

基于拓扑绝缘体异质结的宽带太赫兹探测器

姚晨禹^{1,2}, 张力波^{1,3}, 卫英东¹, 王林^{1*}, 陈效双^{1,2,3}, 陆卫^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院大学杭州高等研究院 物理与光电工程学院, 浙江 杭州 310024)

摘要: 二维材料中的新量子态对凝聚态物理和现代光电器件的发展具有重要意义。然而具有宽带、室温和快速响应能力的太赫兹光电探测技术, 由于缺乏暗电流和光吸收之间的最佳平衡, 仍然面临着巨大的挑战。在这项研究中, 作者合成了新型拓扑绝缘体材料 GeBi_4Te_7 , 并搭建了其与 Bi_2Te_3 的范德华异质结, 以实现高灵敏度的太赫兹光电探测器。在平面金属-材料-金属结构中实现了在室温下将低光子能量太赫兹波段直接转化为光电流。结果表明, 基于 Bi_2Te_3 - GeBi_4Te_7 的太赫兹光电探测器能够实现 0.02 ~ 0.54 THz 的宽谱探测, 且具有很高的光响应率 (在 0.112、0.27、0.5 THz 下分别为 $592 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ 、 $203 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ 、 $40 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$), 响应时间小于 $6 \mu\text{s}$ 。值得注意的是, 它被用于高频太赫兹的成像应用演示。这些结果为 Bi_2Te_3 - GeBi_4Te_7 拓扑绝缘体异质结材料的低能量光电应用开辟了可行性途径。

关键词: 太赫兹; 拓扑绝缘体; 天线; 异质结

中图分类号: 043

文献标识码: A

Broadband terahertz detector based on topological insulator heterojunction

YAO Chen-Yu^{1,2}, ZHANG Li-Bo^{1,3}, WEI Ying-Dong¹, WANG Lin^{1*}, CHEN Xiao-Shuang^{1,2,3}, LU Wei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China)

Abstract: New quantum states in 2D materials have important implications for condensed matter physics and the development of modern optoelectronic devices. However, terahertz photoelectric detection technology with broadband, room temperature, and fast response capabilities still faces great challenges due to the lack of an optimal balance between dark current and light absorption. In this study, a novel topological insulator material, GeBi_4Te_7 , was synthesized, and its van der Waals heterojunction with Bi_2Te_3 was constructed to realize a highly sensitive terahertz photodetector. Direct generation of photocurrents at low-energy terahertz bands of room temperature has been realized in planar metal-material-metal structures. The results show that the Bi_2Te_3 - GeBi_4Te_7 -based terahertz photodetector can achieve wide spectral detection from 0.02 THz to 0.54 THz with high photosensitivity ($592 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ at 0.112 THz, $203 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ at 0.27 THz, $40 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ at 0.5 THz), and a response time of less than $6 \mu\text{s}$. Notably, it is already available for high-frequency terahertz imaging. These findings make it possible to use Bi_2Te_3 - GeBi_4Te_7 topological insulator heterojunction materials for low-energy optoelectronic applications.

Key words: terahertz, topological insulator, antenna, heterojunction

收稿日期: 2022-12-05, 修回日期: 2023-04-12

Received date: 2022-12-05, Revised date: 2023-04-12

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2800702), 上海市自然科学基金项目(21ZR1402200, 21ZR1473800)

Foundation items: Supported by National Key R&D Program of China (2021YFB2800702); Shanghai Natural Science Foundation Project (21ZR1402200, 21ZR1473800)

作者简介(Biography): 姚晨禹(1993-), 男, 湖北襄阳人, 博士研究生, 主要研究领域为二维材料和高迁移率晶体管太赫兹探测器. E-mail: yao-chenyu@mail.sitp.ac.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: wanglin@mail.sitp.ac.cn

引言

太赫兹辐射(0.1~10 THz)能够将电子器件与光学器件连接起来,涵盖从微波到红外光的宽频带电磁波谱,其混合特性可实现广泛的应用,包括无线通信、传感和成像等应用^[1]。随着石墨烯、过渡金属硫族化合物(TMDCs)、拓扑材料和三维狄拉克系统等新兴二维材料的出现,基于这些材料独特的电学和光学性质的探索,推动了太赫兹光电器件的发展。其中,拓扑材料以无质量狄拉克费米子为特征,表现出特有的宽波段响应特性^[2-4]。然而,基于石墨烯和黑磷材料的太赫兹探测器存在响应速度慢、不稳定以及需要低温冷却等缺点。而拓扑材料由于其特殊的拓扑表面态和无耗散电子输运等特性,使其在高性能、宽波段和室温环境的光电器件中具有重要的价值。基于动量空间中电子能带结构的拓扑性质,引入拓扑不变量,将拓扑材料分为拓扑绝缘体(TI)^[5-6]、狄拉克半金属(DS)^[7-8]、外尔半金属(WS)^[9-10]和节点线半金属(NLS)^[11-12]。拓扑绝缘体的载流子在表面态传输过程中具有极低的能量损失,导致超高的载流子迁移率,使其适用于高速、低能电子和光电器件。目前,基于Bi₂Se₃、Bi₂Te₃和Sb₂Te₃拓扑绝缘体中的光电探测器已经进行了研究且响应率高于石墨烯器件,其响应机制包括过阻尼等离子体波和拓扑表面态的不对称散射^[13-15]。随着拓扑材料的出现,基于Bi₂Te₃的探测器已被研究作为室温应用的优良拓扑材料,这是由于其具备的半金属特性^[16]。然而,Bi₂Te₃的费米面不具有孤立狄拉克点,但可以通过在材料中插入一些额外的Ge-Te层来实现独立的狄拉克点^[17-18]。GeBi₄Te₇具有与Bi₂Te₃相同的化学势,具有更大的费米动量,导致更大的表面载流子密度^[19]。由于费米能量附近复杂电子结构的高密度,掺杂的拓扑绝缘体具有更高的塞贝克系数,有利于太赫兹探测。然而,GeBi₄Te₇的光探测能力从未被研究过,因此探索其在太赫兹探测和成像中的应用是一个有意义的方向。此外,二维材料的表面没有悬挂键,因此在形成范德瓦尔斯异质结时不会具有晶格失配的问题,也能够缩短导电通路,增加光电导增益,所以构建范德瓦尔斯异质结能够有效降低暗电流,提高探测器的响应率。

现有的光电探测器通常通过光电导或光伏效应探测带隙能量以上的高能光子。然而,理论上对于任何特定波长,都可以通过辐射热效应、光热电

(PTE)和热释电效应等热效应进行探测,而不受带隙限制。在这些光电探测器中,基于光热电效应的探测器被认为是太赫兹探测的可行候选者,因为它们具有简单的几何形状、零偏置操作和低功耗的优点^[20]。到目前为止,增强光热电探测器性能的方法主要有三种。可以利用金属中的等离子激子等偏振激子^[21]以及将腔或波导合并到光电探测器中^[22]来增强光-物质相互作用。最有效简便的方法就是基于天线的原理,引入功能结构,通过将自由传播的光辐射转化为局域能,或将材料的表面阻抗与光匹配来增强光吸收^[23-24]。因此,设计一种高效的平面天线是增强光热电探测器性能可行且有效的方法。

在此工作中,我们通过探索拓扑绝缘体异质结中的光-物质相互作用来证明太赫兹探测的高效性。我们合成了高质量的拓扑绝缘体GeBi₄Te₇,并且设计并仿真了非对称偶极子天线结构,以实现显著的性能提升。我们揭示了金属-Bi₂Te₃/GeBi₄Te₇-金属结构器件中基于拓扑绝缘体异质结的毫米波/太赫兹探测,并高效展示了将低能量电磁辐射转换为电信号。得益于平面天线光场耦合增强和范德华异质结降低暗电流的作用,我们的器件实现了0.02~0.54 THz的宽带探测。器件在室温下获得了592 V/W的响应率和84 pW·Hz^{-1/2}的NEP,这得益于拓扑绝缘体相表面态超高的载流子迁移率和优异的热电性能,优于同频率下单一材料测得的结果。我们的研究结果为毫米波/太赫兹波段中高速成像和遥感的实际应用开辟了一条新途径。

1 实验方法

1.1 材料合成和表征

我们通过化学气相传输(CVT)方法合成了高质量的GeBi₄Te₇晶体,合成过程如下。Ge粉(99.999%, Aladdin Chemicals)、Bi(99.99%, damas-beta)和Te粉(99.999%, Aladdin Chemicals)按1:4:7的化学计量比均匀混合,然后在约2.5*10⁻² Pa的真空下密封在石英管的热区,选择适量的I₂(99.99%, Aladdin Chemicals)作为传输剂。然后将热区和冷区的温度分别以1 °C/min的速率升温至750 °C和650 °C并保持7天,自然冷却后在冷区收获GeBi₄Te₇晶体。拉曼光谱取自具有532 nm激光的微型拉曼系统(LABRAM HR),如图1(c)所示^[25]。

1.2 平面天线仿真

基于偶极子天线在太赫兹波段的应用,我们设

计了一种非对称的天线结构来增强太赫兹的局域光场耦合^[23-24]。我们的仿真是采用时域有限差分法(FDTD)来进行光学仿真,仿真结构包括衬底、pad、平面天线。衬底材料为氧化层(300 nm)和高阻硅(1 mm), pad和平面天线由两层金属构成(下层20 nm Cr和上层50 nm Au)且天线尺寸根据偶极子天线谐振频率确定为180 μm , 沟道距离为2 μm 。基于时域有限差分模拟分析,由于材料在不同电磁极化下二维平面(x-y平面)的局域场分布的变化,要使得天线耦合作用最强,其偏振光须沿着天线对称轴的方向。电场的仿真结果显示,源端的局域光场要强于漏端,如图1(d)所示。

1.3 器件制备

采用机械剥离方法将 Bi_2Te_3 和 GeBi_4Te_7 从块状晶体剥离,然后将 GeBi_4Te_7 转移到具有热生长氧化层 SiO_2 (300 nm)的高电阻本征硅衬底($\rho > 20000 \Omega \cdot \text{cm}$)上,并将层状 Bi_2Te_3 从蓝色胶带转移到PDMS上。然后在精密转移平台(E1-T)的光学显微镜下通过干法转移将层状 Bi_2Te_3 转移到 GeBi_4Te_7 上,完成异质结的制备。通过紫外光刻(MA6)在衬底上形成电极结构,然后通过电子束蒸发沉积90 nm Cr/Au触点,最后通过剥离工艺形成 GeBi_4Te_7 - Bi_2Te_3 异质结构室温太赫兹探测器。

1.4 器件测试

使用半导体参数分析仪测量器件的电气特性。0.12 THz辐射由40 GHz微波振荡器产生,该振荡器与VDI WR 9.0三倍器相连。同样,0.3 THz辐射是由与VDI WR 2.8三倍器连接的0.1 THz IM PATT二极管产生的。使用低频微波发生器(WA-04609)生成低频微波,通过倍增链路(VDI WR 1.9)产生0.49~0.54 THz的电磁波。太赫兹辐射的功率密度由Golay单元校准。光响应由锁定放大器(LIA)和低噪声电压前置放大器后的示波器记录。探测器响应率(R_V)通过关系式 $R_V = \Delta V/P_{in} = \Delta V/S_a \cdot P$,其中 P_{in} 是入射功率, S_a 是有效面积, P 是功率密度(0.112 THz、0.27 THz和0.5 THz时为1 mW/cm²)。此处,有效面积 $S_a = S_\lambda = \lambda^2/4\pi$ 而不是 S_d 用于计算入射功率和响应度。NEP是用于评估器件性能的品质因数,可以从 $NEP = V_n/R_V$ 估算,对应于1 Hz带宽下的最小可探测功率,其中 V_n 是1 Hz带宽下的噪声电流频谱单位 $\text{V} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

2 实验结果

GeBi_4Te_7 材料是对拓扑绝缘体 Bi_2Te_3 材料的掺

杂,两种材料的分子结构如图1(a)所示。在晶体结构方面, GeBi_4Te_7 属于 $P\bar{3}m1$ 空间群^[25]。层状材料沿着c轴堆叠,在七层 GeBi_2Te_4 (Te-Bi-Te-Ge-Te-Bi-Te)和五层 Bi_2Te_3 (Te-Bi-Te-Bi-Te)之间交替。而 Bi_2Te_3 具有菱面体晶体结构,空间群为 $R\bar{3}m$,一个晶胞中有5个原子^[26],拓扑绝缘体的非平凡拓扑态受到时间反演对称性的保护^[27]。因此,在此系统中,体能带具有带隙,边缘/表面状态呈现狄拉克色散(图1(b))。图1(c)显示了由532 nm激光激发的 GeBi_4Te_7 材料的代表性拉曼光谱,掺杂材料的特征拉曼峰得到了清晰的解析。其特征峰值分别在99.7 cm^{-1} 、118.5 cm^{-1} 、138.3 cm^{-1} 处,与已发表的文献结果一致^[25]。

基于拓扑绝缘体异质结的器件通过微纳米工艺制备而成,我们在器件上构建了非对称偶极天线电极。偶极子天线通常用作提高太赫兹探测器灵敏度的一种手段,因为它们可以与太赫兹光产生共振,从而将光场能量定位在非常小的空间尺度上。通过实施非对称接触模式,光电探测器表现出不可忽略的光响应,同时采用时域有限差分(FDTD)模拟来研究天线的影 响。已经观察到,当电场矢量平行于通道时,最大太赫兹电场被限制在通道中。根据图1(d)中通道的局部光场建模,非对称偶极天线配置可以有效地聚焦太赫兹光。太赫兹辐射在非对称天线的源极和漏极之间产生温度梯度,温度梯度驱动光生载流子从高温区迁移到低温区,从而产生电势梯度^[20,28]

$$\Delta V(x) = - \int_{xRight}^{xLeft} \Delta S(E_f) \cdot \nabla T(x) dx, \quad (1)$$

光热电(PTE)效应的光电流由下式给出

$$I_{PTE} \propto \Delta V(x), \quad (2)$$

我们发现拓扑绝缘体异质结可能是太赫兹探测的有效结构方式,因为它们具有较大的塞贝克系数差值,并且可以在没有偏置电压的情况下产生光信号。

我们制备的器件表现出良好的欧姆接触,如图2(b)中室温下的IV曲线所示电阻为650 Ω 。器件的光学显微镜图像显示在插图中。 GeBi_4Te_7 材料的塞贝克系数大于 Bi_2Te_3 ,并且由于非对称的偶极子天线使得 GeBi_4Te_7 一端的温度较高,根据光热电效应电势梯度的公式得出 Bi_2Te_3 端的电势较高。当太赫兹光照射到器件上时,拓扑绝缘体材料吸收太赫兹光产生非平衡光生载流子,电势驱动电子流向 Bi_2Te_3 和空穴流向 GeBi_4Te_7 。器件的响应机制如图2

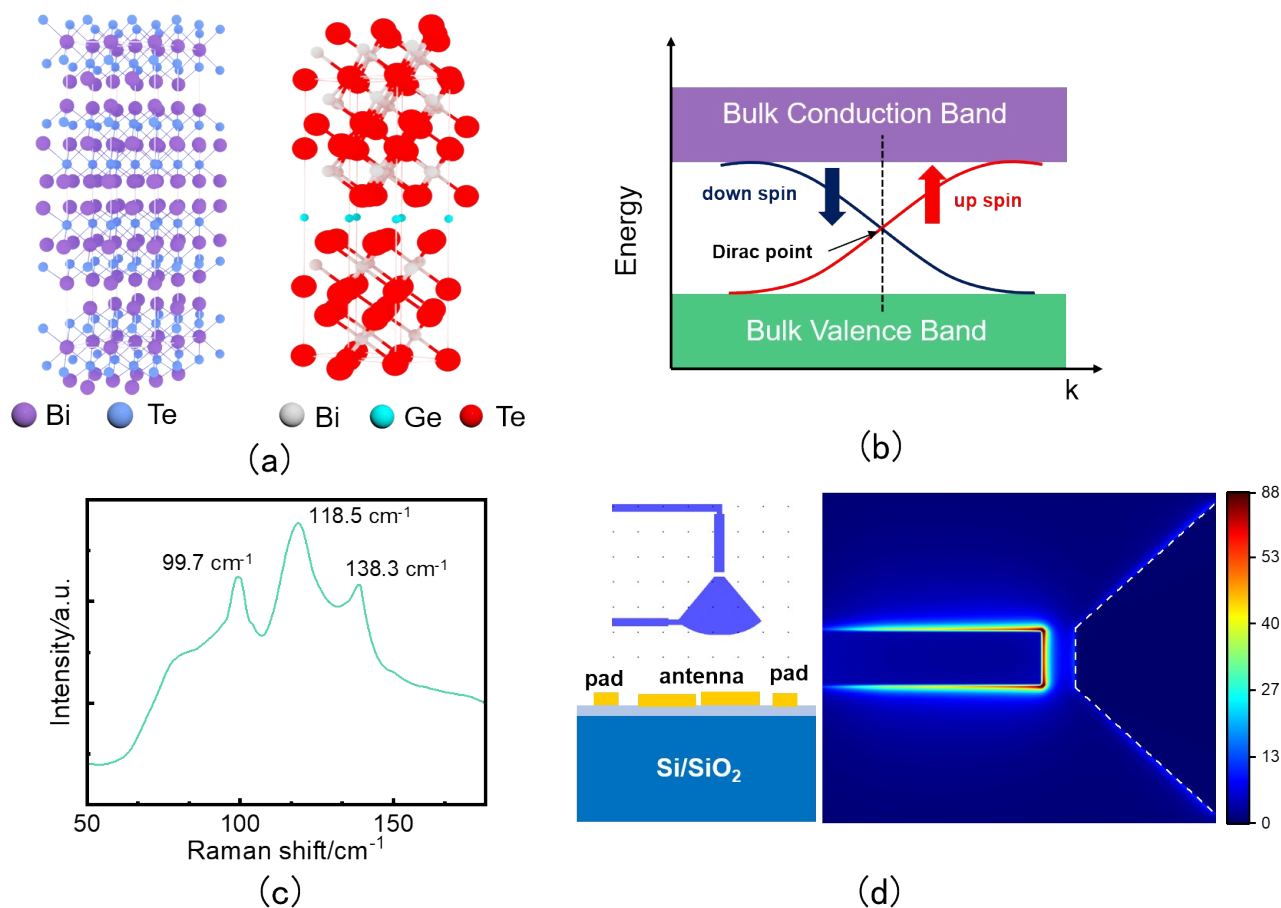


图1 (a) Bi₂Te₃和GeBi₄Te₇材料的原子结构示意图,(b) 拓扑绝缘体能带示意图,(c) 两种材料的拉曼光谱图,(d) 偶极子天线仿真结果

Fig. 1 (a) The schematic diagram of the atomic structure of Bi₂Te₃ and GeBi₄Te₇ materials, (b) the schematic diagram of the energy bands of a topological insulator, (c) Raman spectra of the two materials, (d) dipole antenna simulation results

(c)所示,主要得益于拓扑绝缘体的半金属特性即其导电的表面态。探测器的宽光谱响应如图2(d)所示,其最大光响应分别在0.033、0.112、0.27和0.5 THz频率处达到最大。为了在图中能够看得更清晰,我们将0.25~0.3 THz和0.49~0.5 THz的光电流分别放大了10倍和20倍。基于GeBi₄Te₇-Bi₂Te₃异质结的器件的功率密度依赖性也在图2(e)中进行了评估,其中所有结果都显示出对功率的良好线性依赖性。在入射功率 P_{in} 从0到64 μ W的范围内光电流 I_{ph} 的行为表明 $I_{ph} \propto P_{in}^\alpha$,其中 $\alpha = (0.99 \pm 0.004)$ 。该器件的线性动态范围>100,超过大多数基于二维材料的异质结构^[29-30]。响应时间通常计算为单个脉冲的光响应从10%增加到90%或从90%减少到10%所需的时间量。我们使用高速示波器来收集响应时间。图2(f)显示,在高于1 kHz的电调制频率下,器件的上升时间约为10 μ s,下降时间约为6 μ s。

图3(a)中0.112 THz和0.27 THz处响应电流的调制频率依赖性证明了器件的高速能力。此外,图3(b)曲线所示的3 dB点的频率约为23 kHz。图3(c)中显示了不同调制频率下的响应波形,在15 kHz的调制频率下器件的波形也完整清晰,证明了其快速响应能力。高频太赫兹0.5 THz光照下的波形如图3(d)所示,其波形由于受到太赫兹源TTL调制的影响而出现占空比漂移,但是波形依然完整清晰,显示出异质结器件高频响应特性。图3(e)显示了在0.112、0.27和0.5 THz下电压响应率的偏压依赖性。我们的器件均在-100 mV的偏压下取得最大的响应率,分别为592 V/W(0.112 THz)、203 V/W(0.27 THz)、40 V/W(0.5 THz)。此外,在零偏置电压附近存在明显的光热电效应,并且光电流对偏置电压的依赖性大致呈线性关系。噪声等效功率(NEP)被定义为噪声电压密度与响应度(V_r/R)之间的比率,用于衡量光电探测的灵敏度。噪声的频谱

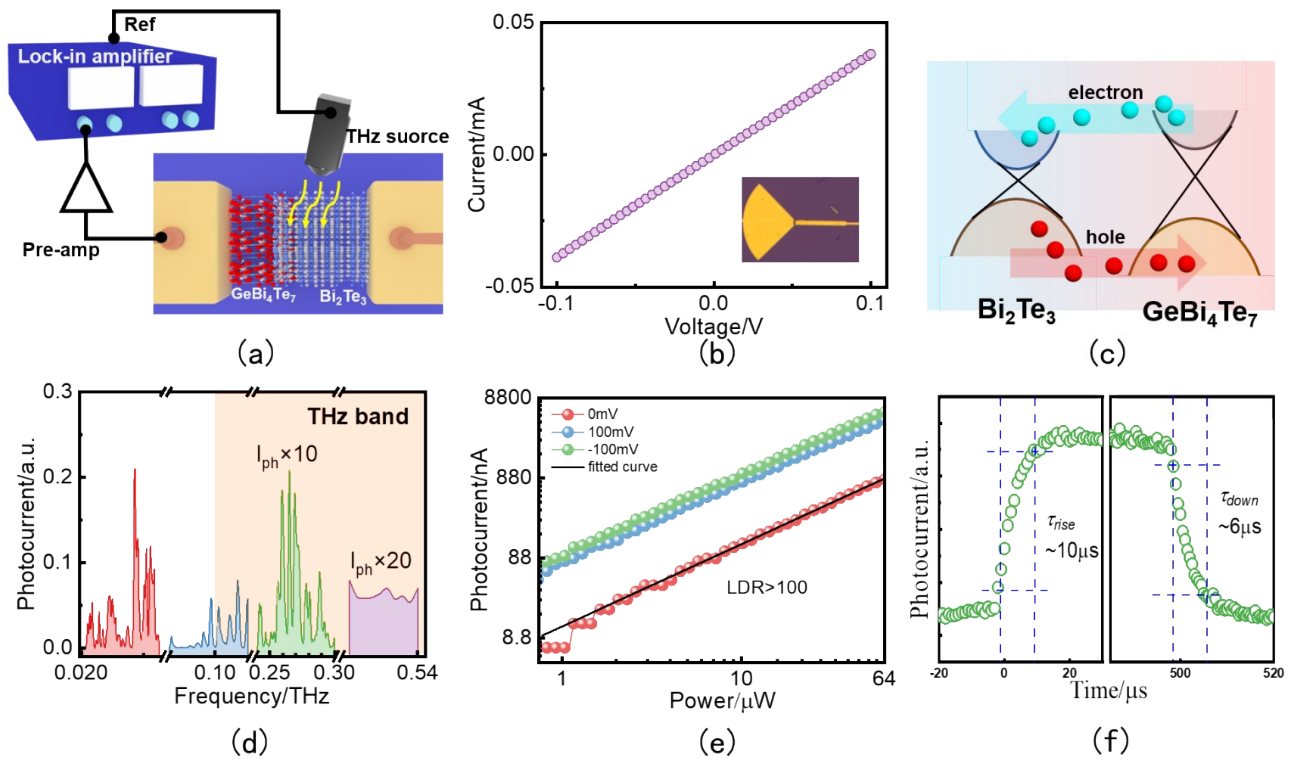


图2 (a) 器件结构和测试系统示意图, (b) 器件的 IV 曲线, 插图为器件的光学显微图, (c) 响应机制示意图, (d) 光响应的频谱图, (e) 不同偏置电压下光电流和入射光功率的曲线, (f) 零偏压下器件的上升/下降时间

Fig. 2 (a) The schematic diagram of device structure and test system, (b) IV curve of the device, the inset is an optical micrograph of the device, (c) the schematic diagram of the response mechanism, (d) spectrogram of the photoresponse, (e) curves of photocurrent and incident light power at different bias voltages, (f) rise/fall time of the device at zero bias

密度反映了整个系统中的几个主要噪声源, 例如 $1/f$ 噪声、散粒噪声和 Johnson-Nyquist 噪声。根据我们实验测量的结果, 噪声电压 V_{noise} 约为 45 nV。考虑了仪器和测量电路影响的噪声 NEP 可估算为 V_{noise}/R_V , 其值在 0.112 THz 接近 $84 \text{ pW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。图 3(f) 显示了在不同偏置电压下计算的 NEP, 其显示在 0.112、0.27 和 0.5 THz 下的最小 NEP 分别为 0.084、0.24 和 $1.2 \text{ nW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。高响应度和快速响应能力证明了 TI 的优异光电特性以及在拓扑材料的快速太赫兹成像中开发实际探测的潜力。

一般来说, 可见光/红外成像难以穿透许多物体, 而微波成像的分辨率有限, 无法看到精细的细节。从这个意义上说, 太赫兹成像是一个很好的候选者, 它结合了这两种成像方法的独特优势, 并以足够的分辨率和穿透力为目标。我们的异质结光电探测器具有响应速度快、NEP 小、稳定性好等优点, 已在多个大面积透射图像验证项目中得到有效应用。太赫兹光束通过光路聚焦在光阑后面的探

测器上, 通过光栅扫描光束焦点处的目标物体获取图像(图 4(a))。图 4(b) 显示了金属图案在 0.5 THz 光照下的太赫兹图像。将固定在一张纸上的金属图案放在焦平面上模拟物体探测, 可以清楚地显示出这个图案的轮廓。上述发现表明我们的设备已经适用于快速成像应用。

3 讨论

总之, 我们在本文中设计并仿真了一种非对称的偶极子天线, 证明其对于增强光热电效应具有很强的效果。同时, 我们基于拓扑绝缘体 Bi_2Te_3 - GeBi_4Te_7 制成的异质结探测器, 实现了宽带和高性能的太赫兹探测。室温下探测器实现 0.02~0.54 THz 的宽带探测能力, 并在 0.112、0.27、0.5 THz 实现响应率分别为 592、203、40 V/W, 且其对应的 NEP 分别为 84、240 和 $1.2 \text{ nW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。由于器件优异的性能, 我们实现了太赫兹频段下的扫描成像, 获得了 0.5 THz 高频下的成像结果图。并且基于拓扑绝缘体异质结结构的室温光热电效应

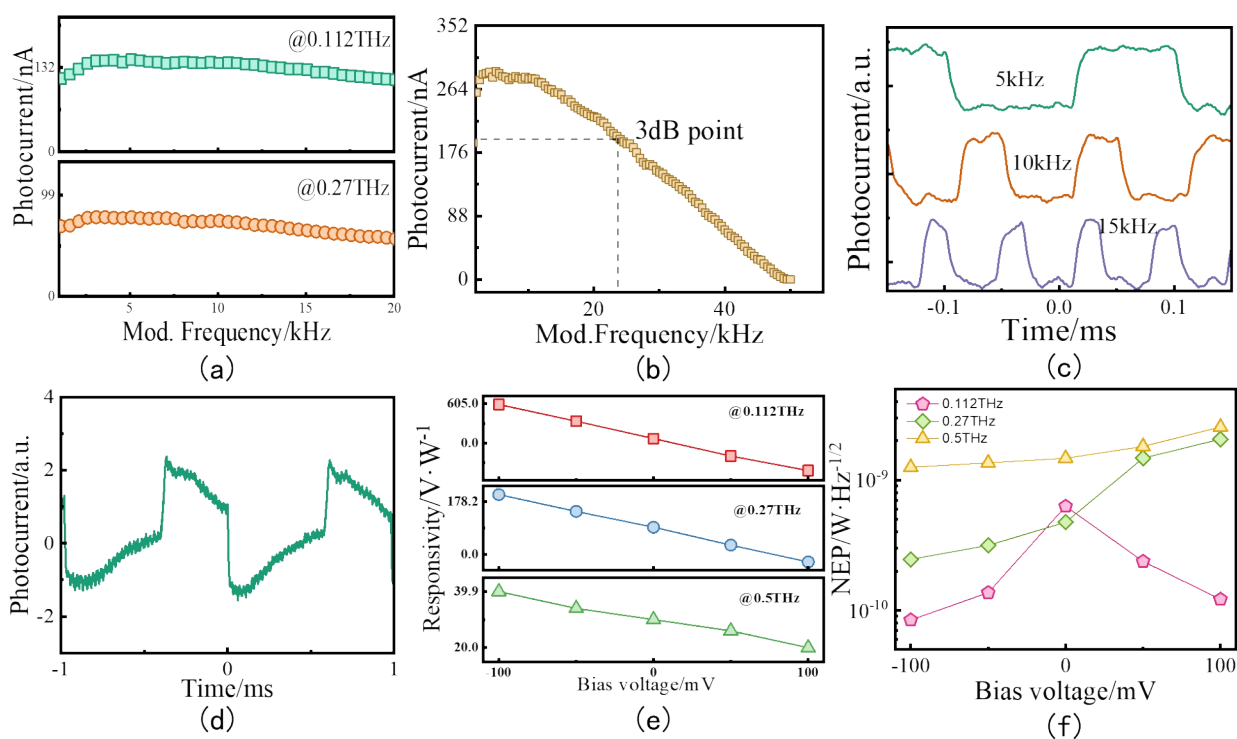


图3 (a) 在 0.112 和 0.27 THz 时响应电流与调制频率的关系, (b) 光响应电流与调制频率的关系, (c) 器件在 0.27 THz 下不同调制频率的波形图, (d) 器件在 0.5 THz 频率的波形图, (e) 器件在 0.112、0.27 和 0.5 THz 的不同偏置下的光电电压响应率, (f) 室温下不同偏置电压下三个入射频率的 NEP

Fig. 3 (a) Response current versus modulation frequency at 0.112 and 0.27 THz, (b) photoresponse current versus modulation frequency, (c) waveforms of the device at different modulation frequencies at 0.27 THz, (d) waveform diagram of the device at 0.5 THz frequency, (e) photovoltage responsivity of the device under different biases of 0.112, 0.27, and 0.5 THz, (f) NEP of three incident frequencies under different bias voltages at room temperature

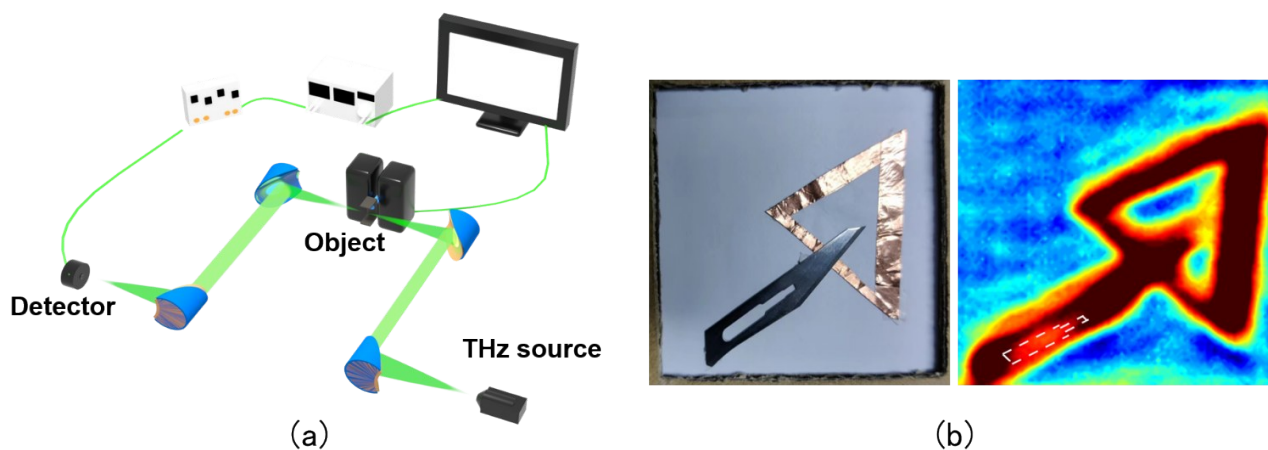


图4 (a) 扫描成像光路示意图, (b) 0.5 THz 成像结果图

Fig. 4 (a) The schematic diagram of scanning imaging optical path, (b) 0.5 THz imaging results

机制和拓扑绝缘体丰富的表面态特性,对器件的太赫兹探测机理进行了分析。我们的研究表明,拓扑材料的异质结太赫兹探测器在未来具有广泛的应用前景。

References

- [1] Dhillon S S, Vitiello M S, Linfield E H, *et al.* The 2017 terahertz science and technology roadmap [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, **50**(4): 043001.
- [2] Hafez H A, Kovalev S, Deinert J C, *et al.* Extremely effi-

- cient terahertz high-harmonic generation in graphene by hot Dirac fermions [J]. *Nature*, 2018, **561** (7724): 507–511.
- [3] Tielrooij K.J., Principi A., Reig D.S., *et al.* Milliwatt terahertz harmonic generation from topological insulator metamaterials [J]. *Light, Science & Applications*, 2022, **11**: 315.
- [4] Giorgianni F., Chiadroni E., Rovere A., *et al.* Strong nonlinear terahertz response induced by Dirac surface states in Bi₂Se₃ topological insulator [J]. *Nature Communications*, 2016, **7**(1): 11421.
- [5] Chen S., Zhao C., Li Y., *et al.* Broadband optical and microwave nonlinear response in topological insulator [J]. *Optical Materials Express*, 2014, **4**(4): 587–596.
- [6] Maczewsky L.J., Heinrich M., Kremer M., *et al.* Nonlinearity-induced photonic topological insulator [J]. *Science*, 2020, **370**(6517): 701–704.
- [7] Young Steve, Charles L. Kane. Dirac Semimetals in Two Dimensions [J]. *Physical Review Letters*, 2015, **115**: 126803.
- [8] He X., Liu F., Lin F., *et al.* Tunable terahertz Dirac semimetal metamaterials [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, **54**(23): 235103.
- [9] Luo L., Wang H.X., Lin Z.K., *et al.* Observation of a phononic higher-order Weyl semimetal [J]. *Nature Materials*, 2021, **20**(6): 794–799.
- [10] Lai J., Liu X., Ma J., *et al.* Anisotropic broadband photoresponse of layered type-II weyl semimetal MoTe₂ [J]. *Advanced Materials*, 2018, **30**(22): 1707152.
- [11] Yu R., Weng H., Fang Z., *et al.* Topological node-line semimetal and Dirac semimetal state in antiperovskite Cu₃PdN [J]. *Physical Review Letters*, 2015, **115**(3): 036807.
- [12] Zhang L., Dong Z., Wang L., *et al.* Ultrasensitive and Self-Powered Terahertz Detection Driven by Nodal-Line Dirac Fermions and Van der Waals Architecture [J]. *Advanced Science*, 2021, **8**(23): 2102088.
- [13] Viti L., Coquillat D., Politano A., *et al.* Plasma-wave terahertz detection mediated by topological insulators surface states [J]. *Nano Letters*, 2016, **16**(1): 80–87.
- [14] Tang 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.
- [15] Cai X., Sushkov A.B., Suess R.J., *et al.* Sensitive room-temperature terahertz detection via the photothermoelectric effect in graphene [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, **9**(10): 814–819.
- [16] Chen Y.L., Analytis J.G., Chu J.H., *et al.* Experimental realization of a three-dimensional topological insulator, Bi₂Te₃ [J]. *Science*, 2009, **325**(5937): 178–181.
- [17] Garate Ion, Marcel Franz. Inverse spin-galvanic effect in the interface between a topological insulator and a ferromagnet [J]. *Physical Review Letters*, 2010, **104**: 146802.
- [18] Qi X.L., Li R., Zang J., *et al.* Inducing a magnetic monopole with topological surface states [J]. *Science*, 2009, **323**(5918): 1184–1187.
- [19] Xu S.Y., Wray L.A., Xia Y., *et al.* Realization of an isolated Dirac node and strongly modulated Spin Texture in the topological insulator Bi₂Te₃ [J]. *Mesoscale and Nanoscale Physics*, arXiv:1101.3985, 2011.
- [20] Lu X., Sun L., Jiang P., *et al.* Progress of photodetectors based on the photothermoelectric effect [J]. *Advanced Materials*, 2019, **31**(50): 1902044.
- [21] Li Wei, Jason G. Valentine. Harvesting the loss: surface plasmon-based hot electron photodetection [J]. *Nanophotonics*, 2017, **6**: 177–191.
- [22] Tang S.J., Liu S., Yu X.C., *et al.* On-chip spiral waveguides for ultrasensitive and rapid detection of nanoscale objects [J]. *Advanced Materials*, 2018, **30**(25): 1800262.
- [23] Novotny Lukas, Niek Van Hulst. Antennas for light [J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**: 83–90.
- [24] Bharadwaj P., Deutsch B., Novotny L. Optical antennas [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, **1**(3): 438–483.
- [25] Guo L.G., Yao Y., Duan J.N., *et al.* Tunable soliton molecules in mode-locked fiber laser based on GeBi₄Te₇ saturable absorber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, **157**: 108649.
- [26] Zhang H., Liu C.X., Qi X.L., *et al.* Topological insulators in Bi₂Se₃, Bi₂Te₃ and Sb₂Te₃ with a single Dirac cone on the surface [J]. *Nature Physics*, 2009, **5**(6): 438–442.
- [27] Ando Yoichi. Topological Insulator Materials [J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2013, **82**: 102001–102001.
- [28] Song J.C.W., Rudner M.S., Marcus C.M., *et al.* Hot carrier transport and photocurrent response in graphene [J]. *Nano Letters*, 2011, **11**(11): 4688–4692.
- [29] Jin Y., Keum D.H., An S.J., *et al.* A Van Der Waals homojunction: ideal p-n diode behavior in MoSe₂ [J]. *Advanced Materials*, 2015, **27**(37): 5534–5540.
- [30] Luo M., Lu C., Liu Y., *et al.* Band alignment of type-I SnS₂/Bi₂Se₃ and type-II SnS₂/Bi₂Te₃ van der Waals heterostructures for highly enhanced photoelectric responses [J]. *Sci. China Mater*, 2022, **65**: 1000–1011.