

石墨烯-MnBi₂Te₄ 异质结室温高灵敏度太赫兹探测器

胡臻智¹, 刘肇国², 周桓立², 杨宗儒², 宋元军², 张晓阳^{1,2,3}, 张彤^{1,2,3*}

(1. 东南大学 仪器科学与工程学院 微惯性仪表与先进导航技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 东南大学 电子科学与工程学院 信息显示与可视化国际合作实验室, 江苏 南京 210096;

3. 东南大学 苏州校区 金属纳米光电技术苏州重点实验室, 江苏 苏州 215123)

摘要: 太赫兹技术因其在医学成像、深空探索、无线通信、无损检测等领域的应用前景而受到广泛关注。然而, 常温条件下对太赫兹辐射进行高灵敏度检测仍然是一个极大的技术挑战。文中利用低热导率的磁性拓扑绝缘体 MnBi₂Te₄ 与高热导率的石墨烯形成范德华异质结, 进而构建了一种异质结结构的太赫兹探测器。室温条件下, 在 0.04 THz 与 0.12 THz 的频率太赫兹辐射照射下, 探测器展现出超快的光电响应速度 (16 μ s) 和较高的响应度 (0.43 mA/W 和 4.61 mA/W), 同时具备较低的噪声等效功率 (2.04 nW/Hz^{1/2} 和 190.58 pW/Hz^{1/2})。结果表明, 基于石墨烯-MnBi₂Te₄ 异质结的太赫兹探测器在太赫兹探测领域具有巨大的应用潜力。

关键词: 太赫兹探测器; 光热电效应; 拓扑绝缘体; 范德华异质结

中图分类号: TN36 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240137

0 引言

太赫兹辐射介于红外与微波之间, 其频谱的特殊性使太赫兹辐射兼具电子与光子的优势^[1]。因而太赫兹波在生物医学成像、国家安全监测、下一代无线通信技术、以及无损检测等领域展现出极其重要的应用价值和研究潜力。随着相关应用的不断拓展, 对于光电探测与成像技术的性能需求亦日益提高。在太赫兹波探测技术领域, 以 Ga、Ge 等材料为典型代表的传统三五族体材料以其优越的特性得到了广泛的应用^[2], 但是其繁琐的生产工艺、昂贵的生产成本、对低温环境的依赖以及相对较大的尺寸限制了其进一步发展。与之相比, 二维材料以其层内电子-声子-光子的强相互作用^[3], 低成本^[4]和可室温工作^[1]等优势, 引起了学术界和产业界的广泛关注。然而, 基于二维材料的太赫兹探测技术仍面临诸多挑战。首先, 为了实现低能光子的响应, 探测材料须具备相对较窄的带隙。其次, 微纳尺度的功能层与太赫兹波极长的波长

存在不匹配, 导致光电耦合效率低^[5]; 此外, 基于二维材料的太赫兹探测通常需要外加源漏偏压或栅极电压等精细调控, 这既增加了器件的噪声, 也提高了器件的能耗, 这些技术难题阻碍了其在实际应用中的普及。

传统光电探测技术, 例如光电导和光伏效应, 依赖于吸收能量高于光敏材料带隙的光子以产生信号, 这导致探测能量阈值受限于材料的固有物理属性^[6]。然而, 利用诸如辐射热效应、光热电效应 (Photothermoelectric Effect, PTE) 和热释电效应等热响应机制, 可以克服带隙限制, 实现对低能光子的探测。这些机制不受传统探测技术中带隙约束的限制, 为太赫兹辐射的探测提供了更多的机遇。特别地, 基于光热电效应的光电探测器因其无需外加偏压即可工作, 高灵敏度和快速响应时间的特性, 在太赫兹波段探测领域被认为具有显著潜力, 它通过利用光照在材料内部产生的温度梯度来驱动电荷载流子的扩散。这样, 即使光子能量未超过材料的带隙, 也能诱导出短路电流或开

收稿日期: 2024-03-29; 修订日期: 2024-04-26

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2800700)

作者简介: 胡臻智, 男, 硕士生, 主要从事二维材料红外-太赫兹探测方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 张彤, 男, 教授, 博士, 主要从事集成光学、表面等离子体等方面的研究。

路电压。在此过程中,器件的宏观不对称性(如异种金属电极接触的不对称性^[7]、局部栅控引起的极性分布不对称,以及材料自身的几何结构不对称性^[8])起着决定性的作用。石墨烯,这种二维材料具有极高的热导率,在块状形态下可达到 $2000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ^[9]。与块状石墨烯相比,薄层石墨烯显示出更低的电子热容^[10],这意味着在吸收相同能量时会出现更剧烈的温度变化。因此,将石墨烯与热导率较低的材料组成异质结构,可以作为形成所需温度梯度的有效方案。 MnBi_2Te_4 作为一种新兴的磁性拓扑绝缘体,其显著的低热导率可以归因于内部复杂的磁振子与声子的相互作用^[11]。此外,其内含的重元素增强了电子散射过程^[12],与其他类似的拓扑绝缘体相比,这一特性进一步降低了热导率。作为具有范德瓦尔斯结构的材料, MnBi_2Te_4 的层间相互作用较弱,这种特性降低了层间的热能传递^[13],进而减少了整体的热传导效率。

文中利用高热导率薄层石墨烯和低热导率的块状磁性拓扑绝缘体 MnBi_2Te_4 制备了范德华异质

结器件,并借助领结天线将太赫兹波局域在器件沟道中,提高了器件对太赫兹波的耦合效率。在室温下,得益于器件中主导的光热电效应,即使不施加外部偏压,器件也能实现太赫兹波的探测,这有助于减少暗电流和降低能耗。总而言之,器件显示出石墨烯- MnBi_2Te_4 异质结在太赫兹探测领域的巨大潜力和应用前景。

1 器件设计与表征

图 1(a) 展示了石墨烯- MnBi_2Te_4 异质结器件的三维示意图,其中石墨烯- MnBi_2Te_4 异质结用作场效应晶体管的感光层。在此设计中,金属电极的作用不仅作为电流的传输通道,它们还被设计为能够高效耦合太赫兹波的天线。当太赫兹波辐射到这些天线时,沟道两侧的电场强度急剧增强,从而显著增强器件通道内感光层的光吸收效率。为了更好的达到这一效果,针对中心频率为 0.12 THz 的太赫兹源,使用时域有限差分法对天线的几何参数进行了仿真与优化。图 1(b)

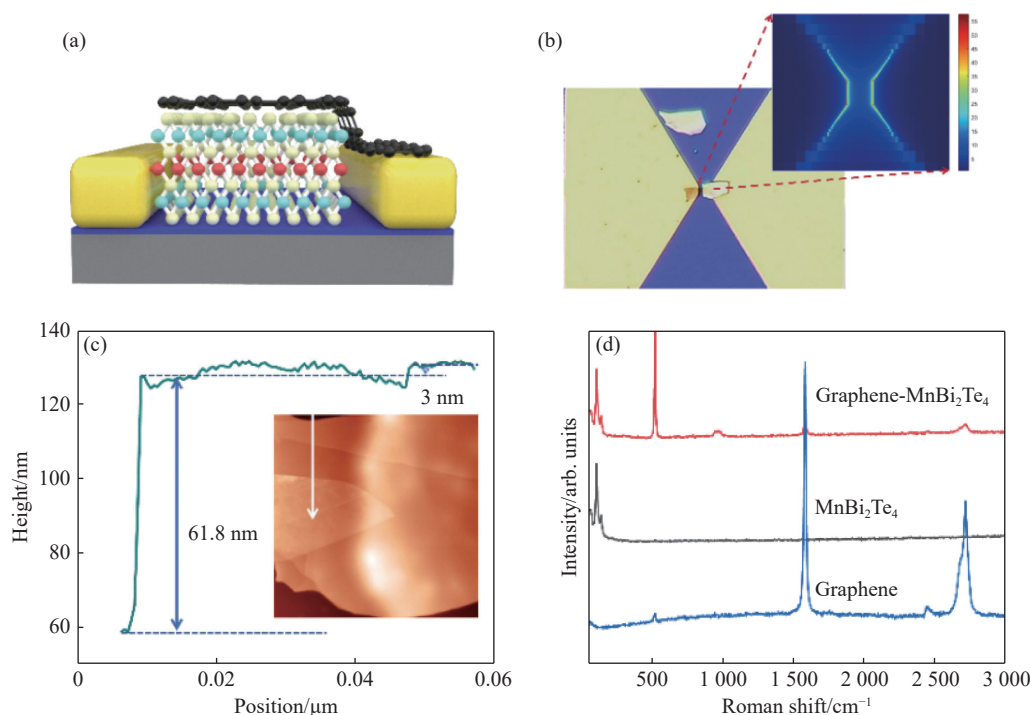


图 1 (a) 器件结构模型图; (b) 器件光学显微图像 (右上角为通过时域有限差分法优化仿真后的蝶形天线电场分布图); (c) 通过 AFM 测得的石墨烯- MnBi_2Te_4 异质结高度分布图; (d) 石墨烯- MnBi_2Te_4 的拉曼光谱图

Fig.1 (a) Schematic model of the device structure; (b) Optical micrograph of the device (with the simulated electric field distribution of a butterfly antenna optimized by finite-difference time-domain method in the top right corner); (c) Height distribution map of the graphene- MnBi_2Te_4 heterostructure measured by AFM; (d) Raman spectrum of graphene- MnBi_2Te_4

为光学显微镜下的异质结器件照片,其中领结天线的半径为 $92\ \mu\text{m}$,沟道宽度为 $6\ \mu\text{m}$,并且图中右上角插图显示了经过优化的天线结构的电场分布。从仿真结果图可以看出,天线间隙处的电场强度与入射太赫兹波电场强度的比值 $|E|^2/E_0^2$ 的比值约为 2500。如图 1(c) 所示,利用原子力显微镜 (AFM) 对石墨烯-MnBi₂Te₄ 器件的微观形态进行了表征,其中 MnBi₂Te₄ 和石墨烯的厚度分别约为 61.8 nm 和 3 nm。最后,如图 1(d) 所示,通过拉曼光谱分析了石墨烯和 MnBi₂Te₄ 单材料区域以及它们构成的异质结区域。在石墨烯-MnBi₂Te₄ 异质结区域,检测到了石墨烯和

MnBi₂Te₄ 的特征拉曼峰,从而证实了异质结构的良好构建。

2 器件测试结果

首先,对石墨烯-MnBi₂Te₄ 异质结器件的电学特性进行了测量。图 2(a) 显示了异质结器件在 $-300\sim 300\ \text{mV}$ 直流偏置电压范围内的暗场 I - V 曲线。从所得的数据中可以观察到,器件的电阻大约为 $21.43\ \text{k}\Omega$ 。线性的 I - V 曲线表明金属与半导体形成了良好的接触。良好接触的形成对于确保器件中电荷载流子的无阻碍传输至关重要。

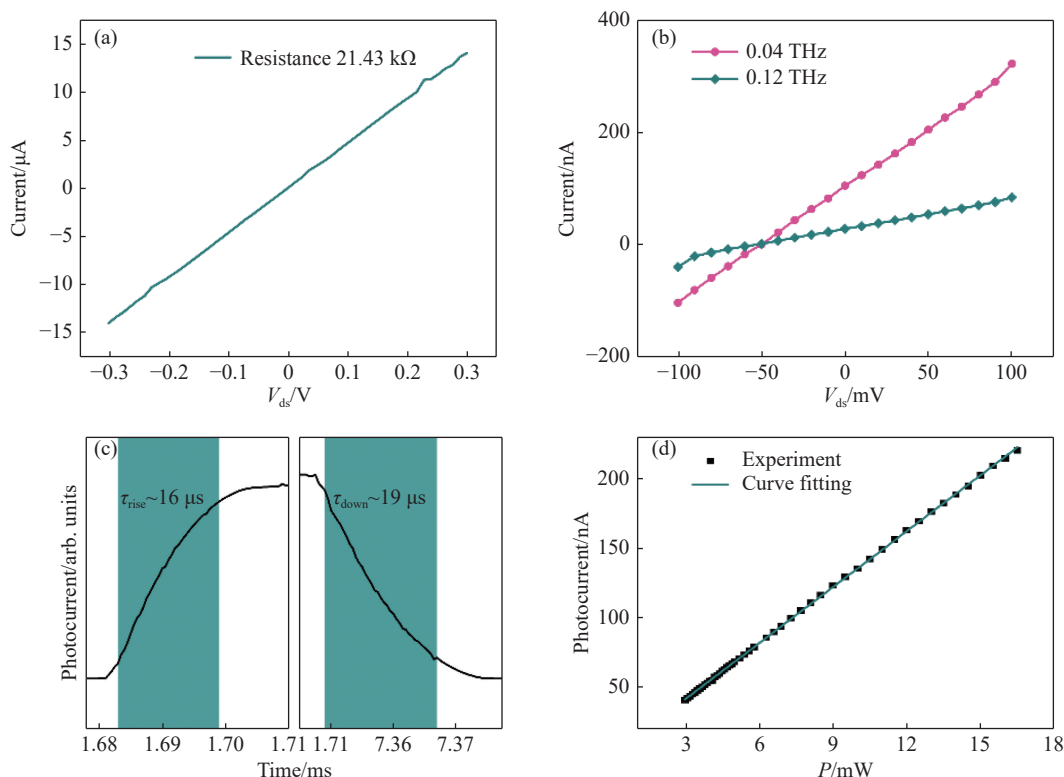


图 2 (a) 器件 I - V 测试曲线; (b) 在 0.04 THz 和 0.12 THz 辐射下, 器件光电流与偏压依赖关系; (c) 器件在 0.12 THz 辐射下的响应速度; (d) 器件在 0.12 THz 辐射下, 光电流与载波功率的关系

Fig.2 (a) I - V testing curve of the device; (b) Dependence of device photocurrent on bias voltage under 0.04 THz and 0.12 THz radiation; (c) Response time of the device under 0.12 THz radiation; (d) Relation between photocurrent and incident power at 0.12 THz radiation for the device

为了深入探究器件在太赫兹波段性能,对其在 0.04 THz 和 0.12 THz 频率太赫兹辐射下的光生电流进行了测量,同时并对源漏偏压进行了调整。如图 2(b) 所示,实验结果揭示了源漏偏压与光生电流之间存在线性关系;随着源漏偏压的增加,器件的光电响应性能显著提升,光电流与源漏偏压成正比增加。这一现

象可归因于源漏偏压产生的直流电场,以及异质结区域内建电场的共同作用,它们迫使非平衡载流子在通道中横向移动,从而产生了类似光电导效应的行为。值得关注的是,在无外加源漏偏压的情况下,器件在 0.04 THz 和 0.12 THz 的光照下分别产生了 91.6 nA 和 16.2 nA 的光电流。这表明器件具备出色的自驱动

光电性能,即使在没有施加偏压的情况下也能有效地检测太赫兹辐射。

在光电探测器领域中,响应时间是衡量器件灵敏度的关键指标,它包括上升时间与下降时间(这两个时间段分别被定义为器件净光电流从 10% 升至 90% 以及从 90% 降至 10% 所需的时间跨度)。如图 2(c) 所示,在 0.12 THz 辐射以及 1 kHz 的调制频率下,通过示波器对器件在零偏条件下的光电流随时间的动态变化进行了实时采集,

可以观测到器件的上升时间为 16 μs ,下降时间为 19 μs 。这一显著的响应速度提升,一方面归因于石墨烯的高载流子迁移率,另一方面也归因于 MnBi_2Te_4 与石墨烯构成的异质结区域中内建电场对载流子的迅速且有效的分离作用。

器件的线性动态范围是评价其光电转换效率的重要指标。如图 2(d) 所示,在 0.12 THz 的频率以及 0.1 V 的源漏偏压条件下,对器件的光电响应与入射功率间的关系进行了测定。拟合曲线清楚地展示了该器件在特定入射功率范围内的线性响应特性。这表明探测器能够将太赫兹波段的功率变化准确地转换为光电流的改变。这一现象不仅证实了器件在该工作范围内的高度可靠性,同时也展现了其在实际应用中的稳定性。

3 实验结果讨论

太赫兹探测器的电流响应度 (R_i) 可以表示为以下公式:

$$R_i = I_{ph}/P_d \times S_\lambda \quad (1)$$

$$S_\lambda = \lambda^2/4\pi \quad (2)$$

式中: P_d 表示入射功率密度。光敏材料的面积约为 130.75 μm^2 。在太赫兹波段,探测器的面积远小于待测太赫兹信号的波长,这会导致仅考虑探测器尺寸时,响应度可能出现偏大的情况。考虑到电磁波的衍射极限,采用公式 (2) 进行计算,其中: S_λ 表示衍射极限下的面积, λ 为入射辐射的波长^[14]。本实验中太赫兹源的频率分别为 0.04 THz 和 0.12 THz, S_λ 分别为 4.4 mm^2 和 0.497 mm^2 。如图 3 所示,在零偏置电压下,当频率分别为 0.04 THz 和 0.12 THz 时, R_i 的值分别为 0.43 mA/W 和 4.61 mA/W 。值得特别注意的是,

通过将偏置电压增加到 0.1 V, R_i 进一步增大,当频率分别为 0.04 THz 和 0.12 THz 时,其值分别为 1.34 mA/W 和 14.37 mA/W 。

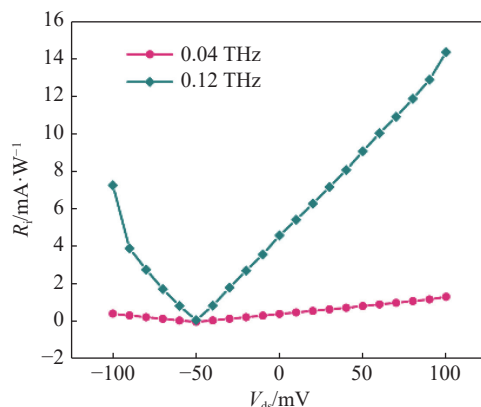


图 3 在 0.04 THz 和 0.12 THz 辐射下,器件响应度与偏压的依赖关系
Fig.3 Device responsivity dependence on bias voltage under 0.04 THz and 0.12 THz radiation

噪声等效功率 (Noise Equivalent Power, NEP) 也是衡量探测器性能的关键指标。NEP 可表示为:

$$NEP = i_n/R_i \quad (3)$$

式中: i_n 是噪声电流的均方根。由于测试过程中,器件的调制频率大于 1 kHz,所以可以忽略低频 $1/f$ 噪声,仅关注器件的非零欧姆电阻以及在偏置电压下随机产生电子引起的热噪声 (i_j) 和散粒噪声 (i_s)。因此,其噪声电流的均方根可以用以下公式表示:

$$i_n = (i_j^2 + i_s^2)^{0.5} = (4K_B T/r + 2qI_{ds})^{0.5} \quad (4)$$

式中: K_B 为玻尔兹曼常数; T 为探测器的绝对温度; r 为探测器的电阻。在 0 V 偏置电压下,在 0.04 THz 和 0.12 THz 太赫兹源辐射下,器件的 NEP 分别为 2.04 $\text{nW/Hz}^{1/2}$ 和 190.58 $\text{pW/Hz}^{1/2}$ 。

在零偏压条件下,探测器中的光电流可能同时由光伏效应和光热电效应产生^[15]。由于太赫兹波的光子能量相对较低,太赫兹探测器中的光电流通常主要由光热电效应主导^[16-17]。此外,如图 2(a) 所示,在暗场条件下, I - V 曲线表现为线性。以光伏效应为主导的器件会表现出整流效应,其暗场 I - V 曲线呈现非线性^[18]。因此,认为在石墨烯- MnBi_2Te_4 异质结器件中,光热电效应起着主导作用。利用石墨烯高热导率的特性,在器件中构建了一个热接触的不对称性。这种

显著的热导率差异引起了沟道热载流子分布的不均匀性,从而打破了电场的镜像对称性。这样的设计不仅提高了器件对热梯度的敏感性,也显著提高了探测效率。此外,该器件还表现出在无外部偏压条件下的自驱动探测能力,这一点在实际应用中非常重要。石墨烯-MnBi₂Te₄ 异质结探测器在太赫兹频段主要通过光热电效应机制工作。如图 4 所示,在无偏压状态下,入射的太赫兹辐射会使石墨烯-MnBi₂Te₄ 异质结中的载流子受热。由于石墨烯和 MnBi₂Te₄ 在导热能力和塞贝克系数上的差异,太赫兹辐射在异质结的沟道中产生了温度梯度,这促使载流子从高温区向低温区移动,最终在异质结的两端形成了热电势差,也就是温差电压。这一过程有效地将太赫兹辐射转换为可测量的电信号。如果将沟道材料的最左端设为 X_L ,最右端设为 X_R ,那么温差电动势可以表示为:

$$\Delta V = - \int_{X_L}^{X_R} \nabla T \cdot S dx \quad (5)$$

式中: ΔV 为温差电动势; T 为温度; S 为塞贝克系数。 S 反映了单位温度变化下温差电动势的大小即 $S=dV/dT$ 。此外,由于石墨烯带隙为零,使得能量小于 MnBi₂Te₄ 禁带宽度的光子也可以激发出电子-空穴对,并经过异质结的内建电场分离产生光电流,从而提高了低能量光子的利用效率。

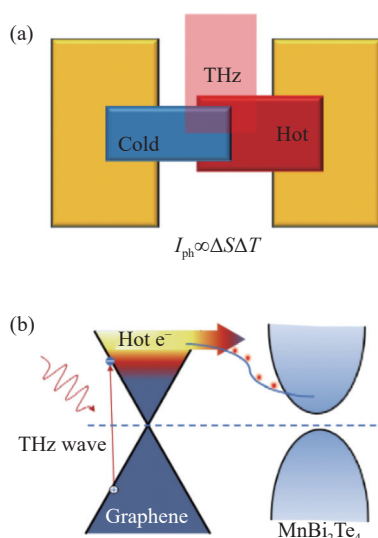


图 4 (a) PTE 模式机理图; (b) 石墨烯-MnBi₂Te₄ 能带示意图

Fig.4 (a) Schematic of the PTE effect mechanism; (b) Band diagram of graphene-MnBi₂Te₄ heterostructure

4 器件成像演示

由于器件具备良好的噪声等效功率和响应速度,将器件接入太赫兹成像系统进行成像演示。太赫兹成像系统的示意图如图 5(a) 所示。实验中使用了 0.12 THz 频率的太赫兹波作为光源,通过离轴抛物面镜的聚焦功能将其集中照射到探测器表面。使用一张刻有“SEU”字母图案的白纸作为成像目标。该白纸被放置在太赫兹波的焦点上,以便通过透射方式获得图像。图 5(b) 展示了用作成像目标的白纸及其上的“SEU”字母图案,而图 5(c) 显示了使用太赫兹成像系统获得的成像结果。成像结果清晰地再现了字母图案的详细轮廓。成像过程的分辨率为 48 pixel×148 pixel,每个像素的积分时间大约为 20 ms。

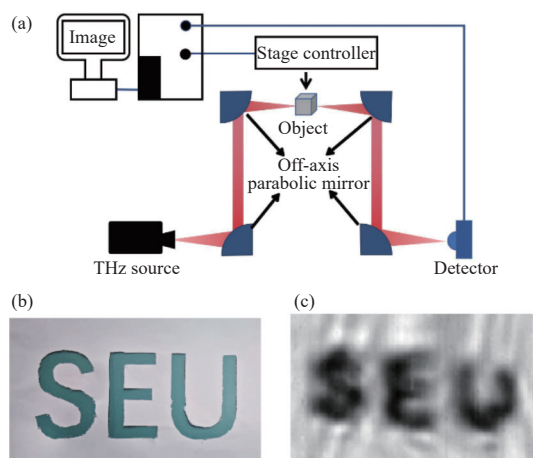


图 5 (a) 太赫兹成像系统结构示意图; (b) 成像物品; (c) 成像结果

Fig.5 (a) Schematic diagram of the terahertz imaging system setup; (b) Imaged object; (c) Imaging result

5 结 论

在该研究中,设计了石墨烯与 MnBi₂Te₄ 的异质结,旨在利用两种材料结合时产生的温度梯度驱动载流子定向流动。基于光热电效应,该探测器在无外加偏压的自驱动模式下,展现出了优异的太赫兹探测性能。在室温环境下,该器件在 0.04 THz 和 0.12 THz 频率太赫兹波辐射下表现出较高的响应度 (分别为 0.43 mA/W 和 4.61 mA/W)、超短光响应时间 (16 μs) 和较低的噪声等效功率 (分别为 2.04 nW/Hz^{1/2} 和 190.58 pW/Hz^{1/2})。

尽管石墨烯-MnBi₂Te₄ 异质结在太赫兹探测领域

显示出巨大的应用潜力,但目前该设备仍处于实验室研究阶段。为了推动其向实用化发展,未来研究需致力于探索器件的大规模阵列化。

参考文献:

- [1] ROGALSKI A. Progress in performance development of room temperature direct terahertz detectors [J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2022, 43(9-10): 709-727.
- [2] LUO Muchang, SUN Jiandong, ZHANG Zhipeng, et al. Terahertz focal plane field effect transistors [J] *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0320001. (in Chinese)
- [3] ZHOU H L, ZHANG X Y, XUE X M, et al. Nanoscale valley modulation by surface plasmon interference [J]. *Nano Letters*, 2022, 22(17): 6923-6929.
- [4] XIA P, SONG Y J, LIU Y Z, et al. Advances in the optical and electronic properties and applications of bismuth-based semiconductor materials [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, 12(5): 1609-1624.
- [5] WANG L, HAN L, GUO W, et al. Hybrid Dirac semimetal-based photodetector with efficient low-energy photon harvesting [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 53.
- [6] TAN Yimei, ZHANG Shuo, LUO Yuning, et al. 640×512 HgTe colloidal quantum-dot mid-wave infrared focal plane array (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 785-789. (in Chinese)
- [7] XIA F N, MUELLER T, GOLIZADEH-MOJARAD R, et al. Photocurrent imaging and efficient photon detection in a graphene transistor [J]. *Nano Letters*, 2009, 9(3): 1039-1044.
- [8] MA Q, KUMAR R K, XU S Y, et al. Photocurrent as a multiphysics diagnostic of quantum materials [J]. *Nature Reviews Physics*, 2023, 5(3): 170-184.
- [9] CHEN S, WU Q, MISHAR C, et al. Thermal conductivity of isotopically modified graphene [J]. *Nature Materials*, 2012, 11(3): 203-207.
- [10] YAN J, KIM M H, ELLE J A, et al. Dual-gated bilayer graphene hot-electron bolometer [J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(7): 472-478.
- [11] VU D D, NELSON R A, WOOTEN B L, et al. Magnon gap mediated lattice thermal conductivity in MnBi₂Te₄ [J]. *Physical Review B*, 2023, 108(14): 144402.
- [12] QIAN X, ZHOU J, CHEN G. Phonon-engineered extreme thermal conductivity materials [J]. *Nature Materials*, 2021, 20(9): 1188-1202.
- [13] ZHANG L, ZHONG Y, LI X, et al. Effect of twist angle on interfacial thermal transport in two-dimensional bilayers [J]. *Nano Letters*, 2023, 23(17): 7790-7796.
- [14] DONG Z, YU W, ZHANG L, et al. Highly efficient, ultrabroad PdSe₂ phototransistors from visible to terahertz driven by mutiphysical mechanism [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(12): 20403-20413.
- [15] ZHANG Y, LI H, WANG L, et al. Photothermoelectric and photovoltaic effects both present in MoS₂ [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 7938.
- [16] DONG Z, GUO W, ZHANG L, et al. Excitonic insulator enabled ultrasensitive terahertz photodetection with efficient low-energy photon harvesting [J]. *Advanced Science*, 2022, 9(36): 2204580.
- [17] XU H, FEI F, 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.
- [18] GUAN Z Q, DAI W, CHEN X P, et al. Mechanism, characterization, and device application of photothermoelectric effect [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(1): 0113004. (in Chinese)

High-sensitivity room-temperature terahertz detector with graphene-MnBi₂Te₄ heterostructure

HU Zhenzhi¹, LIU Zhaoguo², ZHOU Huanli², YANG Zongru², SONG Yuanjun²,
ZHANG Xiaoyang^{1,2,3}, ZHANG Tong^{1,2,3*}

(1. Key Laboratory of Micro-Inertial Instrument and Advanced Navigation Technology, Ministry of Education, School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Joint International Research Laboratory of Information Display and Visualization, School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. Suzhou Key Laboratory of Metal Nano-Optoelectronic Technology, Southeast University Suzhou Campus, Suzhou 215123, China)

Abstract:

Objective Terahertz radiation, which lies between microwaves and infrared in the electromagnetic spectrum, combines the penetration ability of microwaves with the high resolution of optical waves. This unique spectral position endows terahertz radiation with enormous potential for applications across various fields such as biomedical imaging, national security surveillance, next-generation wireless communication and non-destructive testing. The terahertz detector is the core component of a terahertz detection system, responsible for transforming terahertz radiation into electrical signals. Existing terahertz detection technologies suffer from high costs, slow response times, dependency on low-temperature conditions and high power consumption. To overcome these challenges, the development of a room-temperature terahertz detector that is highly sensitive, rapidly responsive and energy-efficient has become imperative. The study presented introduces a heterostructure terahertz detector based on a novel topological magnetic insulator, MnBi₂Te₄, and graphene. By exploiting the photothermoelectric effect, the detector achieves high sensitivity, swift response, and low power consumption at room temperature.

Methods Ultraviolet lithography was first employed to create electrode structures on an intrinsic silicon substrate ($\rho > 10\,000\ \Omega\cdot\text{cm}$), followed by the deposition of 10 nm of titanium (Ti) and 50 nm of gold (Au) via electron beam evaporation. After the metal electrodes were fabricated using a lift-off process, graphene and MnBi₂Te₄ flakes were exfoliated by mechanical exfoliation and subsequently transferred onto the metal electrodes in sequence through a dry transfer method. In this design, the metal electrodes functioned both as conduits for electric current and as antennas for the efficient coupling of terahertz waves. When terahertz radiation was incident on the bow-tie antenna, a significant enhancement in the light absorption efficiency within the device channel was observed. For this reason, the geometric parameters of the bow-tie antenna were simulated and optimized for a terahertz source with a central frequency of 0.12 THz using the finite-difference time-domain method. After the fabrication was completed, the photovoltaic response of the heterostructure device was tested under room temperature and atmospheric conditions. The terahertz response current was amplified by a preamplifier and finally read out with a lock-in amplifier.

Results and Discussions At room temperature, the terahertz detector based on graphene and the magnetic topological insulator MnBi₂Te₄ demonstrated an ultrafast photoelectric response time of 16 μs (as seen in Fig.2(c)) at frequencies of 0.04 THz and 0.12 THz, with responsivities reaching up to 0.43 mA/W and 14.37 mA/W (as shown in Fig.3), along with a comparatively low noise-equivalent power. The detector operates on the principle of thermally exciting the carriers within the graphene-MnBi₂Te₄ heterojunction due to incident terahertz radiation.

The differences in thermal conductivity, light absorption, and the Seebeck coefficient between the two materials create a temperature gradient that drives the carriers to move, forming a thermoelectric potential difference and effectively converting terahertz radiation into an electrical signal. The imaging results obtained from the terahertz imaging system constructed in the laboratory (as shown in Fig.5(c)) validate the performance of the detector when integrated into the system.

Conclusions In this study, a heterostructure of graphene and MnBi_2Te_4 was designed to harness the synergistic effects arising from the combination of these two materials. Based on the photothermoelectric effect, the detector exhibited exceptional terahertz detection capabilities in a self-driven mode without the need for an external bias. At room temperature, the device demonstrated high responsivity, ultra-short photoresponse times, and lower noise-equivalent power at frequencies of 0.04 THz and 0.12 THz. These findings suggest that the heterojunction devices composed of the magnetic topological insulator MnBi_2Te_4 and graphene hold significant potential for development in the field of terahertz detection.

Key words: terahertz detector; photothermoelectric effect; topological insulator; Van der Waals heterostructure

Funding projects: National Key Research and Development Program(2021YFB2800700)