b) X-ray diffraction pattern of NiTe<sub>2</sub> grown single crystals, with the X-ray rocking curve in the inset; (c) Raman spectra collected by exciting the fabricated samples with a 532 nm laser, the observed peak at 83 cm<sup>-1</sup> corresponds to the E<sub>g</sub> phonon; (d) the energy dispersive spectroscopy of the NiTe<sub>2</sub> flakes

$M-K-\Gamma-A-L-H-A$  方向的含自旋轨道耦合的能带结构,如图 3(c)所示。从图 3(a)可以看出,由于导带和价带相交,在  $\Gamma-A$  方向存在能带反转交叉形成强烈倾斜的狄拉克点,狄拉克点非常接近费米能级,约为 20 meV,确认了 NiTe<sub>2</sub> 属于 II 型狄拉克半金属材料,具有较高的载流子迁移率。图 3(b)为 NiTe<sub>2</sub> 的分波态密度图,可以看出, Ni 元素对能带的轨道贡献主要为 s 和 d 轨道的贡献, Te 元素对能带则主要是 p 轨道贡献,而狄拉克点附近主要为 Te 的 5p 轨道贡献。图 3(d)

计算了  $K-\Gamma-K$  方向的表面态谱,上面两个箭头标记了 0.5 eV 处的表面态,结合能位于 -1.4 eV 处带交叉形成狄拉克锥处(下面的箭头)。图 3(e)为理论计算下 NiTe<sub>2</sub> 在 (001) 面的费米等能面,可以看到, NiTe<sub>2</sub> 具有倾斜的狄拉克锥,且其狄拉克点非常接近费米能级。在狄拉克点附近,准粒子的能量激发非常低,因此 NiTe<sub>2</sub> 在低能波段探测中具有巨大的研究价值。

制备了如图 4(a)所示金属-NiTe<sub>2</sub>-金属场效应晶体管以研究 NiTe<sub>2</sub> 的性能,图 4(b)为 NiTe<sub>2</sub> 器件的 I-V



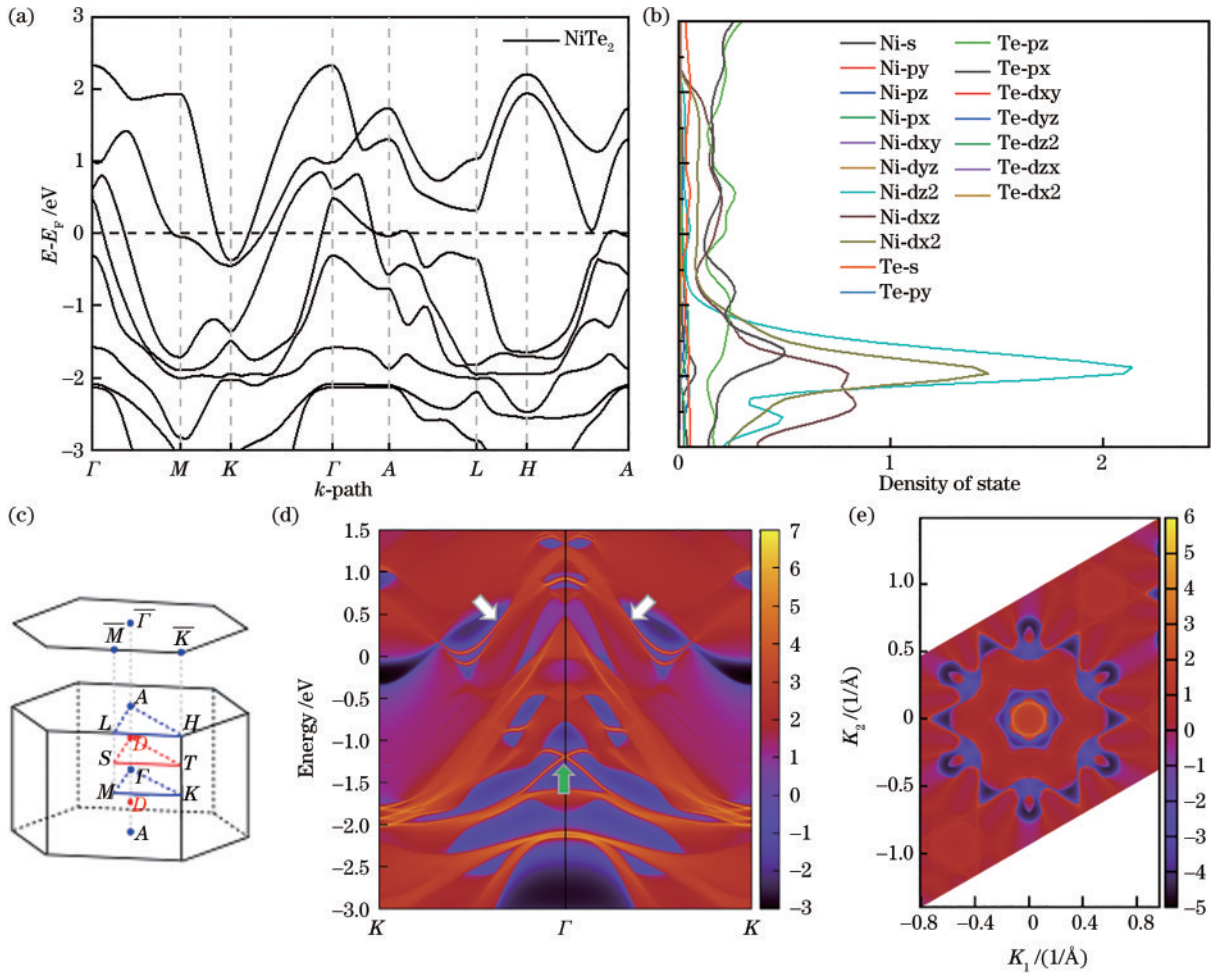


图3 NiTe<sub>2</sub>的能带结构计算。(a)考虑自旋-轨道耦合(SOC)块体的NiTe<sub>2</sub>能带图;(b)NiTe<sub>2</sub>的分波态密度图;(c)块体和投影到(001)表面上的布里渊区;(d)用Wannier函数计算K-Γ-K方向表面带结构;(e)(001)面的费米等能面  
Fig. 3 Band structure calculations of NiTe<sub>2</sub>: (a) Band structure graph of block NiTe<sub>2</sub> considering SOC; (b) density of state of NiTe<sub>2</sub>; (c) brillouin region of bulk and surface projected onto (001); (d) calculated surface state spectrum along the K-Γ-K directions using Wannier functions; (e) fermi surfaces of (001) slab

曲线,基本上是过原点的一条直线,说明制备的器件有着良好的欧姆接触,而且可以看到即使在空气环境中暴露一个月,器件仍然稳定,电阻几乎没有变化。图4(c)显示了NiTe<sub>2</sub>在3种固定偏压下随栅压变化的I<sub>ds</sub>-V<sub>g</sub>曲线(栅压为背栅),可以看到,I<sub>ds</sub>-V<sub>g</sub>曲线几乎为3条平行的直线,不难看出栅压不会影响NiTe<sub>2</sub>的电学性质。图4(d)是在不同栅压下NiTe<sub>2</sub>场效应管随偏压变化的I<sub>ds</sub>-V<sub>ds</sub>曲线,这进一步验证了栅压不可调控NiTe<sub>2</sub>的电学性能。

为了得到器件对太赫兹光的响应,对上述器件进行了测试。图5(a)是器件的光学显微图,图5(b)是图5(a)对应的电极结构参数图,使用的是对数周期天线(沟道长度为4 μm,小于太赫兹光斑尺寸),可以有效诱导类表面等离子激元,将入射交变电磁波转换为局部振荡电场。通过800 nm飞秒激光照射在BNA有机晶体上产生的3 THz频谱宽度的复色太赫兹波对器件进行照射,在室温空气环境下测试器件的太赫兹光响应性能。图5(c)、(d)是在0.51969 mW/cm<sup>2</sup>太赫兹功

率密度下,分别在0 V和0.01 V偏压下NiTe<sub>2</sub>探测器的光响应图。不难看出:即使在0 V偏压下,也有着很好的光响应;通过施加偏压,光电流进一步增大,在0.01 V的偏压下响应度达到2.44 A/W,噪声等效功率为14.96 pW/Hz<sup>1/2</sup>。响应度通过 $R_A = \frac{I_{ph}}{P_{in}S_a}$ 计算,其中,I<sub>ph</sub>为光电流,P<sub>in</sub>是太赫兹功率密度,S<sub>a</sub>为器件的有效面积(因太赫兹波长大于器件尺寸,所以器件有效面积包含沟道面积和天线的面积)。噪声等效功率

$$(NEP) \text{ 使用 } P_{NEP} = \frac{\nu_n}{R_A} = \frac{\sqrt{(4k_b T / r + 2qI_d)}}{R_A} \text{ 计算, 其}$$

中, $\nu_n = (\nu_i^2 + \nu_b^2)^{1/2} = \sqrt{(4k_b T / r + 2qI_d)}$ , $\nu_n$ 是噪声电流的均方根,R<sub>A</sub>是器件的电流响应率,k<sub>b</sub>是玻尔兹曼常数,T是开尔文温度,r是器件的电阻,q是基本电荷,I<sub>d</sub>是偏置电流。器件的噪声主要为约翰孙-尼奎斯特噪声(V<sub>i</sub>)和由偏置电流引起的散粒噪声(V<sub>b</sub>)。在0 V偏

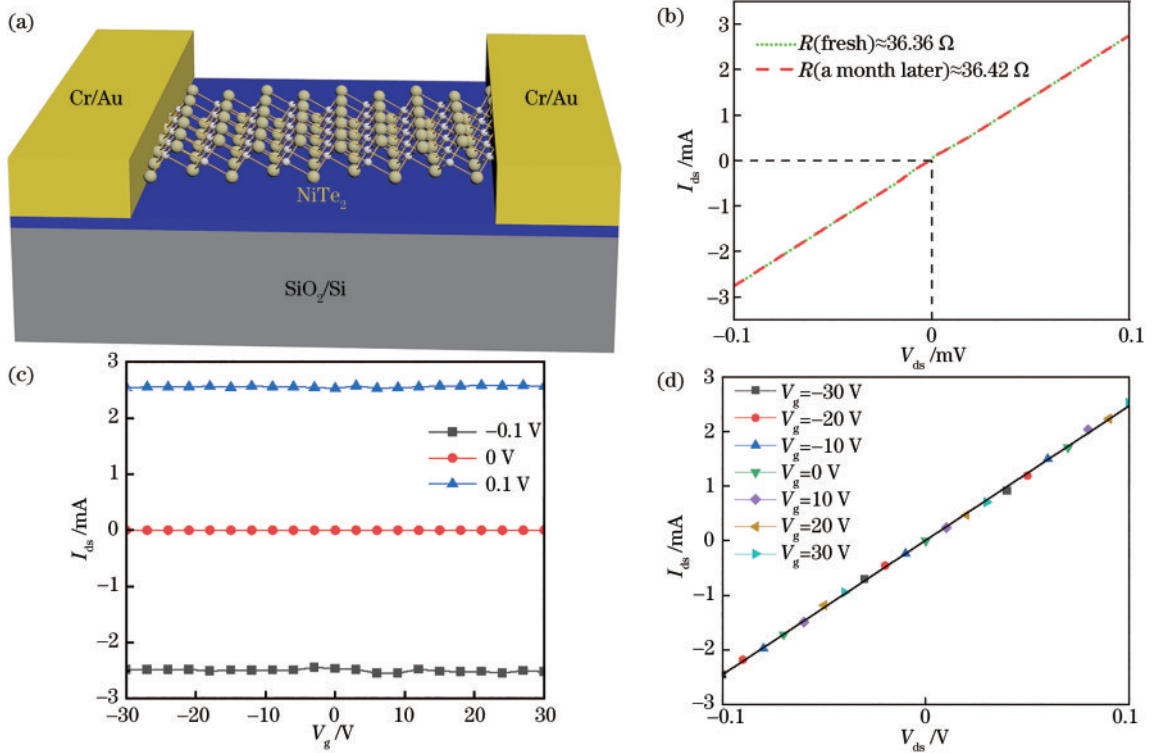


图 4 器件结构示意图及 NiTe<sub>2</sub> 的电学特性。(a) NiTe<sub>2</sub> 的场效应晶体管结构示意图; (b) 在自然环境中当天和一个月后器件的伏安特性曲线; (c) 固定偏压下的 I<sub>ds</sub>-V<sub>g</sub> 曲线; (d) 固定栅压下的 I<sub>ds</sub>-V<sub>ds</sub> 曲线

Fig. 4 Schematics of device structure and electrical properties of NiTe<sub>2</sub>: (a) Schematic diagram of NiTe<sub>2</sub> field-effect transistor device; (b) the voltammetry curves of the device in natural environment on the same day and one month later; (c) I<sub>ds</sub>-V<sub>g</sub> curves at fixed bias; (d) I<sub>ds</sub>-V<sub>ds</sub> curves under fixed gate pressure

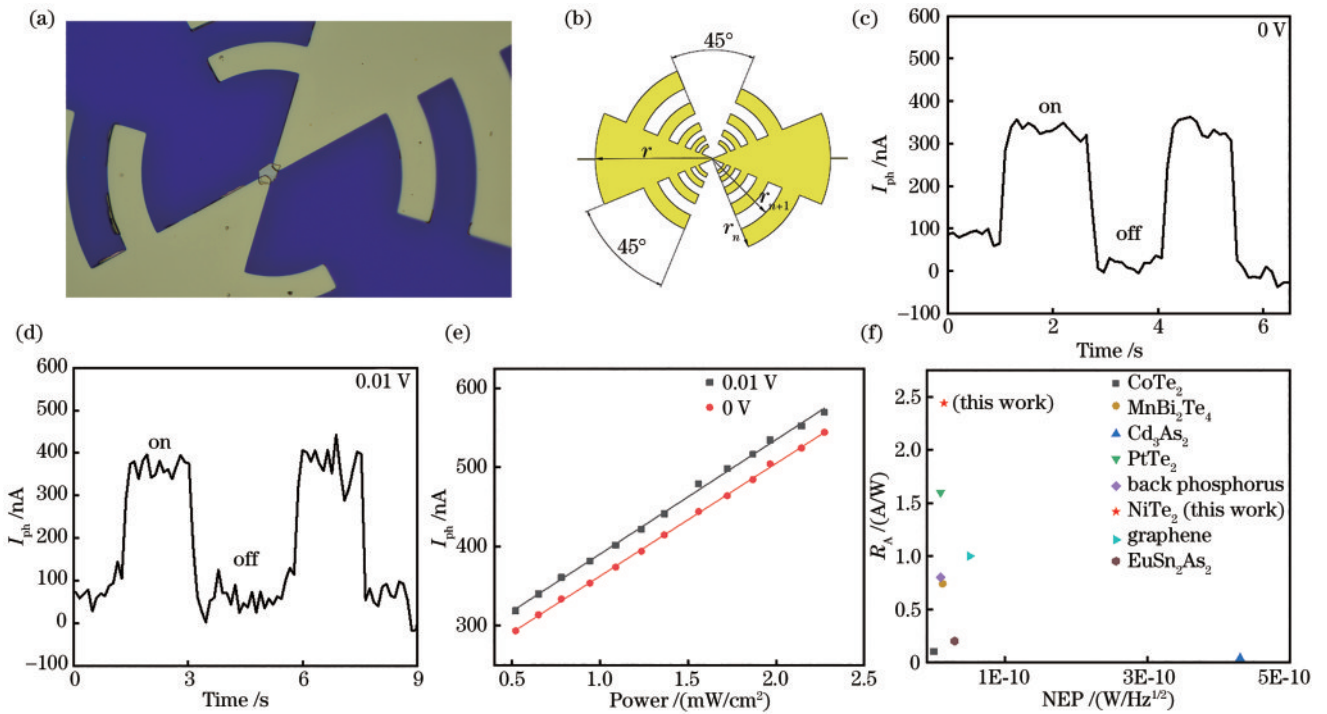


图 5 器件结构及太赫兹光电特性。(a) NiTe<sub>2</sub> 的场效应晶体管的光学显微镜图片; (b) 对数天线结构参数; (c)(d) 器件在不同偏置电压下的太赫兹光电流响应; (e) 不同偏压下 NiTe<sub>2</sub> 光电流随辐射功率的变化; (f) 不同二维材料的响应度和噪声等效功率的比较

Fig. 5 Structure of device and terahertz photoelectric characteristics: (a) Optical microscope picture of a field-effect transistor for NiTe<sub>2</sub>; (b) logarithmic antenna structure parameters; (c)(d) terahertz photocurrent response of the device at different bias voltages; (e) radiation power-dependent photocurrent of NiTe<sub>2</sub> at different bias voltages; (f) the comparison of responsivity and noise equivalent power of different two-dimensional materials

压时,该器件的响应度高达 2.25 A/W,噪声等效功率约为 9.55 pW/Hz<sup>1/2</sup>,说明该器件允许以最小的能量自驱动光电探测,因此可有效抑制暗电流,这为实现超灵敏光电探测和超低功耗的器件提供了可能。

图 5(e)显示了 NiTe<sub>2</sub>探测器分别在 0 V 和 0.01 V 偏压下光电流与太赫兹功率密度的依赖关系。可以明显看到,在一定范围内,无论是否施加偏置电压,光电流与太赫兹功率密度呈正相关线性关系,且具有较好的线性动态范围。图 5(f)为不同二维材料的响应度和噪声等效功率的比较,表 1 是详细的数据,可以看出,所使用材料具有高的响应度和低的噪声等效功率,进一步证明了所提探测器有着优越的性能和巨大的应用前景。

表 1 已报道的二维材料太赫兹探测器在室温下的性能

Table 1 Performance comparison of the reported 2D materials terahertz detectors at room temperature

Material	Responsivity /(A/W)	NEP /(W/Hz <sup>1/2</sup> )
NiTe <sub>2</sub> (this work)	2.44	14.96×10 <sup>-12</sup>
CoTe <sub>2</sub> <sup>[18]</sup>	0.1	1×10 <sup>-12</sup>
MnBi <sub>2</sub> Te <sub>4</sub> <sup>[20]</sup>	0.74	13×10 <sup>-12</sup>
PtTe <sub>2</sub> <sup>[16]</sup>	1.6	10×10 <sup>-12</sup>
Black phosphorus <sup>[21]</sup>	0.057	1000×10 <sup>-12</sup>
Graphene <sup>[28]</sup>	0.148	51×10 <sup>-12</sup>
Cd <sub>3</sub> As <sub>2</sub> <sup>[29]</sup>	0.04	430×10 <sup>-12</sup>
EuSn <sub>2</sub> As <sub>2</sub> <sup>[30]</sup>	0.2	30×10 <sup>-12</sup>

在低光子能量(meV 级)的太赫兹光激发下,常见半导体材料难以通过光伏效应或光电导效应产生有效的载流子,而 II 型狄拉克半金属 NiTe<sub>2</sub>却能有极好的光响应,我们认为主要是基于电子带内跃迁过程和天线结构的增强,同时通过对称天线的设计排除了光热电效应的可能。NiTe<sub>2</sub>的倾斜狄拉克锥在极其靠近费米能级(约 20 meV)的位置,具有一个较大的动量空间且此处较大的态密度允许更多光子带内吸收。在太赫兹光照下,得益于非线性霍尔效应(nonlinear Hall effect)<sup>[26-27]</sup>,NiTe<sub>2</sub>自旋动量锁定的表面电荷载流子能打破空间反演对称性产生非对称斜散射,产生净载流子移动,表现出直流信号。当给器件施加一个偏置电压后,在振荡电磁场产生的强局域场作用下产生的非平衡载流子沿着沟道单向加速流动,使光电流显著提高。

## 4 结 论

本研究对材料进行基本性质的表征并通过第一性原理计算得到 NiTe<sub>2</sub>的能带结构和表面态。然后,采用机械剥离法得到 NiTe<sub>2</sub>纳米片,随后通过 Lift-Off 工艺制备基于 NiTe<sub>2</sub>的场效应晶体管,对其电学性能进行测试,并分析其在太赫兹探测应用的可能。1T 相的 NiTe<sub>2</sub>是典型的二类狄拉克半金属。其狄拉克点非常

接近费米能级,狄拉克锥在动量空间倾斜且在狄拉克锥附近有着较大的动量空间和较大的态密度,非常有利于光子的带内吸收,并且有着优异的载流子输运性质。此外,结合天线结构的增强吸收特性,在室温空气环境下最终实现 2.44 A/W 高响应度和低至 14.96 pW/Hz<sup>1/2</sup>的噪声等效功率,特别是,器件在 0 V 偏压下仍有 2.25 A/W 响应度,且噪声等效功率进一步下降至 9.55 pW/Hz<sup>1/2</sup>。而且,该器件在空气中十分稳定,在一定范围有着极佳的线性度,实现了自驱动、高灵敏的光电转化。但机械剥离法带来的厚度等不确定性让人遗憾,如果能够实现晶圆级的生长,大规模集成阵列化的应用将成为现实<sup>[31]</sup>。研究结果表明,基于二类狄拉克半金属 NiTe<sub>2</sub>太赫兹光电探测器在非制冷环境下高性能自驱动太赫兹探测和光电信号转换方面具有广阔的应用前景。同时,近些年超表面和连续域束缚态(BIC)增强局域场束缚广泛应用于太赫兹领域,如果能将其与 NiTe<sub>2</sub>结合起来,器件性能将会得到进一步的提升<sup>[32-33]</sup>。

## 参 考 文 献

- [1] Kawase K, Ogawa Y, Watanabe Y, et al. Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints[J]. Optics Express, 2003, 11(20): 2549-2554.
- [2] Chan W L, Deibel J, Mittleman D M. Imaging with terahertz radiation[J]. Reports on Progress in Physics, 2007, 70(8): 1325-1379.
- [3] Liu H B, Zhong H, Karpowicz N, et al. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(8): 1514-1527.
- [4] Nagatsuma T, Ducournau G, Renaud C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics[J]. Nature Photonics, 2016, 10(6): 371-379.
- [5] Sizov F F, Reva V P, Golenkov A G, et al. Uncooled detectors challenges for THz/sub-THz arrays imaging[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2011, 32(10): 1192-1206.
- [6] Paschos G G, Liew T C H, Hatzopoulos Z, et al. An exciton-polariton bolometer for terahertz radiation detection [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 10092.
- [7] Klocke D, Schmitz A, Soltner H, et al. Infrared receptors in pyrophilous (fire loving) insects as model for new un-cooled infrared sensors[J]. Beilstein Journal of Nanotechnology, 2011, 2: 186-197.
- [8] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.
- [9] Elias D C, Gorbachev R V, Mayorov A S, et al. Dirac cones reshaped by interaction effects in suspended graphene [J]. Nature Physics, 2011, 7(9): 701-704.
- [10] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene [J]. nature, 2005, 438(7065): 197-200.



- [11] Zhang Y B, Tan Y W, Stormer H L, et al. Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene[J]. *Nature*, 2005, 438(7065): 201-204.
- [12] Katsnelson M I, Novoselov K S, Geim A K. Chiral tunnelling and the Klein paradox in graphene[J]. *Nature Physics*, 2006, 2(9): 620-625.
- [13] Wei J, Zang Z G, Zhang Y B, et al. Enhanced performance of light-controlled conductive switching in hybrid cuprous oxide/reduced graphene oxide ( $\text{Cu}_2\text{O}/\text{rGO}$ ) nanocomposites[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(5): 911-914.
- [14] Britnell L, Gorbachev R V, Jalil R, et al. Field-effect tunneling transistor based on vertical graphene heterostructures[J]. *Science*, 2012, 335(6071): 947-950.
- [15] Viti L, Hu J, Coquillat D, et al. Black phosphorus terahertz photodetectors[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(37): 5567-5572.
- [16] Xu H, Guo C, Zhang J Z, et al. PtTe<sub>2</sub>-based type-II Dirac semimetal and its van der Waals heterostructure for sensitive room temperature terahertz photodetection[J]. *Small*, 2019, 15(52): 1903362.
- [17] Zhang J T, Zhang T N, Yan L, et al. Colossal room-temperature terahertz topological response in type-II weyl semimetal NbIrTe<sub>4</sub>[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(42): 2204621.
- [18] Hu Z, Zhang L B, Chakraborty A, et al. Terahertz nonlinear hall rectifiers based on spin-polarized topological electronic states in 1T-CoTe<sub>2</sub>[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(10): 2209557.
- [19] Tang W W, Politano A, Guo C, et al. Ultrasensitive room-temperature terahertz direct detection based on a bismuth selenide topological insulator[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(31): 1801786.
- [20] Guo C, Chen Z, Yu X B, et al. Ultrasensitive anisotropic room-temperature terahertz photodetector based on an intrinsic magnetic topological insulator MnBi<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>[J]. *Nano Letters*, 2022, 22(18): 7492-7498.
- [21] Xu H, Fei F C, Chen Z, et al. Colossal terahertz photoresponse at room temperature: a signature of type-II Dirac fermiology[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(3): 5138-5146.
- [22] Zhang L B, Chen Z, Zhang K X, et al. High-frequency rectifiers based on type-II Dirac fermions[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 1584.
- [23] Perdew J P, Burke K, Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 77(18): 3865-3868.
- [24] Mostofi A A, Yates J R, Lee Y S, et al. wannier90: a tool for obtaining maximally-localised Wannier functions [J]. *Computer Physics Communications*, 2008, 178(9): 685-699.
- [25] Song B, He C D, Niu S, et al. Observation of nodal-line semimetal with ultracold fermions in an optical lattice[J]. *Nature Physics*, 2019, 15(9): 911-916.
- [26] Du Z Z, Lu H Z, Xie X C. Nonlinear Hall effects[J]. *Nature Reviews Physics*, 2021, 3(11): 744-752.
- [27] Ferreira A, Rappoport T G, Casalilla M A, et al. Extrinsic spin Hall effect induced by resonant skew scattering in graphene[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(6): 066601.
- [28] Qin H, Sun J D, Liang S X, et al. Room-temperature, low-impedance and high-sensitivity terahertz direct detector based on bilayer graphene field-effect transistor[J]. *Carbon*, 2017, 116: 760-765.
- [29] Yao X M, Zhang S X, Sun Q A, et al. Thickness-controlled three-dimensional Dirac semimetal for scalable high-performance terahertz optoelectronics[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(6): 1689-1697.
- [30] Wang Y D, Wei X Z, Cai H W, et al. Enhanced thermal transportation across an electrostatic self-assembly of black phosphorene and boron nitride nanosheets in flexible composite films[J]. *Nanoscale*, 2022, 14(27): 9743-9753.
- [31] Dong Z, Yu W Z, Zhang L B, et al. Wafer-scale patterned growth of type-II Dirac semimetal platinum ditelluride for sensitive room-temperature terahertz photodetection[J]. *InfoMat*, 2023, 5(5): e12403.
- [32] Fan J X, Li Z L, Xue Z Q, et al. Hybrid bound states in the continuum in terahertz metasurfaces[J]. *Opto-Electronic Science*, 2023, 2(4): 230006.
- [33] 丛龙庆. 主动式太赫兹超材料器件综述[J]. *中国激光*, 2021, 48(19): 1914003.
- Cong L Q. Active terahertz metadevices[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(19): 1914003.