

# 基于热载流子光热电效应的室温高灵敏 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 太赫兹探测器

蔡 苗, 王兴军, 郭旭光\*

(上海理工大学 太赫兹技术创新研究院, 上海 200093)

**摘要:** 高性能非制冷太赫兹 (THz) 探测器在许多技术领域都有广泛应用, 如高速率数据通信、实时成像、光谱学和传感。然而具备高灵敏度和快速响应能力的室温太赫兹探测器依然比较稀缺。近年来, 二维材料中的热载流子光热电效应被发现可以用于太赫兹和长波红外的室温高速高灵敏光探测。在这项研究中, 作者构建了基于高性能二维层状热电材料  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  的室温太赫兹探测器, 该器件采用领结天线作为非对称光耦合器, 利用热载流子光热电效应实现零偏模式下的太赫兹光探测。结果表明, 基于  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  的太赫兹探测器具有优异的太赫兹探测性能, 在 100 GHz 频段辐射下的响应率和噪声等效功率分别为 0.45 A/W 和 17 pW/Hz<sup>1/2</sup>, 并实现了 12  $\mu\text{s}$  的快速响应时间。该工作展示了基于热载流子光热电效应的  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  太赫兹探测器在实现高性能非制冷太赫兹探测器上的良好应用前景。

**关键词:** 太赫兹探测器; 二维材料; 热载流子光热电效应;  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$

中图分类号: 043

文献标识码: A

## Room-temperature Highly sensitive $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ Terahertz Detector Based on Hot-carrier Photothermoelectric Effect

CAI Miao, WANG Xing-Jun, GUO Xu-Guang\*

(Terahertz Technology Innovation Research Institute, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** High-performance uncooled terahertz (THz) detectors have a wide range of applications in many technological fields, such as high-rate data communications, real-time imaging, spectroscopy and sensing. However room-temperature THz detectors with high sensitivity and fast response capability are still rare. In recent years, the hot-carrier photothermoelectric (PTE) effect in two-dimensional (2D) materials has been found to be useful for room-temperature, high-speed, and highly sensitive photodetection in the THz and long-wave infrared radiation. In this study, the authors constructed a room-temperature THz detector based on the high-performance 2D layered thermoelectric material  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , which employs a bow-tie antenna as an asymmetric light coupler and utilizes the hot-carrier PTE effect to achieve THz detection in zero-bias mode. The results show that the  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  detector exhibits excellent THz detection performance, with a responsivity and noise equivalent power (NEP) of 0.45 A/W and 17 pW/Hz<sup>1/2</sup>, and a fast response time of 12  $\mu\text{s}$  under 100 GHz radiation, respectively. This work demonstrates the promising application of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  THz detectors based on the hot-carrier PTE effect in realizing high-performance uncooled THz detectors.

**Key words:** Terahertz Detector, 2D materials, Hot-carrier Photothermoelectric Effect,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$

**PACS:**

### 引言

在太赫兹频率 (0.1–10 THz) 下工作的光电探

测器在通信、成像、质量检测、化学光谱等领域的许多应用中发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。对于许多此类应用而言, 具有高灵敏度和快速响应能力的室温太赫兹探测器市场需求巨大。然而, 太赫兹波的光子能量

基金项目: 国家自然科学基金 (61731020)

Foundation items: the National Natural Science Foundation of China (61731020)

作者简介 (Biography): 蔡苗 (1993–), 男, 湖北十堰人, 博士研究生, 主要研究领域为二维材料光电探测器. E-mail: 211180041@st.usst.edu.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: xgguo@usst.edu.cn

(0.42 meV–42 meV)非常接近室温( $T_0 = 300\text{ K}$ )热能( $k_B T_0 = 26\text{ meV}$ ,  $k_B$ 为波尔兹曼常数),这使得该波段的非制冷光子型探测器极具挑战性<sup>[2]</sup>。目前,主流的商用非制冷太赫兹探测器包括热探测器(热释电探测器、高莱管和测辐射热计)和固态电子探测器(肖特基势垒二极管和场效应晶体管探测器)<sup>[3]</sup>。虽然这些探测器得到了广泛应用,但它们仍然存在噪声等效功率( $NEP$ )低(热释电探测器和高莱管的噪声等效功率接近 $1\text{ nW/Hz}^{1/2}$ )、响应时间慢(热释电探测器、高莱管和非制冷测辐射热计的响应时间为毫秒)或频谱带宽窄(肖特基势垒二极管和场效应晶体管探测器的频谱带宽通常小于 $1\text{ THz}$ )等问题。

近年来,二维材料由于出色的光学、热学和电学特性,正在成为制造高性能红外和太赫兹光电探测器的理想候选材料<sup>[4-6]</sup>。研究人员基于不同探测机制和器件设计构建了各种类型的二维材料太赫兹探测器,并在器件性能上取得了令人瞩目的进展<sup>[7]</sup>。其中,最引人关注的进展是基于热载流子光热电效应的二维材料室温太赫兹探测器<sup>[8-9]</sup>。在这类器件中,热载流子效应使得器件具备高的灵敏度和快的响应速度,并且具有宽带响应和零偏模式的优点。在热载流子效应中,由于二维材料吸收的太赫兹电磁能量主要被转化为电子系统中的热量,而不是晶格热。最终电子系统与没有太赫兹光照时相比具有更高的温度,而晶格温度变化不大。在这种情况下,器件的光热电响应产生主要由载流子的加热和冷却动力学以及热载流子的输运过程主导,因此具备高的光电转化效率和快的响应速度<sup>[10]</sup>。石墨烯是最早用于开发热载流子光热电效应型太赫兹探测器的二维材料。由于强的电子-电子散射、弱的电子-声子耦合和小的电子热容,石墨烯在宽的光谱范围表现出强烈的热载流子效应。研究人员基于石墨烯的热载流子光热电效应开发了一系列非制冷太赫兹探测器<sup>[11-12]</sup>。在这些器件中,局部栅控和异种接触金属导致的不对称会通过热载流子光热电效应产生净的零偏光电流。此外,通过引入等离激元共振,谐振腔,超表面等增强光吸收设计,研究人员进一步提高了石墨烯热载流子光热电探测器的灵敏度<sup>[13-15]</sup>。

近年来,以碲化铋( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ )为代表的新兴二维层状拓扑绝缘体材料以其超高的载流子迁移率、强烈的光吸收和适中的体能带隙(0.15 eV)使其成为室温下长波光探测的合适候选材料<sup>[16-17]</sup>。此外, $\text{Bi}_2\text{Te}_3$

受时间反转对称性保护的金属狄拉克表面态不仅能有效抑制电子反向散射,还能自身提供拓扑保护,使其在空气环境中保持快速载流子传输能力和长期化学稳定性。作为室温条件下性能最好的热电材料之一, $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 多年来一直是热电领域的研究热点<sup>[18]</sup>。然而,基于 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 的热载流子光热电效应的室温太赫兹探测器的研究还很稀缺,有待进一步探索。

这里,我们制备了基于层状拓扑绝缘体热电材料 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 的室温太赫兹探测器,该器件采用非对称领结天线设计,通过热载流子光热电效应实现零偏模式下的光响应。在太赫兹辐照下,领结天线通过电场局域和增强将太赫兹辐射聚焦到 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 沟道一端实现非对称太赫兹加热。在不对称热载流子温度梯度的驱动下,器件通过热电效应产生非零的太赫兹响应。实验结果显示 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 器件在室温和零偏模式下具有优异的太赫兹探测性能,在 $100\text{ GHz}$ 频段的响应率和 $NEP$ 分别为 $0.45\text{ A/W}$ 和 $17\text{ pW/Hz}^{1/2}$ ,并具有 $12\text{ }\mu\text{s}$ 的快速响应时间。我们的结果为探索高性能非制冷太赫兹探测器提供了新的思路。

## 1 实验方法

### 1.1 天线仿真

考虑到领结天线可以通过偶极共振诱导的电场局域和增强将入射的太赫兹辐射有效聚焦到天线的馈电间隙区域,我们设计了领结天线作为太赫兹光耦合器来增强 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 的太赫兹自由载流子吸收。我们采用时域有限差分法(FDTD)来进行电磁仿真,设计了偶极谐振频率为 $100\text{ GHz}$ 的领结天线。入射波采用平面电磁波,电场偏振平行于天线臂方向。所设计领结天线的总长度、天线臂的宽度和馈电间隙宽度分别为 $783\text{ }\mu\text{m}$ 、 $303\text{ }\mu\text{m}$ 和 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。领结天线馈电间隙区域的平均电场增强因子和表面电场分布通过仿真软件场监视器记录的电场数据提取。

### 1.2 器件制备

高质量的 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 晶体通过化学气象沉积法生长。这里我们使用对太赫兹波具有低损耗的高阻氧化硅片(电阻率大于 $10000\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ )作为制备器件的衬底,硅片和 $\text{SiO}_2$ 层的厚度分别为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 和 $300\text{ nm}$ 。首先,通过电子束光刻技术在硅衬底上定义平面非对称领结天线电极图案。随后,使用热蒸发金属镀膜仪沉积Cr/Au( $15/45\text{ nm}$ )薄膜,并通过进一步

的金属剥离过程获得所需的电极结构。最后,使用蓝膜胶带将  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  薄片从块状晶体中剥离,并使用 PDMS 转移技术将其定点转移到非对称领结天线金属电极的沟道区域以形成电接触。

### 1.3 光响应测试

器件的  $I$ - $V$  特性曲线由半导体参数分析仪 (Keithley, 4200A-SCS) 测量。在太赫兹光响应测量中,由微波源 (Rohde & Schwarz SMB 100A, 0–50 GHz) 驱动的 6 倍频倍增器和 8 倍频倍增器产生了 75–110 GHz 和 110–170 GHz 的线性偏振辐射。调制频率为 1 kHz 的太赫兹辐射通过喇叭天线发射到自由空间。太赫兹辐射的输出功率使用热释电计 (Vector H410) 进行校准。75–110 GHz 和 110–170 GHz 辐射源的功率密度分别为  $1 \text{ mW}/\text{cm}^2$  和  $0.4 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 。光响应信号由锁相放大器 (Zurich Instruments, MFLI) 和示波器 (Tektronix MSO2024B) 在经过低噪声电流前置放大器 (Stanford, SR570) 之后记录。所有测量均在室温和大气环境下进行。

## 2 实验结果

如图 1(a) 所示,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  的天然层状晶体结构由  $\text{Te}(1)$ - $\text{Bi}$ - $\text{Te}(2)$ - $\text{Bi}$ - $\text{Te}(1)$  五个原子层组成,其中每个五元层 (QL) 内的键合是通过强共价键实现的,而 QL 之间的键合是通过弱范德华力实现的。因

此,可以通过机械剥离获得不同厚度的  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  晶体。图 1(b) 为多层  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  晶体的拉曼光谱,光谱中 57.5、101.4 和 133.5  $\text{cm}^{-1}$  处的峰可归因于  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  的  $A_{1g}^1$ 、 $E_g^2$  和  $A_{1g}^2$  振动模式<sup>[17]</sup>。为了实现  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  热载流子光热电探测器,我们设计了不对称领结天线结构以实现不对称太赫兹加热。图 1(c) 为集成非对称领结天线的  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  太赫兹探测器的制备流程图。图 1(d) 为制备的  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  太赫兹探测器光学显微镜图。图 1(e) 显示了制备的  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件的原子力显微镜 (AFM) 图像,测得的  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  薄片的厚度为 140 nm。电学测量显示制备的  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件表现出良好的欧姆接触,测量的器件  $I$ - $V$  曲线显示器件的电阻为 2.2 k $\Omega$ 。

图 2(a) 所示为集成非对称领结天线的  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  太赫兹探测器的概念示意图。在太赫兹辐照下,领结天线作为非对称光耦合器将入射的太赫兹光能聚焦到  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  沟道的一端以实现非对称太赫兹加热。图 2(b) 为 FDTD 仿真获得的不同频率下领结天线馈电间隙的平均电场增强因子。由于偶极子谐振增益,峰值场增强因子可达 252 倍。图 2(b) 中的插图对应于 100 GHz 频率处天线馈电间隙的表面电场分布,显示出强的电场局域和增强。图 2(c) 为太赫兹激发下的热载流子效应示意图。在低能太赫兹波段,由于弱的电子-声子作用,热载流子效应导致二

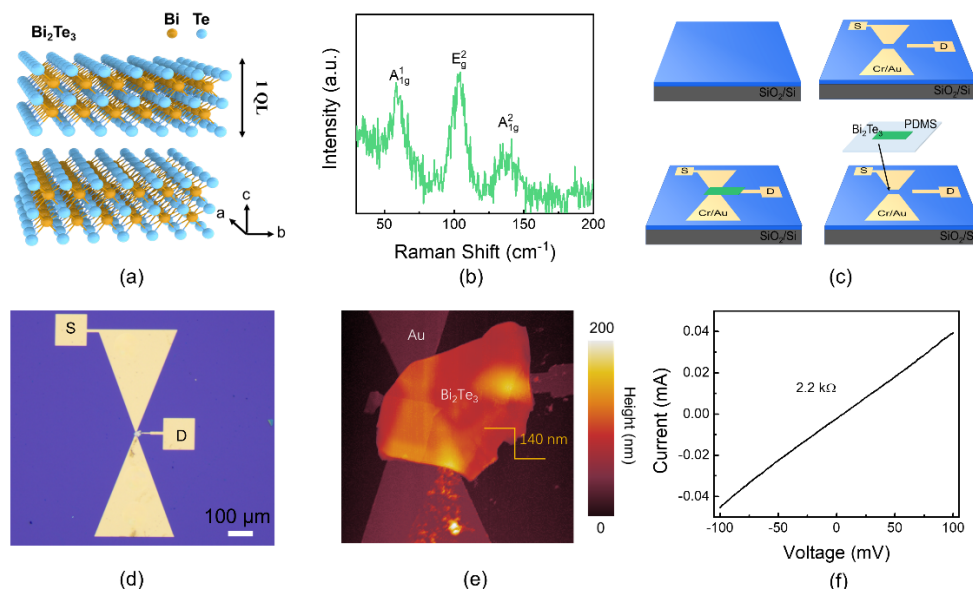


图 1 材料表征和器件制备: (a)  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  的晶体结构, (b)  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  晶体的拉曼光谱, (c) 集成非对称领结天线的  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  太赫兹探测器的制备流程, (d)  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件的光学显微镜图, (e)  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件沟道区域的 AFM 形貌图, (f) 器件的电学  $I$ - $V$  曲线

Fig. 1 Materials characterization and device preparation: (a) Crystal structure of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , (b) Raman spectrum of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  crystal, (c) preparation process of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  THz detectors with integrated asymmetric bowtie antenna, (d) optical microscope image of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  device, (e) AFM morphology of channel region of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  device, (f)  $I$ - $V$  curve of the device.



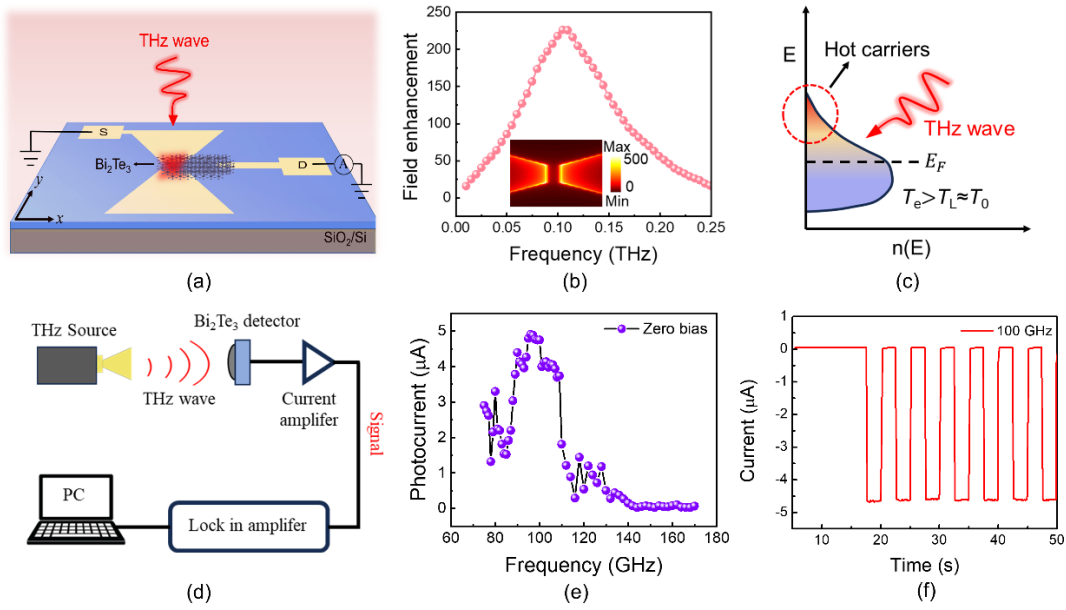


图2 零偏太赫兹光电流响应: (a)集成非对称领结天线的 $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 太赫兹探测器概念示意图, (b)领结天线馈电间隙的表面平均电场增强随频率的变化。太赫兹波垂直入射到器件表面, 电场偏振方向沿天线臂方向。插图为在 100 GHz 频段天线馈电间隙区域的模拟表面电场分布, (c)太赫兹激发下的热载流子效应原理图, (d)太赫兹响应测试装置图, (e) $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 探测器在 75-170 GHz 频率范围的零偏光电流谱, (f) $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 探测器在 100 GHz 频率太赫兹辐照下的零偏光开关响应

Fig. 2 Zero-bias THz photocurrent response: (a) Schematic of the asymmetric bow-tie antenna integrated  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  THz detector, (b) the surface-averaged electric field intensity as a function of frequency in the feed gap of the bow-tie antenna. The inset shows the simulated surface electric field distribution in the antenna feed gap region at the 100 GHz band, (c) schematic diagram of the hot-carrier effect under THz excitation, (d) diagram of the THz response test setup, (e) zero-bias photocurrent spectrum of the  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  detector for the frequency range of 75-170 GHz, (f) zero-bias photocurrent switching characteristics of the  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  device under on/off THz radiation of 100 GHz.

维材料中的载流子系统高效热化, 晶格温度几乎不发生改变。最终, 电子系统达到一个新的费米狄拉克分布, 而未与晶格达到热平衡, 该分布具有比晶格和环境更高的温度。由于天线局域场导致的不对称太赫兹加热, 最终  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  沟道建立起非对称的热载流子温度分布。在热载流子温度梯度的驱动下载流子的扩散导致器件产生净的零偏光热响应<sup>[9]</sup>

$$V_{\text{PTE}} = \int S(x) \nabla T(x) dx, \#(1)$$

其中  $S(x)$  和  $T(x)$  为分别为  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件沟道的塞贝系数和温度分布。为了验证  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件的太赫兹探测性能, 我们测试了器件在 75 GHz-170 GHz 频率范围的室温零偏太赫兹响应。

图 2(d) 为用于  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件太赫兹光响应测试的实验装置图, 入射太赫兹波的偏振与领结天线臂方向平行, 以确保器件获得最佳性能。图 2(e) 为测量的太赫兹光电流响应谱, 结果显示  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件具有优异的零偏光电流响应, 其峰值光电流响应可达 5  $\mu\text{A}$ 。优异的太赫兹光响应可归因于  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  良好的热

电性能, 领结天线诱导的强不对称太赫兹加热和热载流效应导致的电子系统的高效热化。此外在 100 GHz 频率开关太赫兹辐照下,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件显示出优异的光开关响应(图 2(f))。

为了更好展现  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件的太赫兹探测性能, 我们进一步评估了其响应率、NEP 和响应速度。响应率反映了光电探测器的光电转化效率, 其计算公式为:  $R_A = I_{\text{ph}} / (P_{\text{in}} \times S_A)$ ,  $R_A$  为电流响应率,  $I_{\text{ph}}$  为光电流,  $P_{\text{in}}$  为太赫兹辐射功率密度,  $S_A$  为器件的有效面积。这里我们使用领结天线的衍射面积作为探测器的有效光接收面积<sup>[19]</sup>, 其大小与波长有关, 表达式为:  $S_A = 3\lambda^2 / 8\pi$ 。图 3(a) 为  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件的零偏频谱电流响应率, 其最大响应率为 0.45 A/W。噪声等效功率(NEP)是衡量探测器灵敏度的核心参数, 其反映了探测器可检测的最小有效信号功率。NEP 的计算表达式为:  $\text{NEP} = i_n / R_A$ ,  $i_n$  是噪声电流密度。由于  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件工作在零偏模式下, 其本征噪声主要由热噪声决定, 其大小为:  $i_n = \sqrt{4k_B T / R}$ ,  $R$  为器件

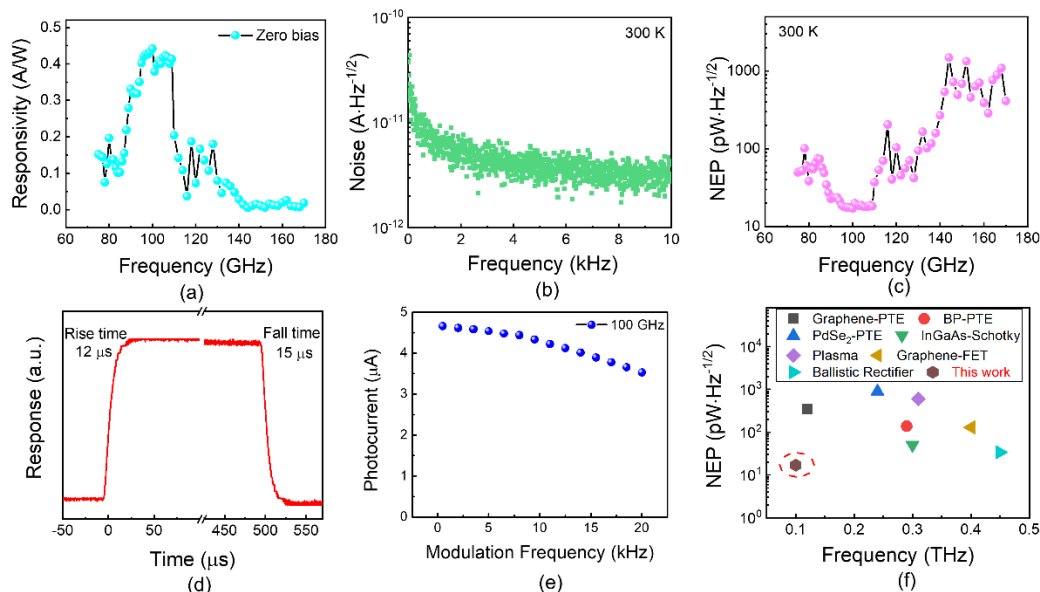


图3 室温太赫兹探测性能评估:(a)  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  太赫兹探测器的零偏响应率谱,(b)  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件的零偏室温噪声谱,(c)  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件的 NEP 谱,(d) 时间分辨太赫兹响应的上升沿和下降沿,(e) 太赫兹响应随调制频率的变化,(f)  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件与其他室温太赫兹探测器的性能对比

Fig. 3 Performance evaluation of room-temperature THz detection: (a) THz responsivity of the  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  THz detector, (b) zero-bias room-temperature noise spectrum of the  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  device, (c) NEP spectrum of the  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  device, (d) display of rising and falling edges of the time-resolved response in a single period, (e) modulation frequency dependent THz response, (f) comparison of performance of the  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  device with other room-temperature THz detectors.

阻值,  $T$  为室温 (300 K)<sup>[8]</sup>。图 3(b) 为测量的  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件在零偏压下的室温噪声谱。在本文中, 由于器件噪声谱实际是包含了器件的本征热噪声和环境的背景噪声, 采用包含实际外部系统噪声的噪声数据能够更好反映器件在实际应用中的噪声水平。根据上述分析, 频谱 NEP (图 3(c)) 显示  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件显示出优异的灵敏度, 其最低 NEP 值为  $17 \text{ pW}/\text{Hz}^{1/2}$ 。对于太赫兹探测器而言, 快速响应能力对于高速通信和实时成像等领域的应用至关重要。探测器的响应速度分为上升时间和下降时间。上升时间定义为光信号在输入到光电探测器后, 光电流从上升沿的 10% 上升到 90% 的时间。下降时间则定义为光电流从下降沿的 90% 下降到 10% 的时间。图 3(d) 为示波器记录的  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件在调制太赫兹辐照下单个周期内的光响应波形。结果显示  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件具有快的响应速度, 其上升时间和恢复时间分别为 12  $\mu\text{s}$  和 15  $\mu\text{s}$ 。快的响应速度速反映了热载流子效应的速度优势。图 3(e) 为  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件的太赫兹响应随调制频率的变化。结果显示即使调制频率达到 20 kHz, 探测器的光响应也没有很大的衰减, 进一步证明了器件的快速响应能力。此外, 考虑到在太赫兹频段的响应速度测量受到前置电流放大器和太

赫兹源调制速度的限制, 实际测量的响应速度的通常比本征响应速度要偏慢。如图 3(f) 所示, 我们将  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  太赫兹探测器的灵敏度与现有的室温太赫兹探测器进行了对比<sup>[20-26]</sup>。

### 3 结论

总之, 我们在本文中制备了一种基于热电拓扑绝缘体材料  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  的室温太赫兹探测器。

该器件借助非对称领结天线设计实现  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  沟道的不对称太赫兹加热, 并利用热载流子光热电效应实现零偏模式的太赫兹光探测。在室温和零偏模式下,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  器件在 100 GHz 频段显示出优异的太赫兹探测性能, 其响应率和 NEP 分别为  $0.45 \text{ A}/\text{W}$  和  $17 \text{ pW}/\text{Hz}^{1/2}$ , 并具有 12  $\mu\text{s}$  的快速响应时间。快的响应速度反映了热载流子效应的重要作用。优异的太赫兹探测性能可归结于  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  材料良好的热电性能, 非对称领结天线设计和太赫兹频段强的热载流子效应。我们的结果揭示了  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  太赫兹探测器的潜在应用价值, 并为构建高性能室温太赫兹探测器提供了新的思路。

### References

[1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. Nature

- Photonics, 2007, 1(2): 97–105.
- [2] Tong J, Suo F, Zhang T, et al. Plasmonic semiconductor nanogroove array enhanced broad spectral band millimetre and terahertz wave detection[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10(1): 58.
  - [3] Rogalski A. Progress in performance development of room temperature direct terahertz detectors [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2022, 43 (9) : 709–727.
  - [4] Chen Y, Tan C, Wang Z, et al. Momentum-matching and band-alignment van der Waals heterostructures for high-efficiency infrared photodetection [J]. Science Advances, 2022, 8(30): eabq1781.
  - [5] Miao J, and Wang C. Avalanche photodetectors based on two-dimensional layered materials [J]. Nano Research, 2021, 14(6): 1878 – 1888.
  - [6] Li T, Miao J, Fu X, et al. Reconfigurable, non-volatile neuromorphic photovoltaics [J]. Nature Nanotechnology, 2023, 18(11): 1303 – 1310.
  - [7] Niu Y, Ding N, Wu W, et al. Progress and prospect of terahertz detectors based on two-dimensional materials [J]. Materials Today Nano, 2025, 29: 100570.
  - [8] Lu X, Sun L, Jiang P, et al. Progress of Photodetectors Based on the Photothermoelectric Effect [J]. Advanced Materials, 2019, 31(50): 1902044.
  - [9] Dai M, Zhang X, Wang Q. 2D Materials for Photothermoelectric Detectors: Mechanisms, Materials, and Devices [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34 (21) : 2312872.
  - [10] Massicotte M, Soavi G, Principi A. Hot carriers in graphene – fundamentals and applications [J]. Nanoscale, 2021, 13(18): 8376–8411.
  - [11] Castilla S, Terrés B, Autore M, et al. Fast and Sensitive Terahertz Detection Using an Antenna-Integrated Graphene pn Junction [J]. Nano Letters, 2019, 19 (5) : 2765–2773.
  - [12] 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.
  - [13] Yao Y, Cai M, Fu J, et al. Configurable microcavity-enhanced graphene photothermoelectric terahertz detectors [J]. Photonics Research, 2024, 12(10): 2300–2310.
  - [14] Cai X, Sushkov A B, Jadidi M M, et al. Plasmon-Enhanced Terahertz Photodetection in Graphene [J]. Nano Letters, 2015, 15(7): 4295–4302.
  - [15] Koepfli S M, Baumann M, Koyaz Y, et al. Metamaterial graphene photodetector with bandwidth exceeding 500 gigahertz [J]. Science, 2023, 380(6650): 1169–1174.
  - [16] Wredh S, Dai M, Hamada K, et al. Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> – Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> Direct Photo – Thermoelectric Mid-Infrared Detection [J]. Advanced Optical Materials, 2024, 12(31): 2401450.
  - [17] Zhang X, Liu X, Zhang C, et al. Epitaxial Topological Insulator Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> for Fast Visible to Mid-Infrared Heterojunction Photodetector by Graphene As Charge Collection Medium [J]. ACS Nano, 2022, 16(3): 4851–4860.
  - [18] Li D, Gong Y, Chen Y, et al. Recent Progress of Two-Dimensional Thermoelectric Materials [J]. Nano-Micro Letters, 2020, 12(1): 36.
  - [19] Zhang J, Cai M, Zheng X, et al. Ultrasensitive terahertz response mediated by split ring antenna induced giant resonant field enhancement [J]. APL Photonics, 2024, 9 (6): 066105.
  - [20] Generalov A A, Andersson M A, Yang X, et al. A 400-GHz Graphene FET Detector [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2017, 7 (5) : 614–616.
  - [21] Bandurin D A, Gayduchenko I, Cao Y, et al. Dual origin of room temperature sub-terahertz photoresponse in graphene field effect transistors [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(14).
  - [22] Guo W, Wang L, Chen X, et al. Graphene-based broadband terahertz detector integrated with a square-spiral antenna [J]. Optics Letters, 2018, 43(8): 1647–1650.
  - [23] Dong Z, Yu W, Zhang L, et al. Highly Efficient, Ultra-broad PdSe<sub>2</sub> Phototransistors from Visible to Terahertz Driven by Mutiphysical Mechanism [J]. ACS Nano, 2021, 15(12): 20403–20413.
  - [24] Daghestani N, Parow-Souchon K, Pardo D, et al. Room temperature ultrafast InGaAs Schottky diode based detectors for terahertz spectroscopy [J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 99: 240–247.
  - [25] 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]. Advanced Science, 2020, 7(5): 1902699.
  - [26] Auton G, But D B, Zhang J, et al. Terahertz Detection and Imaging Using Graphene Ballistic Rectifiers [J]. Nano Letters, 2017, 17(11): 7015–7020.