

基于二维碲烯的太赫兹光电探测器

黄文超^{1*}, 张凯旋², 李云霞¹, 王林^{3*}

(1. 兰州交通大学 数理学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 东华大学 理学院, 上海 201620;

3. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 制备了金属-碲烯-金属的太赫兹光电探测器, 实现了毫米波-太赫兹波下的光探测。结果表明, 基于对数天线碲烯的太赫兹光电探测器在零偏压下具有较高的光响应率(40 mA/W, 0.12 THz), 响应时间为 8 μ s, 噪声等效功率(NEP)为 4 pW \cdot Hz^{-0.5}。研究结果为高性能室温太赫兹光探测提供了一种新的发展路径。

关键词: 二维材料; 碲烯; 太赫兹光探测

中图分类号: TN386 文献标识码: A

Terahertz photodetector based on two-dimensional tellurene

HUANG Wen-Chao^{1*}, ZHANG Kai-Xuan², LI Yun-Xia¹, WANG Lin^{3*}

(1. School of Mathematics and Physics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. College of Science, Donghua University, Shanghai 201620, China;

3. Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A metal-tellurene-metal terahertz photodetector, and realized optical detection under millimeter wave-terahertz wave are fabricated. The results show that the terahertz photodetector based on logarithmic antenna tellurene has a high optical responsivity (40 mA/W, 0.12 THz) under zero bias, a response time of 8 μ s, and a noise equivalent power (NEP) of 4 pW \cdot Hz^{-0.5}. This research results provide a new development path for high-performance room temperature terahertz optical detection.

Key words: two-dimensional materials, tellurene, terahertz photodetection

PACS: 41. 20. Jb, 78. 20. Bh, 73. 20. Mf, 42. 25. Bs

引言

太赫兹波 (Terahertz wave) 的频率范围是 0.1~10 THz, 对应的光子能量为 0.414~41.4 meV, 介于电磁波谱中微波和红外之间。太赫兹波有很强的穿透性, 能穿透云雾、烟雾和沙尘等, 且传输损耗较低。近些年, 随着微纳加工技术的高速发展, 灵敏快速的太赫兹源和探测器也迎来了蓬勃发展, 推动了太赫兹技术的应用, 尤其在太赫兹成像检测、下一代 6G 通讯技术、国防安全等领域具有重要的应用前景^[1-3]。然而, 太赫兹低能量的光子特性, 对于大多数传统半导体材料而言几乎是透明的, 仍然迫切需要新的材料体系支持研究太赫兹技术。自石墨

烯研究以来掀起了二维材料在各个领域的研究热潮, 对于光电探测器而言, 石墨烯的零带隙的能带结构, 光响应波段可以从紫外拓宽到太赫兹波段, 这为太赫兹光电探测器的发展提供了新的方向。目前, 各种类型的太赫兹光电探测器已经被报道出来, 如基于拓扑半金属材料 PtTe₂、PdTe₂ 和 NiTe₂^[4-6] 等具有非线性光学效应的太赫兹探测器, 基于超短沟道黑磷^[7]、SnSe₂^[8] 等半导体材料的太赫兹光电探测器。然而, 拓扑半金属材料在偏压下产生的大的暗电流会造成信号的湮没。此外, 黑磷的直接带隙结构、各向异性和高迁移率^[9-11] 等优异的性质, 在红外-太赫兹探测研究领域扮演着重要的角色, 但是其空气环境中不稳定性始终是光电探测器实际应

用的障碍。随着研究的推进,基于二维材料太赫兹光电探测器在发展中遇到了新的瓶颈,仍然需要不断探究其他二维材料在该领域的发展。

近几年,碲烯(Te)作为一种新型的二维材料,因其带隙窄且可调成为了探测短波长到长波长范围的候选材料,并且碲的空气稳定性和室温环境下超高的载流子迁移率使其成为用于光电探测器领域的具有应用潜力的材料^[12-14]。最近的工作表明, Javey 等人通过溶液合成法得到二维碲纳米片用于短波红外的光电探测器,通过调控 Al_2O_3 介质层的厚度,峰值响应率可从 $1.4 \mu\text{m}$ (13 A/W) 到 $2.4 \mu\text{m}$ (8 A/W),截止波长为 $3.4 \mu\text{m}$ ^[15]。这些结果证明, Te 纳米片可覆盖整个近红外波段的光电探测。Wang 等人研究了二维碲纳米片的高性能场效应晶体管,控制沟道长度为 $3 \mu\text{m}$ 时,开关比约为 10^5 ,室温下的场效应迁移率能达到 $700 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$,同时验证了二维碲优异的空气稳定性^[16]。此外, Hu 等人利用二维碲材料的优良特性实现了中红外高性能偏振探测。碲烯独特的各向异性晶体结构在 $2.3 \mu\text{m}$ 激发下偏振比为 8,更长的波长激发下偏振比能够超过 10,并且能够有效实现在散射环境下对比度增强的成像应用^[17]。

然而,关于碲在太赫兹波段的研究相对很少。为此,我们利用碲作为沟道材料制备了毫米波-太赫兹波段的光电探测器,工作频率范围为 $0.02\sim 0.12 \text{ THz}$,在该波段范围内具有稳定、快速的光响应,高载流子迁移率和低的有效质量为实现高性能光探测提供了前提,光电探测器的峰值响应率为 40 mA/W (0.12 THz)。

1 实验与方法

实验采用高阻硅衬底(300 nm 的 SiO_2 薄膜)达到减少太赫兹波反射的目的。利用蓝膜胶带将块体的碲晶体通过机械剥离的方法把材料转移到衬底上。在光学显微镜下寻找合适大小且结构完好的材料作为器件沟道的光敏材料,然后通过紫外光刻工艺,显影定形出源极和漏极图案,最后采用电子束蒸发工艺沉积 Cr/Au ($10 \text{ nm}/90 \text{ nm}$) 作为金属电极接触,器件沟道长度为 $6 \mu\text{m}$ 。实验上对器件进行了电学和光学的测试,使用 4200 半导体参数分析仪测量器件的输出特性曲线;信号测试系统采用微波源、倍频器、前置放大器和锁相放大器组成的太赫兹源链路,然后将太赫兹光照射到器件上,测量了经过锁相放大后的光信号。基于安捷伦

E8257D 的微波源可以产生 $0.02\sim 0.04 \text{ THz}$ 的连续频率电磁信号输出,然后连接耿氏振荡器的三倍频器,可以产生 $0.08\sim 0.12 \text{ THz}$ 的连续太赫兹辐射,采用锁相放大的方法可以提高器件的信噪比。

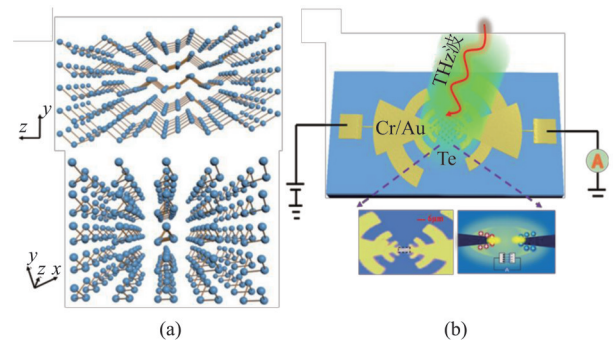


图1 (a)碲烯的晶体结构图,(b)基于碲烯太赫兹探测器示意图及沟道处的光场分布

Fig. 1 (a) Crystal structure diagram of tellurene, (b) Schematic diagram of tellurene-based terahertz detector and optical field distribution at the channel

2 结果与讨论

碲的晶体结构是由 Te 原子组成的三角形螺旋结构,并且通过范德华力堆积在一起,如图 1(a)显示了二维碲的原子结构图。图 1(b)显示了基于碲烯的太赫兹光电探测器的结构示意图,其中采用了中心对称的对数(log)天线作电极接触,构造了适合电学互连的金属-碲烯-金属微结构,log 天线既当作源漏读出电极也能对太赫波进行调控。结构示意图的下方展示了器件的光学显微图片和 log 天线对太赫兹波的操控。太赫兹 log 天线在光电探测器中扮演着重要角色,既能够起到缓冲自由空间的不匹配作用,还能够提高太赫兹的光场,将太赫兹光强耦合到材料表面。通过材料与光强相互作用,能够有效地激发非平衡载流子,进而达到光电转换的目的。理论分析方面采用时域有限差分(FDTD)的方法对天线进行仿真和优化,天线结构是远小于工作的波长,因此能够有效的对太赫兹波进行光电转换,并进一步提升局域光场强度。

图 2(a)显示了基于碲光电探测器的 $I-V$ 曲线,器件的电阻在 435Ω 左右,良好的欧姆接触条件是实现太赫兹光电探测器稳定且快速工作的前提条件。进一步,为了详细的研究基于碲烯太赫兹探测器的室温光电流响应,课题组采集了器件在不同辐射频率下的响应特性,结果发现只有在太赫兹波电场极化平行于天线的轴线的情况下,能够得到器

件最大的光响应。接下来,测量了在不加外置偏压条件下,通过载波频率扫普,器件在 0.02~0.04 THz 范围的光响应,如图 2(b)所示。此外,图 2(c)显示了器件在 0.08~0.12 THz 范围的光响应。从图 2(b-c)可以看出,器件在 0.02~0.12 THz 波段具有宽频响应,这得益于金属 log 天线结构,在几个频率处对太赫兹波具有大的共振增益导致了明显的响应峰。优异的光电特性表明了 Te 作为一种未来室温太赫兹探测器材料的潜力。我们还测量了在 0.04 THz 和 0.12 THz 的频率值处不同偏压下的光响应变化,如图 2(d)所示。在外加偏置电压的条件下,探测器的光电流明显增强。由于 Te 材料具有合适的带隙和高的热电因子^[18-19],能够有利于热电子的产生和光热电转换。机械剥离的材料形状的不规则性和工艺过程的不可控性,导致整个器件结构的不完全对称,分析后,认为通过热电子作用的探测机制,将沟道材料吸收的光子转换为电信号^[20]。为了进一步验证碲烯太赫兹光电探测器的性能,在没有偏压的室温环境下测量了不同入射功率密度的光信号曲线(图 2(e))。同时,图 2(f)给出了功率依赖性光电流曲线,偏置电压固定在-50mV, 0mV, 50mV,光电流随着光功率的增强几乎为线性变化,表明该探测器件有大的动态范围。为了表征器件在太赫兹波下光电转化的灵敏度,课题组还计算了在 0.08~0.12 THz 频段的最大响应率。对应是从锁相放大器输出的信号中提取了光电流:

$$I_{ph} = 2\pi\sqrt{2}V_{LIA}/4G \quad (1)$$

其中 G 为前置放大器的增益,单位是 V/A。因此,响应率公式:

$$R_A = I_{ph}/(P_{Thz} \cdot S_a) \quad (2)$$

其中 I_{ph} 为器件的光电流值, P_{Thz} 是太赫兹光的入射功率, S_a 为器件有效的光辐射面积。考虑到实验中器件的有效面积 $S_b = 500 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ 在 0.12 THz 时远小于衍射极限区域 $S_a = \lambda^2/4\pi$, 在响应率计算时将衍射极限区域作为有效面积。器件在 0.08~0.12 THz 的峰值响应率为 40 mA/W。

进一步记录了器件在零偏置电压下的信号波形,如图 3(a)所示,从中可以发现,当太赫兹波开启时,输出电流瞬间变大。光在关的状态下的电流对应波形最低点和光在开状态下的电流对应波形最高点,两者电流的差值对应光电流的大小。图 3(b)展示了基于碲光探测器在 100 Hz 到 10 kHz 的频率范围内表现出较小的光电流降低,证实了器件的

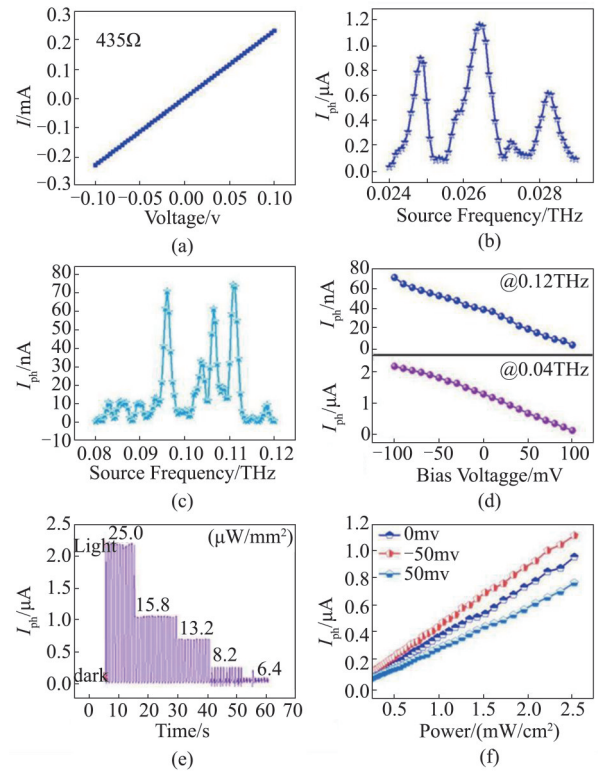


图 2 (a) 器件的传输特性曲线, (b) 0.02-0.04 THz 频率下光响应曲线, (c) 0.08~0.12 THz 频率下光响应曲线, (d) 偏置电压依赖响应, (e) 不同入射功率密度的光电流曲线, (f) 不同偏置电压下光电流的功率依赖性。

Fig. 2 (a) The transmission characteristic curve of the device, (b) Photocurrent curve at 0.02~0.04 THz frequency, (c) Photocurrent curve at 0.08~0.12 THz frequency, (d) The bias voltage dependence of photocurrent, (e) Photocurrent curve with different incident power densities, (f) The power dependence of photocurrent under different bias voltages.

高灵敏的探测能力。此外,响应时间是光电探测器对辐射信号变化的响应快慢的参数,是衡量光电探测器的一个重要指标,快速的响应时间能够保证器件的实际应用。通常,默认取信号幅值的 10% 变到 90% (90% 变到 10%) 的这段时间为响应上升时间 (响应下降时间), 器件的上升时间为 8 μs , 下降时间为 10 μs , 如图 3(c) 所示。图 3(d) 表明了偏置电压下器件的波形图, 并且保持了很好的波形。通过采用估算的方法计算出了噪声等效功率 (NEP), 在分析测试系统中, 只考虑焦耳热噪声 (N_j) 和暗电流引起的噪声^[21-22]。因此, $v_n = (v_i^2 + v_b^2)^{1/2} = (4k_b T/r + 2qI_d)^{1/2}$, 其中, k_b 是玻尔兹曼常数, T 是热力学温度, r 是器件电阻, q 是元电荷电量, I_d 是暗电流。最终计算得到 NEP 的值是 4 pW/Hz^{1/2}。

目前二维材料太赫兹光电探测器的单一性能

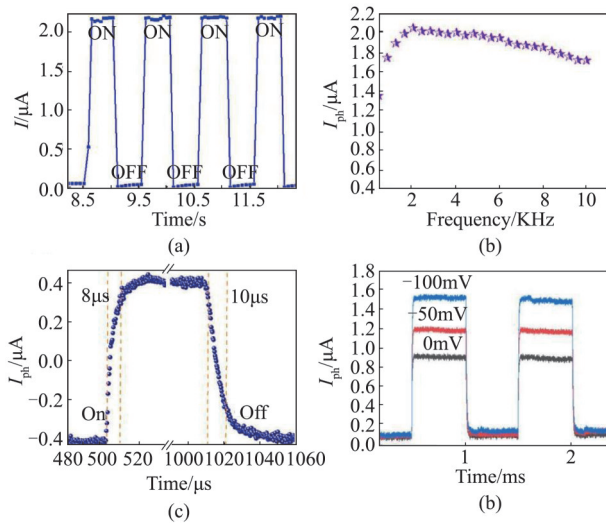


图3 (a)光电流在0.04THz辐射下的光响应波形,(b)光电流随调制频率的变化,(c)器件的响应时间,(d)不同偏压下器件的波形图。

Fig. 3 (a) The photoresponse waveform of the photocurrent under 0.04THz radiation, (b) The change of the photocurrent with the modulation frequency, (c) The response time of the device, (d) The waveform diagram of the device under different bias voltages.

指标都非常优异,例如大多数石墨烯探测器,噪声等效功率都非常小,本工作与石墨烯探测器相比,响应时间和噪声等效功率还处于相对劣势。除了石墨烯以外,基于碲烯的太赫兹探测器的性能与其他二维材料太赫兹光电探测器相媲美,甚至优于其他探测器(见表一)。

3 结论

综上所述,本文系统研究了一种在室温下快速响应基于碲烯工作的太赫兹光电探测器。通过集

成对数天线,器件在室温和零偏压下能够有效的的工作,器件响应率在0.12 THz下为40 mA/W,响应时间可达8 μ s,噪声等效功率为4 pW/Hz^{1/2}。实验验证了器件能够在毫米波和太赫兹波段工作并且有优异的性能。进一步表明,碲烯能作为一种毫米波-太赫兹波探测的二维半导体材料,这为下一代太赫兹技术的发展提供了新的技术途径。

致谢:本文的科研工作得到了兰州交通大学天佑青年托举计划的经费支持。其中的理论模拟与实验测量工作得到了东华大学理学院与中国科学院上海技术物理研究所的支持。超级计算工作得到了上海超算中心的支持。

References

- [1] Harter T, Füllner C, Kemal J N, *et al.* Generalized Kramers - Kronig receiver for coherent terahertz communications [J]. *Nature Photonics*, 2020, **14**(10):601-6.
- [2] Oh S J, Kim S H, Ji Y B, *et al.* Study of freshly excised brain tissues using terahertz imaging [J]. *Biomed Opt Express*, 2014, **5**(8):2837-42.
- [3] Woolard D L, Jacobs E L, Hwu R J, *et al.* Concealed weapon identification using terahertz imaging sensors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, **6212**: 17-18.
- [4] Guo C, Hu Y, Chen G, *et al.* Anisotropic ultrasensitive PdTe₂-based phototransistor for room-temperature long-wavelength detection [J]. *Science Advances*, 2020, **36**(6): eabb6500.
- [5] Xu H, Guo C, Zhang J, *et al.* PtTe₂-Based Type-II Dirac semimetal and its van der Waals heterostructure for sensitive room temperature terahertz photodetection [J]. *Small*, 2019, **15**(52):e1903362.
- [6] Zhang L, Chen Z, Zhang K, *et al.* High-frequency rectifiers based on type-II Dirac fermions [J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1):1584.
- [7] Guo C, Guo W, Xu H, *et al.* Ultrasensitive ambient-stable

表1 本工作与其他典型二维材料太赫兹探测器性能指标对比

Table 1 Performance index comparison of this work with other typical two-dimensional materials for terahertz detectors

探测机制	材料	频率	响应时间	噪声等效功率	参考文献
测辐射热效应	石墨烯	0.15 THz	<2.5 ns	0.2 fW/Hz ^{0.5}	[23]
光电导效应	石墨烯	0.15 THz	20 μ s	0.5 nW/Hz ^{0.5}	[24]
等离子体波整流	石墨烯	0.15 THz	—	0.6 nW/Hz ^{0.5}	[25]
光热电效应	黑磷	~0.3 THz	<2 ms	45 nW/Hz ^{0.5}	[26]
等离子体波整流	黑磷	0.04~0.3 THz	10 ms	10 nW/Hz ^{0.5}	[8]
光热电效应 (超短沟通)	黑磷	0.04~0.3 THz	0.8 μ s	138 pW/Hz ^{0.5}	[8]
—	PtTe ₂	0.04~0.12 THz	17 μ s	<10 pW/Hz ^{0.5}	[5]
肖特基二极管	InGaAs	0.25 THz	—	106.6 pW/Hz ^{0.5}	[27]
光热电效应	本工作(碲烯)	0.04~0.12 THz	8 μ s	4 pW/Hz ^{0.5}	—

- SnSe₂-based broadband photodetectors for room-temperature IR/THz energy conversion and imaging[J]. *2D Materials*, 2020, **7**(3):035026.
- [8] Guo W, Dong Z, Xu Y, *et al.* Sensitive terahertz detection and imaging driven by the Photothermoelectric effect in ultrashort-channel black phosphorus devices [J]. *Adv Sci*, 2020, **7**(5):1902699.
- [9] Buscema M, Groenendijk D J, Blanter S I, *et al.* Fast and broadband photoresponse of few-layer black phosphorus field-effect transistors [J]. *Nano Lett* 2014, **14** (6) : 3347-52.
- [10] Liu H, Du Y, Deng Y, *et al.* Semiconducting black phosphorus: synthesis, transport properties and electronic applications[J]. *Chem Soc Rev*, 2015, **44**(9):2732-43.
- [11] Zhang S, Xie M, Li F, *et al.* 2016 semiconducting group 15 monolayers: A broad range of band gaps and high carrier mobilities[J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, 2016, **55**(5): 1666-9.
- [12] Qiu G, Niu C, Wang Y, *et al.* Quantum Hall effect of Weyl fermions in n-type semiconducting tellurene [J]. *Nat Nanotechnol*, 2020, **15**(7):585-91.
- [13] Shi Z, Cao R, Khan K, *et al.* Two-dimensional tellurium: progress, challenges, and prospects[J]. *Nano-Micro Letters*, 2020, Doi:10.1007/s40820-020-00427-z.
- [14] Wu L, Huang W, Wang Y, *et al.* 2D Tellurium based high-performance all-optical nonlinear photonic devices [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, **29** (4) : 1806346.
- [15] Amani M, Tan C, Zhang G, *et al.* Solution-synthesized high-mobility tellurium nanoflakes for short-wave infrared photodetectors[J]. *ACS Nano*, 2018, **12**(7):7253-63.
- [16] Tong L, Huang X, Wang P, *et al.* Stable mid-infrared polarization imaging based on quasi-2D tellurium at room temperature[J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1):2308.
- [17] Wang Y, Qiu G, Wang R, *et al.* 2018 Field-effect transistors made from solution-grown two-dimensional tellurene[J]. *Nature Electronics*, 2018, **1**(4):228-36.
- [18] Gao Z, Liu G, Ren J. High thermoelectric performance in two-dimensional tellurium: an ab initio study[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, **10**(47):40702-9.
- [19] Lin S, Li W, Chen Z, *et al.* Tellurium as a high-performance elemental thermoelectric [J]. *Nat Commun*, 2016, **7**:10287.
- [20] Song J C, Rudner M S, Marcus C M, *et al.* 2011 Hot carrier transport and photocurrent response in graphene [J]. *Nano Lett*, **11**(11):4688-92.
- [21] Balandin A A. 2013 Low-frequency 1/f noise in graphene devices[J]. *Nat. Nanotechnol.*, **8**:549-55.
- [22] Parmentier F D, Serkovic-Loli L N, Roulleau P, *et al.* Photon-assisted shot noise in graphene in the terahertz range[J]. *Phys Rev Lett*, 2016, **116**(22):227401.