

引用:许文浩,孙作昂,王文哲,等. 面向 6G 通信的场调控拓扑超表面太赫兹探测器[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2026, 39(4):535-543.

Citation:XU Wenhao,SUN Zuoang,WANG Wenzhe,ZHANG Min,SONG Qi. Field-controlled topological metasurface Tera- hertz detector for 6G communications [J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition),2026,39(4):535-543.

文章编号 1672-6634(2026)04-0535-09

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025120004

面向 6G 通信的场调控拓扑超表面太赫兹探测器

许文浩¹,孙作昂¹,王文哲¹,张敏²,宋琦¹

(1. 聊城大学 物理科学与信息工程学院,山东 聊城 252059;2. 深圳大学 异质异构集成全国重点实验室、
光电子器件与系统教育部广东省重点实验室、深圳大学物理与光电工程学院,广东 深圳 518000)

摘要 为提升太赫兹探测器性能,本文设计并制备了基于拓扑超表面与 MnBi_2Te_4 薄膜的太赫兹探测器件。采用 3D 打印技术制作 L 形亚波长微结构,通过磁控溅射法沉积 MnBi_2Te_4 薄层,利用 MnBi_2Te_4 的拓扑表面态特性与 L 形结构的局域表面等离子体谐振效应,实现太赫兹波强局域化与高效能量耦合。实验表征其在 0.1 THz 频段的性能:无外场时,响应度(R_A)达 1.72 A/W,噪声等效功率(NEP)低至 8.23 pW/Hz^{1/2},探测率(D^*)最高 5.43×10⁹ cm·Hz^{1/2}/W;外加磁场与激光后, R_A 最高提升至 3.01 A/W,NEP 降至 5.69 pW/Hz^{1/2}, D^* 达 7.85×10⁹ cm·Hz^{1/2}/W。研究表明,L 形拓扑结构与磁场/光场增强作用,可显著优化探测器光电转换效率与噪声抑制能力,为高性能太赫兹探测提供新方案。

关键词 太赫兹探测器;拓扑超表面; MnBi_2Te_4 薄膜

中图分类号 TN241

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Field-controlled topological metasurface Terahertz detector for 6G communications

XU Wenhao¹, SUN Zuoang¹, WANG Wenzhe¹, ZHANG Min², SONG Qi¹

(1. School of Physics Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 2. National Key Laboratory of Heterogeneous Integration, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518000, China)

Abstract To enhance the performance of terahertz detectors, this study designed and fabricated a terahertz detection device based on an topological metasurface and an MnBi_2Te_4 thin film. The L-shaped subwavelength microstructures were fabricated using 3D printing technology, and the MnBi_2Te_4 thin layer was deposited via magnetron sputtering. By leveraging the topological surface state properties of MnBi_2Te_4 and the localized surface plasmon resonance effect of the L-shaped structure, strong localization of terahertz waves and efficient energy coupling were achieved. The device's performance in the 0.1 THz frequency band was characterized experimentally: without external field, the responsivity (R_A) reached 1.72 A/W, the noise-equivalent power (NEP) was as low as 8.23 pW/Hz^{1/2}, and the detectivity (D^*) peaked at 5.43

收稿日期:2025-12-05

基金项目:国家自然科学基金项目(12104314);山东省自然科学基金项目(ZR2024QF217);山东省高等学校青年创新团队发展计划项目(2024KJH132)资助

通信作者:宋琦,男,汉族,博士,副教授,研究方向:太赫兹光子学技术,E-mail:songqi@lcu.edu.cn.

$\times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$. After applying an external magnetic field (0.145 mT) and laser (50 mW), the R_A was maximally increased to 3.01 A/W, the NEP was reduced to 5.69 pW/Hz^{1/2}, and the D^* reached 7.85 $\times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$. The research indicates that the L-shaped topological structure and the enhancement effects of the magnetic/optical field can significantly optimize the photoelectric conversion efficiency and noise suppression capability of the detector, providing a new solution for high-performance terahertz detection.

Keywords Terahertz detector; topological metasurface; MnBi_2Te_4 film

0 引言

太赫兹波通常指代频率介于 0.1~10 THz 的电磁辐射,其所处的频谱位置介于微波与红外光之间^[1]。一方面,其光子能量极低(约 0.41~41 meV),远低于生物组织中化学键的键能,不会对生物分子造成电离损伤,具备无损探测的天然优势;另一方面,多数极性分子、生物大分子及半导体材料在太赫兹波段存在特征振动与转动能级跃迁,使其成为物质结构分析与痕量检测的理想工具^[2]。此外,太赫兹波还具有良好的穿透性,能够穿透纸张、塑料、织物等非极性材料,且不易受电磁干扰,在安检成像、保密通信、深空探测等领域展现出不可替代的应用潜力^[3]。近年来,随着 6G 通信技术的发展,太赫兹波段因其超大带宽、超高传输速率的特性,被视为下一代无线通信的核心候选频段,进一步推动了太赫兹探测技术的研发热潮。然而,太赫兹技术的产业化应用仍面临诸多瓶颈,其中探测器性能不足是核心制约因素。由于太赫兹光子能量低,且大气中水分、氧气等成分对其存在强烈吸收,导致探测器需要同时具备高响应度、低噪声等效功率(N_{EP})与室温工作稳定性^[4]。当前主流太赫兹探测技术均存在明显短板:传统肖特基二极管探测器在 1 THz 以上频段响应度常低于 0.1 A/W,且制备工艺复杂、成本较高;热释电探测器与 Golay 池探测器虽结构简单,但普遍存在灵敏度不足、噪声等效功率偏大的问题;基于二维材料(如石墨烯、黑磷)的探测器虽具备室温工作能力,但存在暗电流过大、长期稳定性差等问题, N_{EP} 多处 $10^{-10} \text{ W/Hz}^{1/2}$ 量级^[5-6]。因此,开发新型材料体系与探测机制,突破现有性能极限,成为太赫兹技术发展的关键。

拓扑量子材料的兴起为高性能探测器件提供了新范式。其中, MnBi_2Te_4 作为首个本征磁性拓扑绝缘体,其层状反铁磁结构与强自旋轨道耦合的协同作用,使表面态能隙与太赫兹光子能量形成天然匹配,且磁序与拓扑态的强关联特性为动态调控提供了独特路径^[7]。研究证实, MnBi_2Te_4 中存在亚皮秒级相干磁声子耦合,可通过光激发实现太赫兹频段的磁态超快调制,其奇数层与偶数层分别呈现的量子反常霍尔效应与轴子绝缘体相,更暗示了拓扑保护的高效光电转换机制^[8]。 MnBi_2Te_4 的拓扑表面态存在无带隙的狄拉克费米子态,这类表面态电子有效质量小、迁移率高,且受拓扑保护不易发生背散射,恰好匹配太赫兹光子的低能量特性。太赫兹光子可高效激发拓扑表面态中狄拉克点附近的电子,实现表面态内或体态与表面态间的载流子跃迁。激发后的非平衡载流子能快速输运,在器件结构不对称或微弱电场作用下形成可探测的电信号^[9-10]。同时, MnBi_2Te_4 的拓扑特性可减轻低频 1/f 噪声影响,进一步提升探测的稳定性^[11]。因此, MnBi_2Te_4 被视为设计太赫兹光电探测器的理想平台。

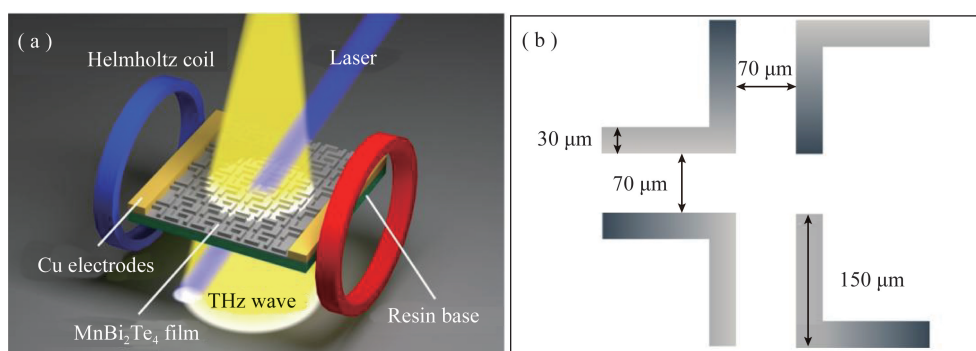
超表面作为由亚波长微结构单元组成的人工电磁结构,能够通过调控单元的几何形状、尺寸与排列方式,实现对电磁波偏振、相位、振幅的灵活调控^[12]。其中拓扑对称结构的超表面,可通过激发局域表面等离子体谐振效应,将太赫兹波强局域于微结构的边角、尖端等区域,显著提升电磁波与光活性材料的能量耦合效率^[13]。3D 打印技术的发展为复杂拓扑超表面的制备提供了技术支撑,能够精准构建具有三维空间构型的亚波长微结构,进一步增强局域表面等离激元(LSP)效应^[14]。将拓扑超表面与 MnBi_2Te_4 薄膜相结合,利用拓扑表面态的量子特性与超表面的场增强效应,有望突破传统探测器的性能极限。

因此,本文设计并制备了 L 形 3D 拓扑超表面 MnBi_2Te_4 太赫兹探测器。采用 3D 打印技术构建亚波长微结构阵列,结合磁控溅射沉积高质量 MnBi_2Te_4 薄膜,利用 L 形结构的局域表面等离激元谐振实现太赫兹波强局域化。通过系统调控外加磁场强度与激光功率,探究场增强效应与外场调控的协同机制,重点表征器件在 0.1 THz 频段的响应度、NEP 与探测率,为高性能太赫兹探测技术提供新的材料体系与设计方案。

1 器件设计与实验设备

1.1 L型拓扑超表面的设计

该太赫兹探测器结构如图1(a)所示,本文采用3D打印技术制备3D亚波长微结构,再通过磁控溅射法在微结构表面沉积 MnBi_2Te_4 薄层。L形3D微结构的具体参数如图1(b)所示,其结构长为 $150\text{ }\mu\text{m}$,宽为 $30\text{ }\mu\text{m}$,结构间隔为 $70\text{ }\mu\text{m}$,且沿Z方向拉伸形成L形3D微结构。该L形结构的拓扑对称性与 MnBi_2Te_4 的电子拓扑态形成光-物质拓扑耦合,使太赫兹波的传输、吸收过程受拓扑保护,产生非平庸的光子带隙和边界态,最终实现对太赫兹波的高效探测。 MnBi_2Te_4 作为本征磁性拓扑绝缘体,其层状反铁磁结构与强自旋轨道耦合协同作用,产生拓扑非平庸的表面态与能隙特性。在太赫兹波段,其表面态能隙与太赫兹光子能量匹配,为太赫兹探测提供了关键物理基础。此外,外加磁场可打破 MnBi_2Te_4 的时间反演对称性,诱导量子反常霍尔效应或轴子绝缘体态,使太赫兹响应呈现量子化特征。激光的作用具有双重性:一方面,激光照射后在 MnBi_2Te_4 中产生非平衡载流子,调制材料电导率以实现太赫兹探测;另一方面,激光可激发层间磁声子耦合,在太赫兹频率下相干调控材料磁性,实现超快磁态切换。



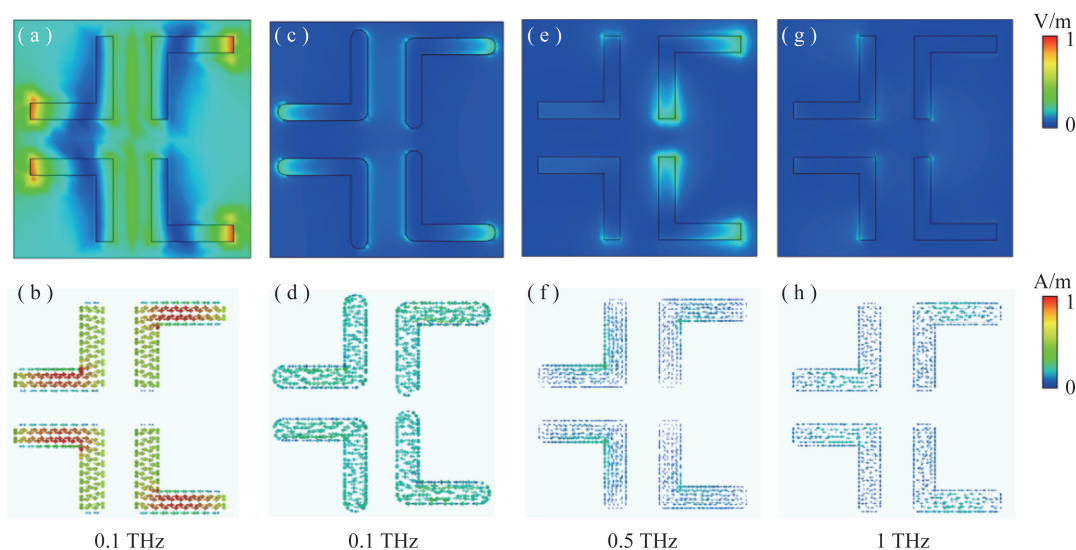
注:(a) 拓扑超表面结构;(b) 结构尺寸参数。

图1 拓扑超表面的结构与尺寸参数

Fig. 1 Structure and dimensional parameters of the topological metasurface

该器件针对 0.1 THz 太赫兹频段设计,采用CST STUDIO SUITE仿真软件模拟其电磁响应(电场、表面电流分布),以揭示太赫兹波与结构的相互作用规律,为高性能探测器设计提供理论支撑。从拓扑几何设计角度,该L形拓扑超表面属于等离子体谐振拓扑单元L形的边角、边缘构成拓扑边界,将表面等离子体波限制在结构内部,促使其形成驻波模式,从而在 0.1 THz 频段发生谐振。其L形单元的对称排布,可激发多阶等离子体谐振模式,通过拓扑结构的几何约束实现模式的选择性增强与耦合。L形微结构的表面电场分布模拟如图2(a)和表面电流分布如图2(b)在L形边角、尖端区域高度集中,这是亚波长局域场增强的直接体现。几何不连续处的边界条件使等离子体振荡能量被强烈约束,形成近场增强区。表面电流在L形边缘的扩散与集中,形成等离子体共振结构,增强太赫兹波的局域化,提高光子吸收效率。并在尖端的近场增强显著提高表面载流子浓度,增强光电流产生效率,直接提升探测器响应度。此外,拓扑结构可进一步抑制反铁磁有序的热涨落,保证磁光耦合效应的稳定性。使太赫兹波与器件光活性材料的相互作用更高效,为实现高灵敏度、低噪声的太赫兹探测器奠定了物理基础。

为进一步凸显L形微结构的场增强优势,我们对其边角进行圆角化处理并开展对比仿真。从图2(c)、(d)的电场分布仿真结果可见,圆角化后的微结构,其局域电场强度与表面电流密度均明显弱于原始L形微结构,直观印证了原始L形结构通过边角几何不连续性实现的强局域场约束效应。此外,为验证L形微结构在目标频段的性能优越性,我们进一步将探测频率拓展至 0.5 THz 和 1 THz 并进行仿真。由图2(e-h)的电场与表面电流仿真结果可知,随着探测频率的升高,微结构的局域电场集中效应与表面电流密度均呈现显著衰减趋势,充分证明该L形拓扑超表面在 0.1 THz 频段能够实现最优的太赫兹波局域化与能量耦合效果。综上,该L形超表面通过拓扑几何设计与等离子体共振增强太赫兹波的局域化,实现了在 0.1 THz 下太赫兹波的强局域化与高效能量耦合,是一种极具潜力的太赫兹探测器增强结构。



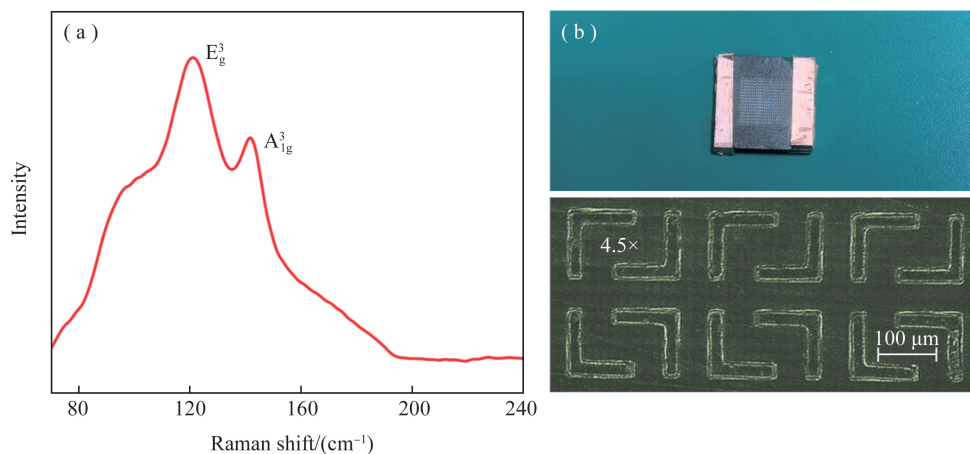
注: (a)、(c)、(e)、(g)为电场分布仿真; (b)、(d)、(f)、(h)为表面电流仿真。

图2 微结构仿真

Fig. 2 Microstructure simulation

1.2 MnBi_2Te_4 薄膜的制备与表征

结构表面的 MnBi_2Te_4 薄膜采用磁控溅射技术制备,该技术在太赫兹器件薄膜制备中具有显著优势:高真空工艺环境可有效降低氧、氮等气体杂质的掺入,结合磁场约束效应提升溅射粒子的能量均匀性,有助于获得高结晶质量与成分纯净的薄膜;磁场增强电子与工作气体的碰撞概率,提高等离子体离化率,使薄膜与基片形成牢固的界面结合,改善附着力与长期稳定性;功率、气压、溅射时间等工艺参数可精准调控,能实现纳米至微米级目标厚度的精确控制,且兼容大面积、批量制备场景,契合太赫兹器件的规模化应用需求。其具体工艺参数设定如下:沉积腔室抽真空度为 10 Pa,氩气流量为标准条件下 $40\text{ cm}^3/\text{min}$,将射频目标功率设置为 100 W,射频溅射时间为 600 秒。制备流程具体为:首先对沉积腔室进行深度抽真空,排除残余气体对薄膜生长的干扰;其次,在真空环境中通入氩气作为工作气体,施加高电压激发辉光放电,使氩气电离形成等离子体;随后,利用磁场约束电子在靶材表面附近做螺旋运动,延长电子运动路径以提高气体离化率,进而增加等离子体中氩离子密度;最后,高能氩离子在电场作用下加速撞击 MnBi_2Te_4 靶材表面,通过动量转移溅射出靶材原子/分子,这些粒子在基片表面迁移、吸附并结晶,最终形成连续致密的薄膜。为了系统表征薄膜的结构与形貌特性,采用拉曼光谱与电荷耦合器件(CCD)相机进行测试分析。如图3(a)所示, MnBi_2Te_4



注: (a) MnBi_2Te_4 的拉曼光谱; (b) 器件实物图和 CCD 相机放大 4.5 倍的器件表面形貌图。

图3 器件表征图

Fig. 3 Device characterization diagrams

薄膜的拉曼光谱在和 122.05 cm^{-1} 和 141.63 cm^{-1} 处出现明显特征峰,该峰对应于 MnBi_2Te_4 晶体中的 E_g^3

和 A_{1g}^3 振动模式^[15],表明薄膜具有典型的层状晶体结构;图3(b)为器件实物图和 CCD 相机拍摄放大后的器件表面形貌图,与预设的器件结构模型具有良好的一致性,验证了 3D 打印技术制备工艺的可靠性。

1.3 实验设备

为评估探测器的性能,本实验采用光电流激励法,通过对比光电流与暗电流的差异完成性能测试。实验中使用 Keithley 2400 数字源表测量光电流与暗电流,该设备的高精度特性可有效保障数据的准确性与可靠性。采用连续波太赫兹发射器(TeraSense IMPATT diode@100GHz),发射波长为 0.1 THz、功率 70 mW 的太赫兹波,对应 6G 通信核心实验频段,为探测器提供目标探测信号。实验装置如图4所示,具体操作步骤如下:先将器件置于实验平台的中心位置,借助 L 型探针臂与探针调整座,将两个尺寸为 10 μm 的钨钢探针固定于平台上,并使其与器件的铜电极相接触,进而与数字源表相连。数字源表则通过计算机来调控所需的各项参数,并记录下 I-V 曲线,最后通过计算得到探测器的各项参数。外加亥姆霍兹线圈产生磁场,亥姆霍兹线圈的核心优势在于能够在中心区域产生高度均匀的磁场,实验中将器件精确放置于线圈中心的均匀磁场区域内,即可实现外加磁场变化的检测。另外,利用在 445 nm 的激光下,以 45°入射角入射到器件上,通过调节激光功率检测外光场对探测器的性能的影响。

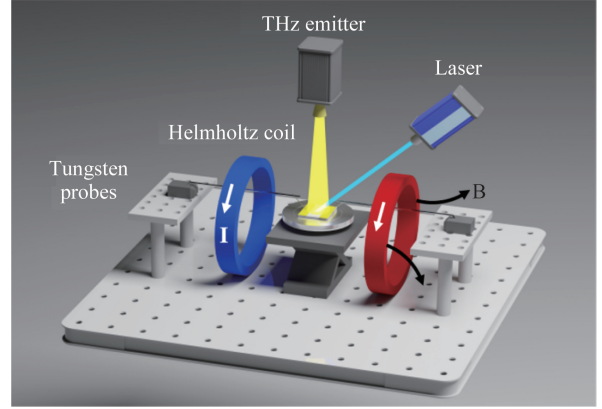


图4 微电流探针平台装置图

Fig. 4 Diagram of the micro-current probe platform

2 结果与讨论

2.1 无外场时的探测器性能

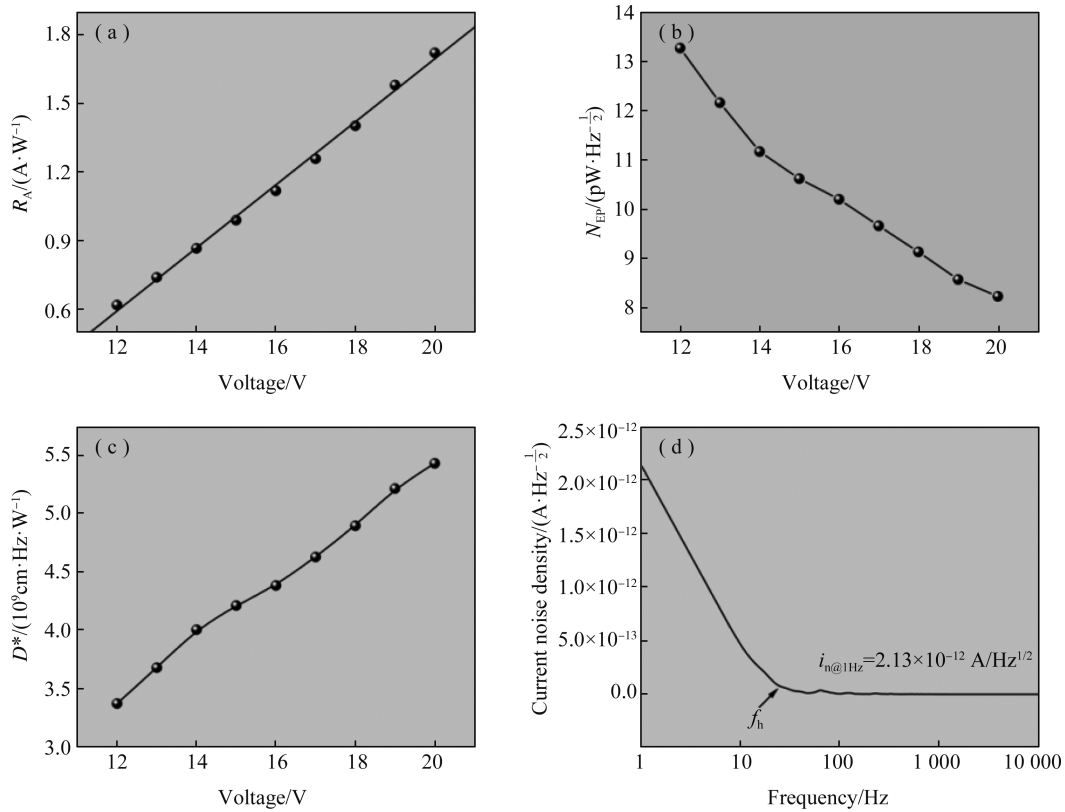
MnBi_2Te_4 作为拓扑绝缘体,其太赫兹探测的物理机制核心源于拓扑保护的电子态特性与太赫兹光子的能量耦合效应,结合材料自身的反铁磁有序、拓扑表面态及量子限制效应,形成了独特的探测原理。 MnBi_2Te_4 的表面存在无带隙的狄拉克费米子态,电子输运不受杂质散射影响,且表面态电子的有效质量极小、迁移率极高,对低能量光子(如太赫兹波)具有极强的响应灵敏度。太赫兹光子能量虽低于材料体态带隙,但可直接激发拓扑表面态中狄拉克点附近的电子—电子从狄拉克锥的价带顶跃迁至导带底,或从体态价带激发至表面态导带,形成非平衡载流子。其拓扑表面态的电子迁移率远高于体态,且受拓扑保护无背散射,激发后的载流子可在表面快速输运。在外加偏压作用下,载流子分离并形成可探测的光电流。器件的优异性能,不仅源于 MnBi_2Te_4 拓扑表面态的高迁移率与 L 形超表面局域场增强效应的简单叠加,更深刻地源于二者之间潜在的拓扑匹配协同机制。L 形超表面的拓扑边界态将太赫兹波能量高度局域于其尖角和边缘,这为光电转换提供了量的保障;而 MnBi_2Te_4 的拓扑表面态则提供了受拓扑保护、背散射显著抑制的高效载流子输运通道,这为光电转换提供了质的提升。尤为关键的是,这种几何拓扑与电子拓扑的耦合,可能使得在超表面近场区域被激发的载流子,能更高效地注入到 MnBi_2Te_4 的拓扑表面态中进行输运,从而在界面处减少因晶格失配或缺陷引起的非弹性散射。这或许是为本器件在获得高响应度的同时,仍能保持极低噪声等效功率的另一个核心物理机制。因此,本器件的超表面不仅增强了太赫兹场强,其拓扑特性还可能优化了光生载流子的注入与输运效率。由于表面态电子无背散射,载流子寿命较长,且激发阈值低,使得 MnBi_2Te_4 在太赫兹波段具有高响应度和噪声,尤其适用于室温下的高灵敏探测。

为了验证探测器的性能参数,通常用光响应度(R_A)、噪声等效功率(N_{EP})和检测率(D^*)来衡量探测器的性能,其表达式为^[16]

$$R_A = \frac{I}{P}; D^* = \frac{\sqrt{S}}{N_{EP}}; N_{EP} = \frac{v_n}{R}, \quad (1)$$

其中 I 为光电流, P 为太赫兹源入射功率, S 是检测有效面积,而(3)式子中的 v_n 是总噪声, R 为光响应度。总噪声可表示为^[17] $v_n = \sqrt{v_t^2 + v_b^2} = \sqrt{4K_B T r + 2q I_d r^2}$, 其中 v_t 为热约翰逊-奈奎斯特噪声, v_b 为由偏置

电压引入的暗电流噪声, K 是波尔兹曼常数, T 是以开尔文为单位的绝对探测器温度, r 代表以 Ω 为单位的器件电阻, q 是基波电荷, I_d 是器件的暗电流。



注: 无外场时的探测器的 (a) R_A ; (b) N_{EP} ; (c) D^* ; (d) 电流噪声密度。

图 5 无外场时的探测器性能图

Fig. 5 Detector performance graphs without external field

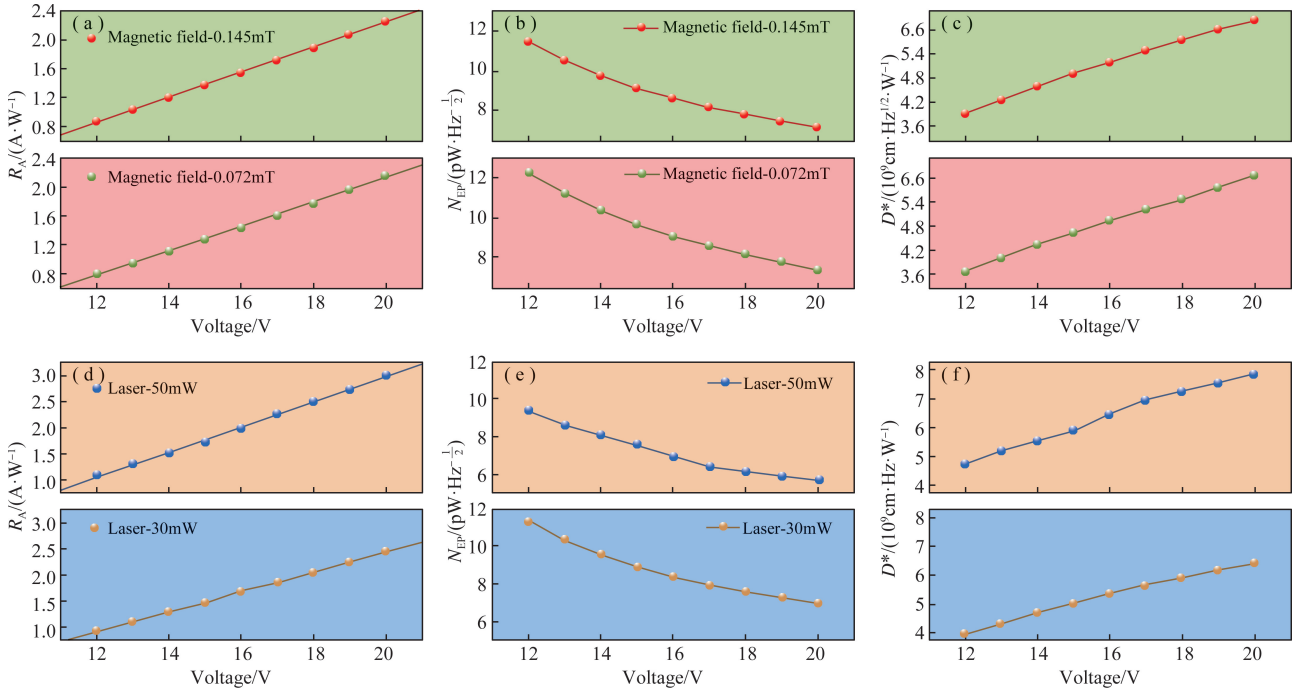
图 5 (a~c) 分别显示了器件在 0.1 THz 下室温工作时电压偏置为 12~20 V 下的 R_A 、 N_{EP} 和 D^* , 在偏置电压为 8.5 V 的情况下, R_A 随偏置电压的增加呈线性增长, 其响应率可达 1.72 A/W。与基于 graphene/MnBi₂Te₄ 异质结探测器^[18]的 4.61 mA/W 相比, 本文所提出的 L 形 3D 拓超表面 MnBi₂Te₄ 太赫兹探测器, 体现出较强的光电转换能力。噪声等效功率 NEP 随偏置电压的增加逐渐降低, 最低可达 8.23 pW/Hz^{1/2}, 与商用肖特基二极管^[19](15.2 pW/Hz^{1/2}) 相比, 该探测器的 NEP 更低, 说明其在噪声抑制方面表现优异, 有利于实现高灵敏度探测。探测率 D^* 随偏置电压的增加显著提升, 最高达到 5.43×10^9 cm·Hz^{1/2}/W, 反映出该探测器在探测性能上的优势, 能够对太赫兹信号进行高效探测。图 5 (d) 为低频电流噪声密度曲线, 其中噪声密度在高频段趋于稳定, 经过计算 1/f 噪声在 1 Hz 处的值为 $I_{n,1/f} = 6.34 \times 10^{-12}$ 。因此, 能够表明探测器内部的载流子迁移率波动、表面散射、陷阱效应等不利因素较少, 说明探测器的质量较高, 其稳定性和可靠性更好。此外, 1/f 噪声越小, 探测器能够探测到微弱的太赫兹信号的能力就越强。

2.2 磁场和激光场增强后的探测器性能

此外, 外加磁场可打破 MnBi₂Te₄ 的时间反演对称性, 诱导量子反常霍尔效应或轴子绝缘体态, 使太赫兹响应呈现量子化特征。在 MnBi₂Te₄ 薄膜中, 可实现量子反常霍尔态, 存在与磁畴运动和拓扑性质相关的电导率变化。在铁磁相中, 电导率的磁指纹在一个磁相内扫描外加磁场时是可重复的, 并且随着磁场的变化, 电导率会有相应的改变, 其霍尔电导率公式为^[20]

$$\sigma_{xy} = C \frac{e^2}{h}, \quad (2)$$

其中 C 为陈数, e 为电子电荷, h 为普朗克常数。在这种情况下, 当外加磁场使得系统的陈数 C 增大时, 霍尔电导率 σ_{xy} 会随之增加。霍尔电导率的增加本质上反映了载流子迁移率与浓度的协同增强。在太赫兹探测器中, 这会直接提升光电流转换效率。



注:外加磁场后探测器的 (a) R_A ; (b) N_{EP} 和 (c) D^* ; 外加激光场后探测器的 (d) R_A ; (e) N_{EP} 和 (f) D^* 。

图6 外加磁场和激光场后探测器的性能图

Fig. 6 Detector performance graphs after applying an external magnetic and laser magnetic fields

如图6(a)所示,响应度 R_A 从 1.72 A/W(无其他场)增加到 2.25 A/W(偏置电压为 20 V,磁场强度为 0.145 mT)。这是由于磁场通过洛伦兹力约束载流子运动,减少散射损耗,使载流子在太赫兹场作用下的定向输运能力增强,从而提高光电流的产生效率。结合 LSP 增强效应,磁场诱导的霍尔电导率提升会进一步强化太赫兹波与载流子的相互作用,使近场增强区域的载流子激发效率显著提高,最终表现为探测器响应度的提升。此外,霍尔电导率的增加有助于降低探测器的噪声等效功率。载流子迁移率的提升使载流子在太赫兹场下的响应速度加快,减少热噪声和散粒噪声的影响。从图6(b)中可以看出 N_{EP} 低至 7.15 pW/Hz^{1/2} (偏置电压为 20 V,磁场强度为 0.145 mT),相较于无其他场时其 N_{EP} 减少 13.3%。 D^* 如图6(c)所示,随着磁场的增加,其探测率从 $6.44 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ (偏置电压为 20 V,磁场强度为 0.072 mT)提高至 $7.85 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ (偏置电压为 20 V,磁场强度为 0.145 mT)。综上,外加磁场通过提升霍尔电导率,可从载流子输运、场增强、噪声抑制等方面协同优化太赫兹探测器的响应度、灵敏度与物理功能扩展性,是实现高性能太赫兹探测的有效调控手段。

外加光场可通过提升载流子利用率,通过激发 MnBi_2Te_4 中的电子-空穴对,改变其电导率。而光场强度直接影响载流子密度,进而调制太赫兹波的吸收和反射特性,以提高探测器的性能。若是忽略单个光子的能量对产生光电子的直接作用和由于激光辐照在材料内部引起的光压等效效应,由激光所引起的非线性电导率变化可以通过弗洛奎特理论来展开表示^[21]

$$\sigma(E) = \sqrt{(1 + \sigma_3(E)H_2)^2 + \sigma_3^2(E)H_1^2}, \quad (3)$$

式中 H_1 和 H_2 分别表示电子-电子相互作用和电子-随机杂质相互作用下的系统哈密顿量,而其中三阶非线性效应引起的电导率变化若采用高斯型场分布的光功率取代光场强度,则三阶电导率可以表示为^[22]

$$\sigma_3(P) = \frac{e^2 v_F^2}{\hbar^2 \omega^4} \cdot \frac{2 \ln(2)}{c \epsilon_0 \pi r^2} P, \quad (4)$$

其中 c 为光速, ϵ_0 为真空介电常数, r 是入射激光束的近似半径, P 是入射激光功率。在基于非线性光学效应的太赫兹探测中, $\sigma_3(P)$ 的提升会直接提高太赫兹波与外光场的混频效率,使探测器输出的电信号强度显著增加,最终表现为响应度的提升。结合 L 形结构使得三阶电导率的增加会进一步强化太赫兹波-外光场-载流子的非线性耦合,在近场增强区域形成更强的非线性电流,大幅提升探测器的非线性响应性能。

如图 6 (d)展示了在 445 nm 激光不同功率下探测器的 R_A , 随着功率的增加, R_A 从 2.44 A/W(偏置电压为 20 V, 激光功率为 30 mW)提高至 3.01 A/W(偏置电压为 20 V, 激光功率为 50 mW), 相较于无其他场时外加光场的 R_A 最大提高了 75%。如图 6 (e~f), 其等效噪声功率最低也降至为 5.69 pW/Hz^{1/2}(偏置电压为 20 V, 激光功率为 50 mW)。而 D^* 最大可提高至 7.85×10^9 cm · Hz^{1/2}/W(偏置电压为 20 V, 激光功率为 50 mW)。由此说明, 三阶电导率的增加有助于降低探测器的 N_{EP} , 提升弱太赫兹信号的探测能力。非线性响应的增强使探测器对太赫兹信号的放大效应更显著, 即使是极弱的太赫兹场也能激发可探测的非线性电流, 从而提高灵敏度。此外, 材料的三阶电导率源于载流子浓度的非线性激发, 则载流子的“倍增”过程会进一步抑制热噪声等本底干扰, 优化信噪比。

表 1 基于不同材料和机制的太赫兹探测器
Tab. 1 Terahertz detectors based on different materials and mechanism

材料	探测机制	频率/THz	响应度	等效噪声功率/ (pW · Hz ^{-1/2})	Ref
Co ₃ Sn ₂ S ₂ /MnBi ₂ Te ₄	FET	0.1	2.6×10 ⁶ V/W	75	[23]
MoTe ₂	LSP	0.1	17.03 MV/W	9.58	[24]
BP	PTE	0.29	297 V/W	58	[25]
Co ₃ Sn ₂ S ₂	FET	0.1	3.99×10 ⁵ V/W	256	[26]
PdSe ₂ /MoTe ₂	EIW	0.308	9.3×10 ⁵ V/W	1.3	[27]
Ta ₂ PdSe ₆	TSS	0.28	3.63 A/W	7.4	[28]
NbP	Antenna	0.3	156 V/W	62.5	[29]
MnBi ₂ Te ₄	LSP	0.1	3.01 A/W	5.69	本文

注: FET, 场效应管; PTE, 光热电效应; EIW, 电子感应阱; TSS, 拓扑表面态; Antenna, 天线

综合上述实验结果与机理分析, 本研究设计的 L 形 3D 拓扑超表面 MnBi₂Te₄ 太赫兹探测器, 通过拓扑表面态特性与局域表面等离子体谐振效应的协同作用, 在 0.1 THz 频段实现了优异的探测性能。如表 1 所示, 与其他材料的探测器相比, 本器件在无外场调控时已展现出更优的噪声抑制能力(N_{EP} 低至 8.23 pW/Hz^{1/2}), 而在外加 50 mW 激光的增强下, 响应度最高提升至 3.01 A/W, N_{EP} 降 5.69 pW/Hz^{1/2}, 其综合性能在同频段探测器中表现突出。磁场调控通过打破时间反演对称性、提升霍尔电导率, 强化了载流子定向输运效率; 激光场则通过激发非线性电导率、增加载流子浓度, 优化了太赫兹波与材料的能量耦合。两种外场与 L 形拓扑超表面的局域场增强效应形成协同机制, 不仅突破了单一材料体系的性能瓶颈, 更验证了多场调控在拓扑超表面器件中的应用潜力。这一研究结果为解决太赫兹探测技术中响应度与噪声抑制的核心矛盾提供了新路径, 也为 6G 通信、痕量检测等领域对高性能太赫兹器件的需求提供了可行的技术方案, 为后续拓扑量子材料与超表面结构的融合设计及多场调控机制的深入探索奠定了基础。

3 结论

综上所述, 本文设计并制备了 L 形 3D 拓扑超表面与 MnBi₂Te₄ 薄膜结合的太赫兹探测器, 通过多机制协同实现 0.1 THz 频段高性能探测。采用 3D 打印构建的 L 形亚波长微结构, 借拓扑约束增强 LSP 效应, 实现太赫兹波强局域化; 磁控溅射制备的 MnBi₂Te₄ 薄膜具优质层状晶体结构, 其拓扑表面态为载流子高效输运奠基。无外场时, 器件响应度达 1.72 A/W、噪声等效功率低至 8.23 pW/Hz^{1/2}、探测率最高 5.43×10^9 cm · Hz^{1/2}/W, 性能优于多数同类探测器且噪声抑制佳。外加磁场可提升响应度至 2.25 A/W, 激光场使响应度最高达 3.01 A/W, 噪声等效功率最低 5.69 pW/Hz^{1/2}。该研究证实拓扑超表面、MnBi₂Te₄ 特性与外场增强的协同优势, 为高性能太赫兹探测提供新方案, 对 6G 通信等领域应用及相关技术发展具重要参考价值。

参 考 文 献

[1] SELVARAJ M, SREEJA B S, ALY SAAD ALY M. Terahertz-based biosensors for biomedical applications: a review[J]. Methods, 2025, 234: 54-66.
[2] LIU B W, PENG Y, JIN Z M, et al. Terahertz ultrasensitive biosensor based on wide-area and intense light-matter interaction supported

- by QBIC[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 462:142347.
- [3] LI X R, LI J X, LI Y H, et al. High-throughput terahertz imaging: progress and challenges[J]. Light: Science & Applications, 2023, 12: 233.
- [4] 张玉平, 唐利斌, 刘玉菲, 等. 太赫兹新型探测器的研究进展及应用[J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(2): 191-210.
- [5] XI T R, JIANG H T, LI J X, et al. Terahertz sensing based on the nonlinear electrodynamics of the two-dimensional correlated topological semimetal TaIrTe₄[J]. Nature Electronics, 2025, 8: 578-586.
- [6] WEI Q S, ZHU W Q, LI T, et al. Recent advancements in two-dimensional materials for terahertz photodetectors[J]. Science China Materials, 2025, 68(4): 933-946.
- [7] VYAZOVSKAYA A Y, BOSNAR M, CHULKOV E V, et al. Intrinsic magnetic topological insulators of the MnBi₂Te₄ family[J]. Communications Materials, 2025, 6: 88.
- [8] PADMANABHAN H, POORE M, KIM P K, et al. Interlayer magnetophononic coupling in MnBi₂Te₄[J]. Nature Communications, 2022, 13: 1929.
- [9] SWATEK P, WU Y, WANG L L, et al. Gapless Dirac surface states in the antiferromagnetic topological insulator MnBi₂Te₄[J]. Physical Review B, 2020, 101(16): 161109.
- [10] BLANK T G H, GRISHUNIN K A, ZVEZDIN K A, et al. Two-dimensional terahertz spectroscopy of nonlinear phononics in the topological insulator MnBi₂Te₄[J]. Physical Review Letters, 2023, 131(2): 026902.
- [11] YAO J D, SHAO J M, WANG Y X, et al. Ultra-broadband and high response of the Bi₂Te₃-Si heterojunction and its application as a photodetector at room temperature in harsh working environments[J]. Nanoscale, 2015, 7(29): 12535-12541.
- [12] GLYBOVSKI S B, TRETYAKOV S A, BELOV P A, et al. Metasurfaces: from microwaves to visible[J]. Physics Reports, 2016, 634: 1-72.
- [13] SU J T, HOU X Q, DAI N, et al. Localized surface plasmon resonance enhanced photodetector: physical model, enhanced mechanism and applications[J]. Frontiers of Physics, 2024, 19(6): 63501.
- [14] HAN D H, CUI Y Q, HOU Y S, et al. 3D-printed all-resin terahertz phase-gradient metamaterials for multiple wavefront manipulations[J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(8): 3884-3891.
- [15] FAN Z D, XU H H, ZHAO J G, et al. Crystal growth and magnetic evolution of antiferromagnetic topological insulator Zn-doped MnBi₂Te₄[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2025, 345: 125242.
- [16] WANG Y X, WU W D, ZHAO Z R. Recent progress and remaining challenges of 2D material-based terahertz detectors[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 102: 103024.
- [17] TONG J C, SUO F, ZHANG T N, et al. Plasmonic semiconductor nanogroove array enhanced broad spectral band millimetre and terahertz wave detection[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 58.
- [18] Hu Z Z, Liu Z G, Zhou H L, et al. High-sensitivity room-temperature terahertz detector with graphene-MnBi₂Te₄ heterostructure, Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(7): 20240137.
- [19] QIU Q X, HUANG Z M. Photodetectors of 2D materials from ultraviolet to terahertz waves[J]. Advanced Materials, 2021, 33(15): 2008126.
- [20] WANG Y Q, FU B H, WANG Y C, et al. Towards the quantized anomalous Hall effect in AlO_x-capped MnBi₂Te₄[J]. Nature Communications, 2025, 16: 1727.
- [21] WRIGHT A R, XU X G, CAO J C, et al. Strong nonlinear optical response of graphene in the terahertz regime[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(7): 072101.
- [22] WEN Q Y, TIAN W, MAO Q, et al. Graphene based all-optical spatial terahertz modulator[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 7409.
- [23] SUN Z A, WANG W Z, XU W H, et al. Laser and magnetic field co-modulated 3D plasmonic microstructures for room-temperature terahertz detection in 6G technology[J]. Chinese Optics Letters, 2025, 23(12): 123603.
- [24] PENG Z Z, SONG Q, YANG J C, et al. Magnetic field enhanced frequency-selective terahertz detection via 3D printing micro-helical stepped and MoTe₂ coated arrays[J]. Advanced Optical Materials, 2024, 13(1): 2401956.
- [25] GUO W L, DONG Z, XU Y J, 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] WANG W Z, LI Y Z, XU X G, et al. Magnetic Weyl semimetal terahertz detector with field-tunable hyperbolic structures for 6G communications operating at a single frequency of 0.1 THz[J]. Results in Engineering, 2025, 28: 107735.
- [27] QIU Q X, JIANG L, WU T, et al. PN junction for room temperature terahertz detection[J]. Materials Today Electronics, 2025, 14: 100179.
- [28] YANG L, WANG D, HU Z, et al. Quasi-one-dimensional Ta₂PdSe₆ with strong topological surface states for high-performance and polarization-sensitive terahertz detection[J]. Nano Letters, 2025, 25 (19): 7690-7698.
- [29] HU Z, ZHAO B J, WEI Y D, et al. High-performance terahertz detection in Weyl semimetal NbP nanosheets[J]. Infrared Physics & Technology, 2025, 149:105896.