

文章编号: 2095-4980(2023)06-0767-15

基于狄拉克半金属的太赫兹探测器研究进展简介

王 东^{1,2}, 王光清¹, 成 艳¹, 冷 晋¹, 何晓勇^{*1}, 王 林^{*2}

(1. 上海师范大学 数理学院物理系, 上海 200233; 2. 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)

摘 要: 太赫兹波具有安全性好、透射性强、指纹特性等特点, 在无损探测、雷达成像、空间通信等领域展现出巨大的应用前景, 在现阶段的科学研究中热度不减。狄拉克半金属具有量子反常霍尔效应、零带隙受拓扑保护和超高迁移率等特性, 在太赫兹探测领域展现出非凡特性, 为探索实现室温太赫兹探测提供了新思路。本文介绍了基于狄拉克半金属材料太赫兹光电探测器的研究现状, 讨论了器件性能与探测机理, 并对其在太赫兹光电探测领域的发展前景进行了展望。

关键词: 太赫兹; 拓扑材料; 狄拉克半金属; 光电探测器

中图分类号: O469

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022150

Introduction of Dirac semimetal-based terahertz detectors

WANG Dong^{1,2}, WANG Guangqing¹, CHENG Yan¹, LENG Jin¹, HE Xiaoyong^{*1}, WANG Lin^{*2}

(1. Mathematics & Science College, Shanghai Normal University, Shanghai 200233, China; 2. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Due to the characteristics of good security, strong transmittance, and fingerprint characteristics, terahertz radiation has shown great application prospects in the fields of non-destructive detection, radar imaging, space communication, etc., which makes it unabated in current scientific research. With the characteristics of quantum anomalous Hall effect, topological protection of zero band gap, ultra-high carrier mobility, etc., the Dirac semimetals exhibit extraordinary characteristics in the field of terahertz detection, which provides a great platform for the exploration and realization of room temperature terahertz detector. In this paper, the research status of terahertz photodetectors based on the Dirac semimetal materials is introduced, and the device performance and detection mechanism are mainly discussed.

Keywords: terahertz; topological materials; Dirac semimetal; photodetector

频率在 0.3~10 THz 范围内的电磁辐射处在宏观经典理论向微观量子理论的过渡区域, 具有安全性好、穿透性强、指纹特性、瞬间带宽大等特点^[1-3]。在大气研究、安检反恐、无损探测、雷达成像、空间通信^[4-6]等领域具有优异性能。作为重要的基础功能器件之一, 探测器的发展研制对于太赫兹波段的研究工作意义重大。现阶段光电探测器的研究受限于太赫兹波光子能量低、热噪声背景辐射高、大气中信号衰减快, 要想实现探测器的高灵敏度(看得清)、快速光响应(看得快)、阵列化易集成(看得广)、高动态范围(看得远), 选择合适的光敏材料至关重要^[7-8]。现有的如基于 InGaAs^[9-10]、HgCdTe^[11-12] 的商用半导体光电探测器覆盖频段窄, 而二维材料黑磷在空气中性质不稳定, 且探测波长短于 7.7 μm ^[13], 较大的禁带宽度又使得过渡金属硫化物难以用于高频探测^[14-15]。以石墨烯为代表的二维拓扑狄拉克半金属(Topological Dirac Semimetals, TDSMs)为太赫兹探测器光敏材料提供了一个较优的选择^[16-17]。

拓扑的概念实际引自数学, 研究的是几何图形在连续形变下保持不变的性质, 描述局部形变下的不变性。而在凝聚态物理的发展过程中, 人们发现某些固体中电子的波函数也具有“拓扑不变量”, 并将这一类材料定义为拓扑材料。根据电子能带非平庸拓扑结构中拓扑不变量的不同, 拓扑材料可分为拓扑绝缘体、拓扑半金属、

收稿日期: 2022-08-09; 修回日期: 2022-09-27

基金项目: 上海市地方院校能力建设专项资助项目(22010503300); 上海市自然科学基金面上资助项目(21ZR1446500); 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2800702); 上海师范大学校级资助项目(SK202240)

*通信作者: 何晓勇 email:xyhe@shnu.edu.cn; 王 林 email:wanglin@mail.sitp.ac.cn

拓扑超导体等。拓扑态具有独特全局稳定性，对应的拓扑物性对微扰和细节不敏感，可实现能量和信息的无损传播。TDSMs 正是这样一种拓扑材料，其拓扑物性不易受干扰，且带隙为零，载流子在狄拉克点附近线性色散，表现为无质量的费米子，具有超高的载流子迁移率。二类狄拉克半金属由于洛伦兹不变性破缺(时空间反演对称破缺)造成了狄拉克锥的倾斜，产生了如非连续的费米弧、手性异常、贝里曲率发散等特性，也可能产生新的熵运输机制和非线性光学响应，表现出较大的饱和磁阻和效率更高的可调谐光子吸收特性^[18-19]，对太赫兹探测技术的发展具有重要的研究价值。此外，在反常霍尔效应、超导、相变调控等领域中，TDSMs 也发挥着显著作用。本文回顾了 TDSMs 近 10 年来的发展历程，重点介绍了其在太赫兹光电探测领域的研究工作。

1 太赫兹光电探测背景介绍

1.1 太赫兹辐射

太赫兹的波长在 $30\ \mu\text{m}\sim 1\ \text{mm}$ 之间，对应频率为 $0.3\sim 10\ \text{THz}$ ，光子能量范围为 $1.24\sim 41.4\ \text{meV}$ ，处于宏观经典理论向微观量子理论、电子学向光子学的过渡区域。频谱中的特殊位置为太赫兹辐射带来了众多特性，如安全性好，穿透性强，指纹特性，瞬间带宽大等，其在 6G 通信、气象研究、生物医疗、无损探测等领域的应用中(见图 1)大放异彩^[20]。

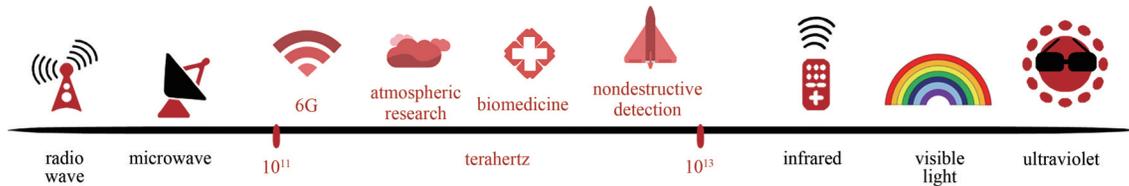


Fig.1 Applications of terahertz radiation
图 1 太赫兹辐射的应用

1.2 太赫兹光电探测机制

1) 光电导效应(Photoconductive Effect, PCE): 光电导探测器能响应单个光子信号，但其对光敏材料的禁带宽度有着很严格的要求，只有当辐射的光子能量超过材料带隙对应的能量时，价带中的电子才跃迁至导带，从而形成电子空穴对，并引起电导率的变化，该过程被称为本征光电导效应；非本征光电导效应指的是光子能量激发杂质能级形成载流子从而改变材料电导率的过程。光子与载流子的直接作用使得光电导探测器拥有较快的响应速度^[21]。

2) 光热电效应(Photothermoelectric Effect, PTE): 光热电效应包括光热转化和热电转化 2 个过程。载流子在材料塞贝克系数差异或辐射分布不均匀产生的温度梯度驱动下，从热端向冷端扩散，形成电势差。可通过人工设计非对称天线结构或构建异质结来增强光热电效应，从而实现无源漏偏压下的太赫兹自驱动探测。此类器件往往具有低暗电流、低噪声、无需制冷等特点^[22]。

2022 年，周洁等设计了一种基于二维材料 PdSe_2 的 PTE 太赫兹光电探测器^[23]，得益于非对称天线结构(图 2(a))对太赫兹辐射的耦合效果，天线边缘的电场强度较入射场强提升了 290 倍(图 2(b))。热载流子加热不均匀形成温度梯度(图 2(c))，成功实现了对 $0.12\ \text{THz}$ 辐射的自驱动探测(图 2(d))。

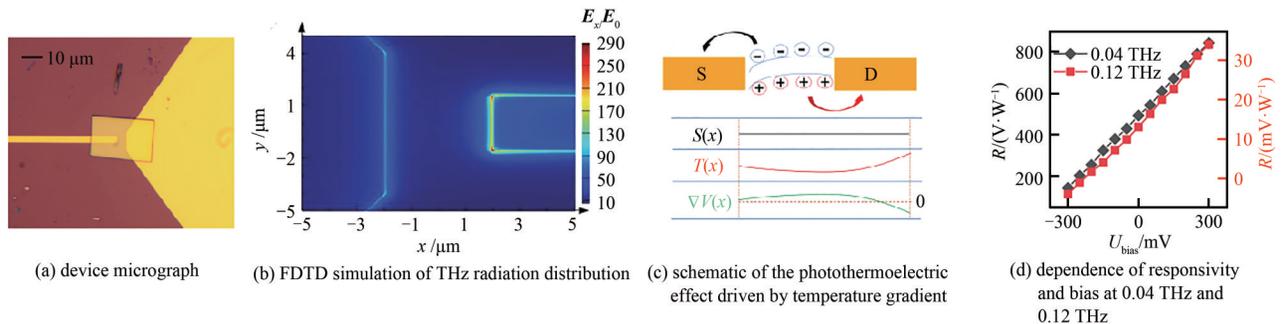


Fig.2 PdSe_2 terahertz photodetector based on photoelectric effect
图 2 基于光热电效应的 PdSe_2 太赫兹光电探测器

3) 光伏效应(Photovoltaic Effect, PVE): 光伏效应是指半导体中的光生电子空穴对在光照作用下分离产生电

位差的过程。场效应晶体管(Field Effect Transistor, FET)是一种典型的光伏探测器。1993年, Dyakonov首次提出将FET用于太赫兹探测^[24-25]。太赫兹辐射可与FET沟道中载流子相互作用形成等离子体波振荡(图3(a)), 基频为:

$$\omega_0 = \frac{\pi}{2L} \sqrt{\frac{e(U_g - U_{th})}{m}} \quad (1)$$

式中: L 为栅长; U_g 为栅压; U_{th} 为阈值电压; m 为电子质量; e 为电子电荷量。

可通过减小沟道尺寸、调控栅压对晶体管直接调谐, 在室温下实现对太赫兹辐射的高灵敏度探测^[26]。除了能实现太赫兹探测, 具有高迁移率的FET(High Electron Mobility Transistor, HEMT)还可用于发射太赫兹辐射。

太赫兹量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)是基于电子在量子阱导带子带间跃迁释放出单极性激光的电泵浦太赫兹辐射源(图3(b)), 可通过改变有源区势阱深度来调节子带能级间距, 实现对辐射频率的控制。多层量子阱结构级级相连(图3(c)), 理论上一个电子可以产生与级数相同的光子数^[27-29]。故而QCL具有波长覆盖范围宽, 激射波长连续可调谐, 输出功率高等优势。中国科学院上海微系统与信息技术研究所曹俊诚、黎华研究员团队基于量子动力学、蒙特卡罗方法等, 针对粒子数反转设计有源区结构, 通过分子束外延生长多层周期结构GaAs/AlGaAs HEMT, 辅以半绝缘表面等离子体、双面金属等波导体系达到不同的输出特性。该团队研制了一系列辐射频率覆盖1.8~5 THz的QCL, 实现了激光脉冲功率1.36 W, 远场发散角2.4°, 领先当前国际水平^[30-32]。

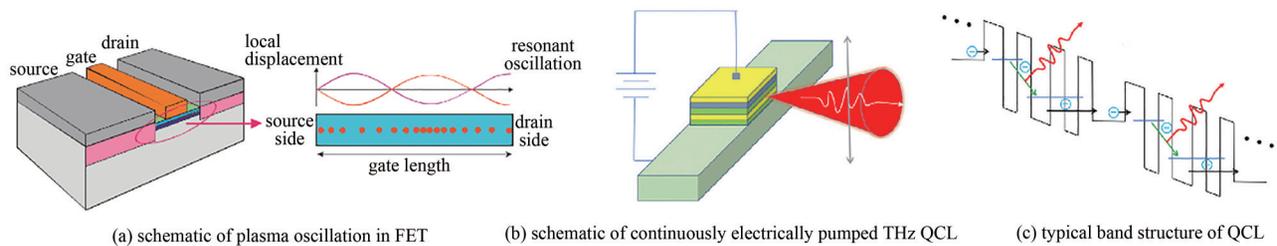


Fig.3 Field effect transistor model based on photovoltaic effect and application
图3 基于光伏效应的场效应晶体管模型及应用

4) 光学伽伐尼效应(Photogalvanic Effect, PGE): 光学伽伐尼效应是一种非线性光学效应, 是指在空间结构反演对称性破缺的体系中无需施加电压, 仅通过光照即可产生直流电流的现象^[33]。

以PdTe₂所属的C_{3v}点群为例^[34], 各向异性的载流子弹性散射可等效于2个三角锥的散射, 在自由载流子平面运动产生光电流的框架中, 这种散射体可以看作是沿沟道方向随机分布的楔形。在太赫兹辐射下, 太赫兹场驱动的载流子会在某一个方向上产生过剩的情况, 从而打破电流平衡, 产生净的位移电流。感应电流的方向取决于太赫兹场偏振极化方向和楔块的相对方向。太赫兹场极化方向平行于楔形时, 产生的光电流方向与极化方向垂直于楔形时的光电流方向相反。

1.3 光电探测器基本性能指标

1.3.1 响应率

常用电压响应率 R_U 或电流响应率 R_I 来描述输出信号相对于输入信号的大小:

$$R_U = \frac{I_{ph} R}{P^* S}; R_I = \frac{I_{ph}}{P^* S} \quad (2)$$

式中: I_{ph} 为光电流; R 为电阻; P^* 为太赫兹源的功率密度; S 为光敏面积或衍射面积。

1.3.2 噪声等效功率

噪声等效功率(Noise Equivalent Power, NEP)又称最小可测功率, 是衡量光电探测器接收弱信号能力的性能参数, 标志着一个探测器的灵敏度。

$$\begin{cases} NEP = \frac{v_n}{R_U} \\ v_n = (v_i^2 + v_b^2)^{1/2} = (4k_B T/r + 2qI_{dark})^{1/2} \end{cases} \quad (3)$$

式中： v_n 为噪声电压，是热噪声 v_t 与散粒噪声 v_b 的均方根； I_{dark} 为暗电流； k_B 、 T 、 r 分别代表玻兹曼常数、温度及电阻。

1.3.3 线性度

线性度常用于表示探测器输出光电压信号 U 与辐射源输入功率 P 的关系。若 $dU/dP=U/P$ ，则认为输出和输入之间的关系是恒定的，此时探测器是线性的。线性度可以用 $U \sim P^\beta$ 中的 β 来评估， β 越接近 1，表示线性度越好。

1.3.4 响应时间

探测器的响应时间是用来描述器件对辐射信号变化响应快慢的参数。常将信号上升沿从幅值 10% 变到 90% 的这段时间称为上升时间 τ_r ；将下降沿从幅值 90% 变到 10% 的时间称为下降时间 τ_d [35-36]。

2 拓扑狄拉克半金属概述

2.1 拓扑材料简介

在传统的能带理论中，根据禁带宽度由窄到宽，固体可依次分为金属、半导体、绝缘体。在半导体中，又根据导带顶和价带底位置的同异，将半导体分为直接带隙半导体与间接带隙半导体。半金属的发现是能带理论的突破性延伸，半金属与间接带隙半导体很类似，但其带隙为负，且在绝对零度的情况下，价带顶的电子可以直接跃迁到导带底，价带电子填充未满导致此时的半金属具有导电性。此外，无带隙的半金属材料可以对低能光子实现有效探测，重叠带隙内光生载流子的产生与复合可通过电子-电子散射达到皮秒(ps)量级，可以得到较快的响应速度 [37-38]。

拓扑半金属的能带在费米面附近相交，交点处态密度为 0，根据能带交点的简并度与其动量空间分布的不同，可分为狄拉克半金属、外尔半金属、节线半金属、三重简并点半金属等，各拓扑态能带结构如图 4 所示。

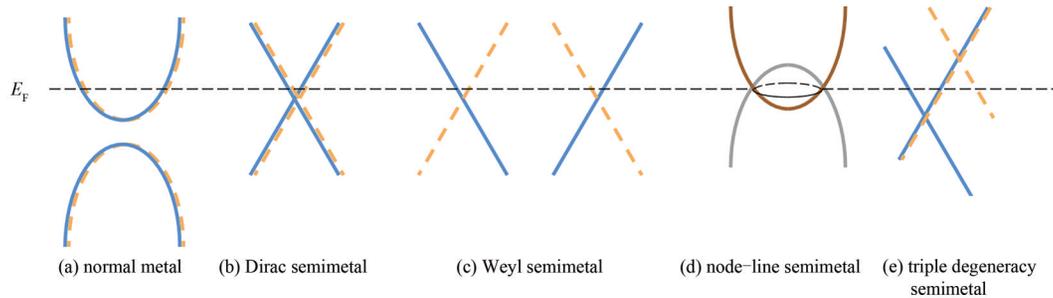


Fig.4 Diagram of band structure
图4 能带结构图

2.2 狄拉克半金属简介

狄拉克半金属的价带和导带在费米能级附近相交成对顶的圆锥形(狄拉克锥)，能带沿各动量方向线性色散，其交点(狄拉克点)四度简并，在哈密顿量子谱中也是奇异点且受对称性保护，具有拓扑稳定性，故狄拉克半金属材料也称为“三维石墨烯”。狄拉克半金属中新奇量子态的发现、高质量材料的生长制备、新材料的理论预测、不同量子态间拓扑相变的研究已成为当前凝聚态物理领域的研究热点。

2.2.1 第一类狄拉克半金属

中国科学院物理研究所的方忠、戴希、翁红明团队在 2012 年通过第一性原理计算预测晶体 $A_3\text{Bi}$ ($A=\text{Na}$ 、 K 、 Rb) 是受对称保护的三维狄拉克半金属 [39]。在体态上有一对三维狄拉克点，在表面有拓扑非平庸费米弧。2014 年，该课题组在与牛津大学陈宇林研究组的合作中 [40]，通过角分辨光电子能谱 (Angle Resolved Photoemission Spectroscopy, ARPES [41-42]) 检测到 Na_3Bi 中存在沿所有动量方向 (图 5A, 5B, 5C) 线性色散的狄拉克点，且随 k 值变化，色散关系由线性变为抛物线形 (图 5A(ii-iv), B(ii-iv), C(ii-iv))，证实了三维狄拉克锥的存在。 Na_3Bi 也是首个被证明真实存在的第一类狄拉克半金属，该成果也标志着狄拉克半金属从理论模拟走向实验，相关工作发表在《Science》。

2.2.2 第二类狄拉克半金属

第一类狄拉克半金属能带上下对顶，拥有线性的狄拉克锥，费米能级上态密度为零，在所有方向上都表现出负磁阻；第二类狄拉克半金属的狄拉克锥因洛伦兹不变性的破缺产生强烈的倾斜、各向异性，沿特定方向具有负磁阻 [43]，且允许更多动量空间内的带内光子吸收 [44]。两类狄拉克锥的示意图见图 6(a)。2017 年，Yan 等在大

块半金属 PtTe₂ 中发现沿 Γ -A 方向存在强烈倾斜的狄拉克锥^[45]。图 6(b) 为在光子能量为 22 eV 时, $k_z=0.35c^*(c^*=2\pi/c, c$ 为方向倒格矢) 处测量的 M- Γ -K 方向的 ARPES 数据, 可以观察到 V 型和另一个较为平坦的 Λ 形色散, 图 6(c) 的 E - k_z 图像中则可观测到明显的强烈倾斜的狄拉克锥。上述实验结果与图 6(d) 中理论计算得出的 PtTe₂ 能带结构符合较好, 证实了首个真实存在的第二类狄拉克半金属 PtTe₂。此外, 该研究团队还提出了用 Ir 掺杂 PtTe₂ 调控狄拉克点与费米能级相对位置的设想, 为后续太赫兹探测工作提供了重要思路。

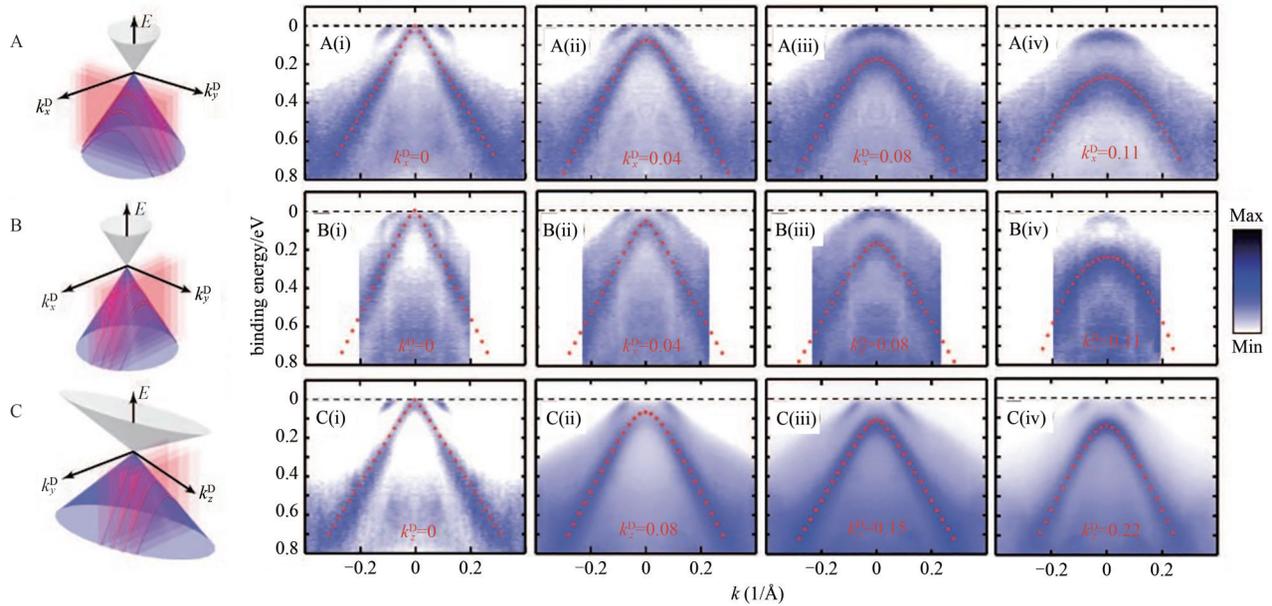


Fig.5 Dispersion relationship of three-dimensional Dirac fermions in different momentum directions observed by ARPES
图 5 ARPES 观测到的三维狄拉克费米子在不同动量方向上的色散关系

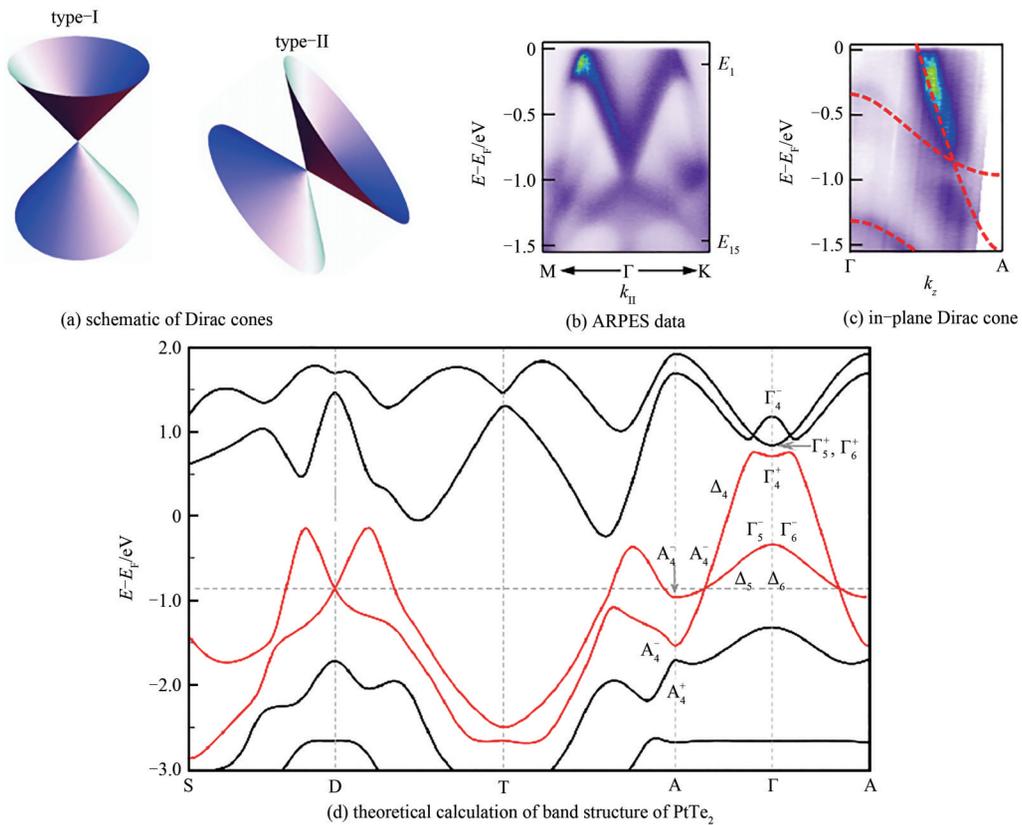


Fig.6 Proof of the existence of the second type of Dirac cone in PtTe₂
图 6 PtTe₂ 中存在第二类狄拉克锥的证明

自旋轨道耦合(Spin-Orbit Coupling, SOC)指的是电子绕核转动的轨道角动量与自旋角动量的耦合,在缺乏体系反演对称性的材料中,自旋轨道耦合能够引起能带劈裂。上述两类狄拉克半金属在不考虑自旋轨道耦合作用时,狄拉克点受对称性保护;但考虑自旋轨道耦合作用后,能带在狄拉克点附近打开间隙,禁带出现,狄拉克态被破坏。下文介绍2类在自旋轨道耦合作用下不打开带隙的狄拉克半金属。

2.2.3 第三类狄拉克半金属

2015年Young等介绍了一种在自旋轨道耦合作用下依然存在对称性保护的二维狄拉克点,并将其称为自旋轨道狄拉克点,对应的材料被称为第三类狄拉克半金属。与前两类狄拉克点不同,自旋轨道狄拉克点的存在完全由特定的空间群对称性决定,且必须位于布里渊区边界时间反演对称点上。2017年,北京理工大学姚裕贵课题组发现了首个第三类狄拉克半金属真实材料——二维HfGeTe^[46],其内部具有非平凡 Z_2 不变性,边缘具有自旋螺旋边缘态。非点式空间群的保护使HfGeTe中接近费米能级的自旋轨道狄拉克点(见图7(b)箭头所指处)在单轴、双轴及剪切应变下都表现得极为稳定,且对自旋轨道耦合作用具有内在鲁棒性。该项研究工作为探索二维自旋轨道狄拉克点有趣的物理学特性提供了平台。

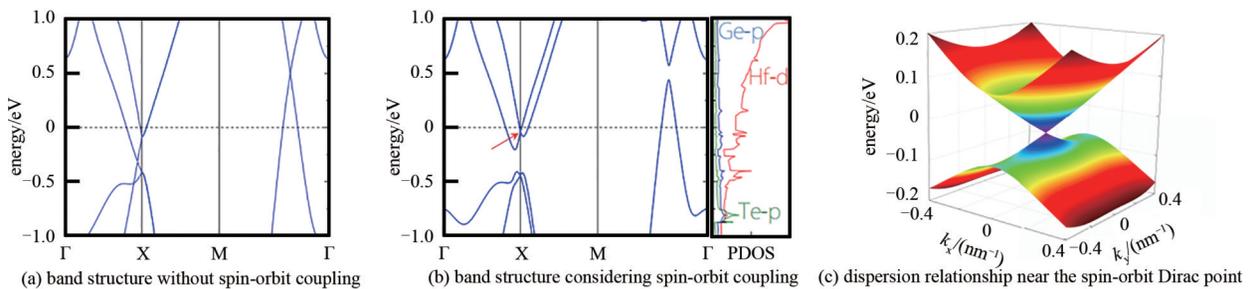


Fig.7 Energy band structure of HfGeTe
图7 HfGeTe的能带结构

2.2.4 第四类狄拉克半金属

2018年内蒙古大学刘志锋研究团队发现2.3%拉伸应变下的二维SbAs为自旋谷耦合狄拉克半金属并将其归为第四类狄拉克半金属^[47]。由于中心反演对称性的破缺,当考虑自旋轨道耦合作用后,如图8(a,iv)所示,表现为直接窄带隙半导体的自旋谷耦合狄拉克半金属能带中的能谷发生自旋劈裂,使得带隙刚好关闭形成自旋非简并的狄拉克态。研究发现,自旋谷耦合狄拉克半金属处于二维普通绝缘体和量子自旋霍尔绝缘体的相变界,这为在同一材料中实现不同量子态间的相变提供了可能。自旋谷耦合狄拉克半金属可以同时实现无质量、无耗散的量子传输,对下一代超高速、超低能耗电子器件的发展具有重要意义。

2.3 狄拉克半金属的应用

近年来在超材料^[48-52]、超导、反常霍尔效应、相变调控等领域的研究工作中,狄拉克半金属材料体系发挥着重要作用。2018年3月5日,《Nature》连刊2篇论文报道石墨烯超导的重大发现,中国科学家曹原和他的导师Pablo Jarillo-Herreo发现当2层平行石墨烯呈 1.1° 的相对扭角(“魔角”)堆叠在一起时^[53],相互作用能大小等于狄拉克点到两锥交点的垂直距离,此时能带顶部到能带底部的能量差很小,表现为能带扁平化(平带)。平坦的能带在半填充时表现为绝缘态。但对材料进行静电掺杂后,研究人员在1.7 K下观测到超导现象。自此,魔角石墨烯敲开了扭转电子学领域和超导领域的新大门。2021年,曹原等将3层石墨烯堆叠在一起并将中间一层相对于外面2层扭转 1.56° ,构成了“魔角扭曲3层石墨烯”^[54]。该结构在1 K时电阻为零,变为超导体。绝大多数传统超导体的超导性质在强磁场中并不稳定,外加强磁场会将库伯对电子相反方向的自旋强行扭转到磁场方向,破坏了自旋单态,从而导致了超导性质的消失。而在此项工作中,当对“魔角扭曲3层石墨烯”施加高达10 T的磁场后,该结构仍表现超导性质。研究人员推测可能是魔角石墨烯中出现了“自旋三重态”。

2020年,湖南大学He等提出了一种具有3层结构的块体狄拉克半金属元镜^[55],可以在不改变几何参数的情况下,通过化学掺杂和调节栅压来调节狄拉克半金属的费米能级,进而实现对狄拉克半金属介电常数的调节,达到连续调整圆二色性峰波长的目的。在THz频谱中可以产生0.97的巨大圆二色性值,该研究对生物化学领域检测和区分手性分子具有重要意义。2018年,中国科学院合肥物质科学研究院强磁场科学中心田明亮课题组在狄拉克半金属 Cd_3As_2 纳米片中观测到手性异常导致的平面霍尔效应^[56],给出了三维拓扑半金属存在手性异常的直接证据。为实现拓扑半金属的超导,复旦大学修发贤课题组与香港科技大学罗锦团等课题组合作,基于Nb/ Cd_3As_2 的超导近邻效应,设计了Nb/ Cd_3As_2 /Nb超导约瑟芬结^[57],通过超导量子干涉测量观察到了 Cd_3As_2 的表面超

导态。该项研究成果首次实现了三维拓扑半金属的费米弧超导，为探索拓扑超导提供了新的思路和研究方法。2016年，北京大学 Wang 等在三维狄拉克半金属 Cd_3As_2 单晶表面用钨针尖做硬点接触实验时，发现微米量级的接触区域变成拓扑超导体^[58]，在超导谱中发现了可能由 Majorana 费米子引起的零压电导峰，并通过理论分析进一步揭示了拓扑超导的可能性。2019年，复旦大学 Liu、Cai 等研究压力对第二类狄拉克半金属 $PtTe_2$ 能带调控及宏观输运性质的影响^[59]时发现，高压会使狄拉克点远离费米面，10 GPa 左右的高压将打开 $PtTe_2$ 带隙，出现半金属向普通金属的相变，进一步加压出现 Lifshitz 相变，期间 $R-T$ 曲线、载流子浓度、磁阻等宏观输运特性也出现了变化。此项工作对理解狄拉克半金属宏观输运特性具有重大价值。华中科技大学付英双团队提出通过降低维度的方式实现对材料拓扑和物态性质的调控^[60]。低温扫描隧道显微镜对不同层数的 Na_3Bi 薄膜的扫描结果表明，层数大于 4 层时， Na_3Bi 薄膜表现出半金属态，少于 4 层时， Na_3Bi 带隙打开，出现从狄拉克半金属到绝缘体的相变。类似的，第二类狄拉克半金属 $PtSe_2$ 也会随层数减少出现半金属到半导体的转变^[61]。

而在太赫兹光电探测领域，由于狄拉克点附近的载流子线性色散，表现出超高的载流子迁移率、较大的非饱和磁电阻和更高效的可调谐光子吸收特性。此外，由于弱范德瓦尔斯结合，二维狄拉克半金属可进一步与其他二维材料构筑成范德瓦尔斯异质结构^[62]，种种特性预示着狄拉克半金属将在新型太赫兹光电探测器件的探索过程中发挥重要作用。

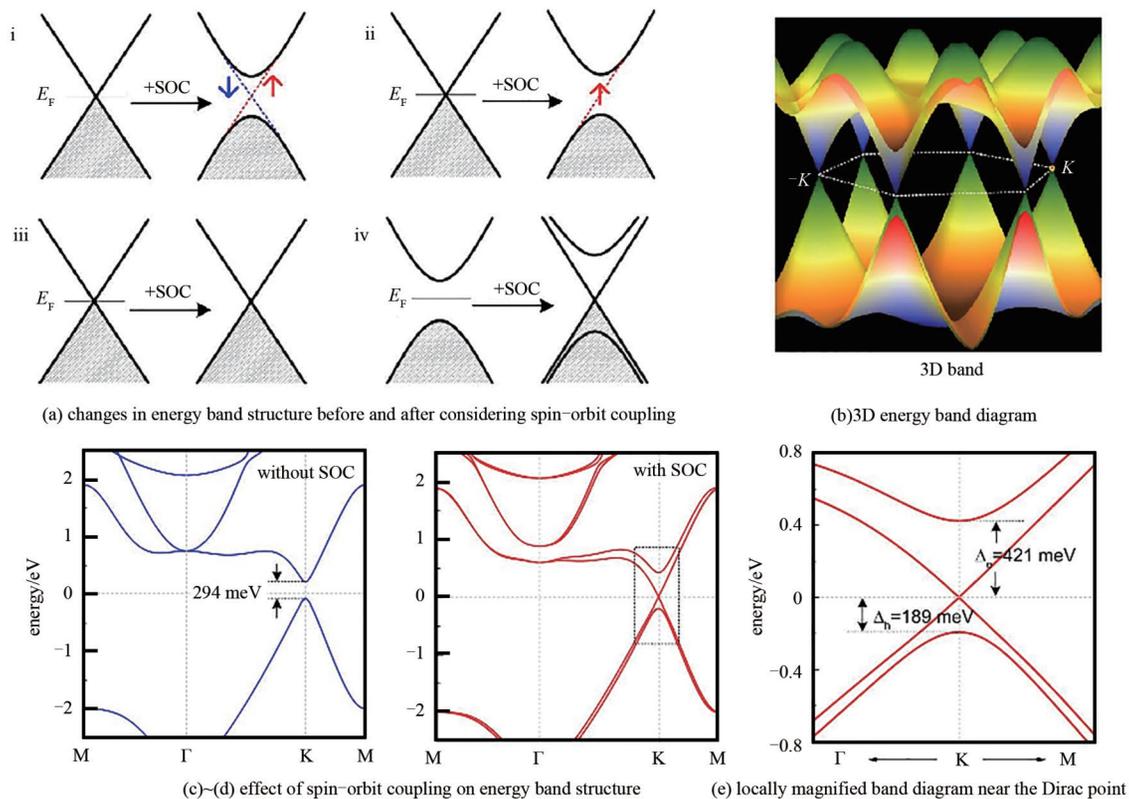


Fig.8 Energy band structure of class IV Dirac semimetallic SbAs

图8 第四类狄拉克半金属 SbAs 的能带结构

3 狄拉克半金属太赫兹探测研究进展

3.1 石墨烯基太赫兹光电探测器

自 2004 年 Konstantin Novoselov 和 Andre Geim 通过机械剥离获得石墨烯以来，对该材料优异性质和应用前景的研究成果丰硕。石墨烯在室温下性质稳定，易于大规模生长制备，载流子迁移率高达 $1.5 \times 10^4 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ^[63]，理想状态下电阻率为 $10^{-6} (\Omega \cdot \text{cm})$ ^[64]，抗拉强度和弹性模量分别为 125 GPa、1.1 TPa^[65]。从能带结构的角度，石墨烯拥有上下对称的狄拉克锥，具有零带隙和半金属性质，拥有宽波段光电探测能力。石墨烯场效应晶体管具有双极性，栅压可以调控等离子振荡频率^[66]、载流子浓度和费米能级与狄拉克点的相对位置^[67]等特性，引发了研究人员对石墨烯基太赫兹光电探测器的浓厚兴趣。

2017 年，查尔姆斯理工大学 Yang 等在柔性衬底 PET 上制造了一种基于分裂栅蝶形天线耦合的石墨烯场效应

晶体管^[68],如图9(a)所示。在研究不同应变强度对太赫兹响应的实验过程中发现,随着应变强度增加,响应率略有减小,在室温0.487 THz辐射无应变条件下,响应率高于2 V/W,噪声等效功率(NEP)低于3 nW/Hz^{1/2},为柔性太赫兹探测器的发展提供了宝贵经验。为克服石墨烯因光吸收率低而限制了光电探测器响应率的缺陷,2019年,北京交通大学的研究人员设计了如图9(b)所示的三维管状石墨烯,得益于管状谐振腔的光场汇聚作用,光与石墨烯的相互作用面积增加,光响应率得到显著提升,实现了紫外、可见、中红外和太赫兹波段的超宽带探测,在3.11 THz下响应率为0.232 A/W^[69]。中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所秦华团队于2015年报道了一种化学气相沉积(CVD)生长的单层石墨烯耦合图9(c)中类偶极子天线的场效应太赫兹探测器^[70],演示了在237 GHz下的室温探测,实现了0.1 V/W的电压响应率和207 nW/Hz^{1/2}的NEP。在此基础上,该团队与中国电子科技集团有限公司第十三研究所合作,利用SiC衬底外延生长了迁移率高达3000 cm²/(V·s)的高质量双层石墨烯,结合高效耦合天线与自对准天线栅极工艺等优势,在0.33 THz的直接检测中,响应率达到30 V/W,NEP为51 pW/Hz^{1/2},进一步提高了石墨烯基太赫兹探测器的灵敏度^[71],器件图见图9(d)。

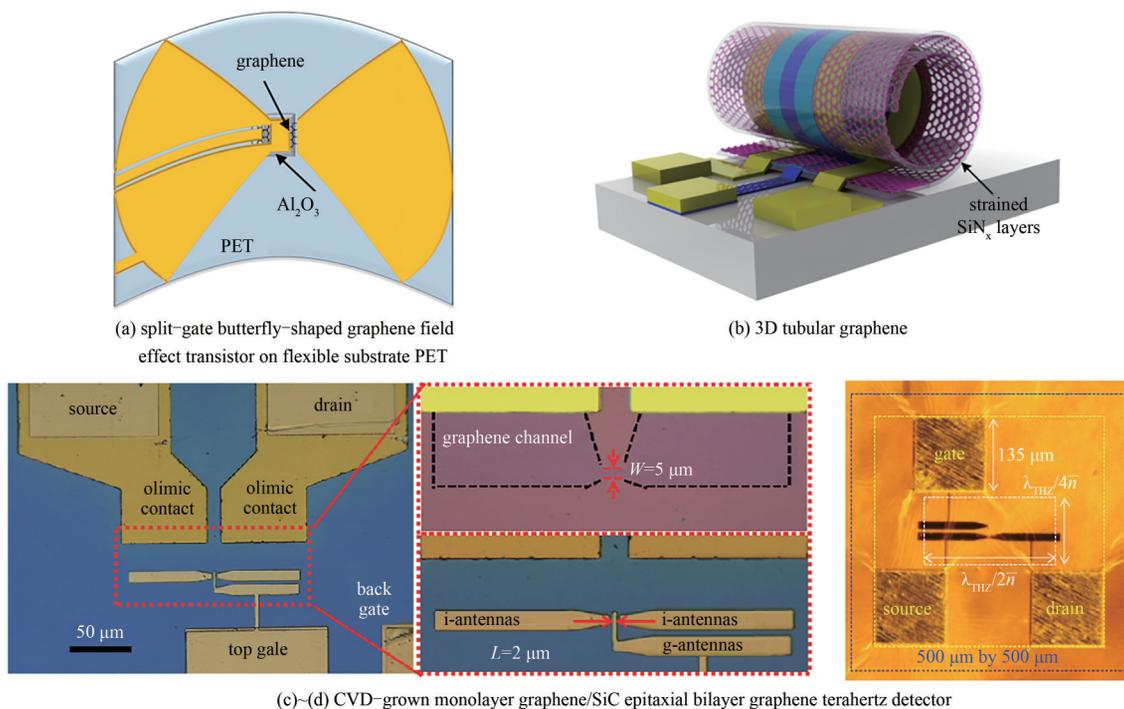


Fig.9 Terahertz detectors based on graphene
图9 石墨烯基太赫兹探测器

2018年,曼彻斯特大学Denis A Bandurin等利用远场耦合到太赫兹天线的高迁移率石墨烯场效应晶体管实现了等离子共振太赫兹光电探测^[72]。太赫兹频段内等离子体的共振激发极为困难,只有在动量弛豫率低于等离子体频率时才能实现,这需要超高的电子迁移率,而封装在双层hBN中间的双层石墨烯正满足这样的要求^[73-74]。该器件可用于在极端低温环境和强磁场中进行等离子体实验,以及在更复杂的范德华异质结构的研究中。马里兰大学Cai等通过设计SiC上石墨烯条带相对于双金属电极阵列的取向,利用垂直于电极阵列偏振的入射波有效激发了石墨烯等离子体模式,提高了太赫兹波的吸收率,观测到了光热电压^[75]。2019年,Sebastian Castilla等介绍了一种利用光热电效应的太赫兹辐射探测器^[76],该探测器基于采用间隙约为100 nm的双门控偶极天线设计。这种窄间隙天线可以在位于天线上方的石墨烯通道中创建一个PN结,并将入射辐射强烈集中在这个PN结处并产生光响应,室温下NEP为80 pW/Hz^{1/2},响应时间低于30 ns,探测范围为1.8~4.2 THz。

3.2 第二类狄拉克半金属太赫兹探测

3.2.1 国内首个第二类狄拉克半金属太赫兹探测器

在此前的研究工作中,第二类狄拉克半金属PtTe₂中已被证明存在倾斜的狄拉克锥^[77]。为研究此类拓扑材料非平凡的载流子输运性质,2019年,中国科学院上海技术物理研究所徐煌等基于金属-PtTe₂-金属平面结构(图10),借助蝶形天线对太赫兹波的耦合作用,成功将PtTe₂材料的光电探测拓宽至太赫兹波段。值得一提的是,这也是国内首个基于新型拓扑半金属材料的高性能太赫兹探测器^[78]。

当 THz 波与 PtTe₂ 倾斜的狄拉克锥耦合时，狄拉克锥中的磁单极子之间发生非对称激发，使器件即使在零偏条件下，响应率也可超过 1.6 A/W@0.12 THz。当增加小偏压时，器件的响应率可以提高几个数量级。之后研究人员构建了 PtTe₂-石墨烯异质结构，显微结构见图 11，在成功抑制暗电流的同时响应率达到 500 V/W，响应时间也达到 10 μs 左右，证明该器件响应速度快，响应率性能优异。此外，综合 PtTe₂ 材料的优点，探测器在 0.12 THz 下成功实现了对信封中螺母的二维透射成像，展现了拓扑半金属材料体系在太赫兹探测中的优良特性。

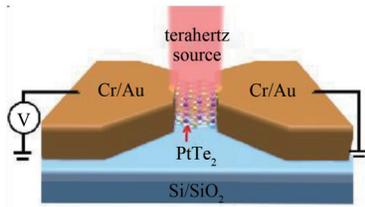


Fig.10 Schematic of a PtTe₂ terahertz photodetector coupled with a bow-tie antenna

图 10 领结形天线耦合的 PtTe₂ 太赫兹光电探测器示意图

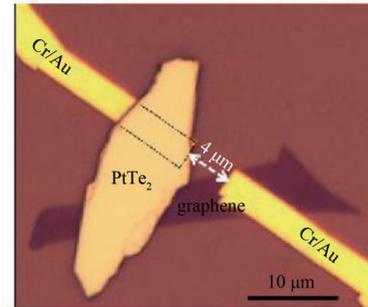


Fig.11 Micrograph of PtTe₂-graphene heterojunction

图 11 PtTe₂-石墨烯异质结显微图

2022 年，东华大学张凯旋等在上述工作的基础上，利用 PtTe₂ 材料耦合叉指电极结构^[79](图 12)，在 0.3 THz 自供电模式下，得到了 19 mA/W 的电流响应率，1.01 nW/Hz^{1/2} 的 NEP，上升时间 8 μs，下降时间 3 μs。该器件可以在室温下高效稳定地运行，为第二类狄拉克半金属光电探测器性能的提高提供了新的研究思路。

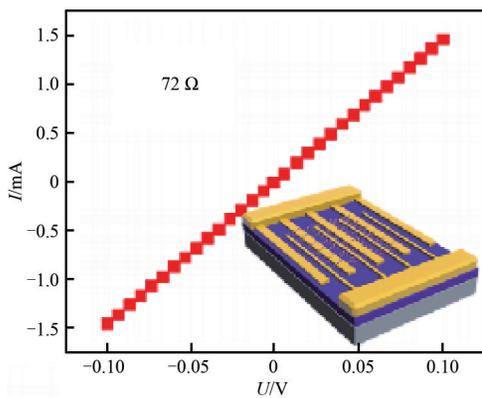


Fig.12 Interdigitated electrode structure coupled with PtTe₂ material

图 12 PtTe₂ 材料耦合叉指电极结构

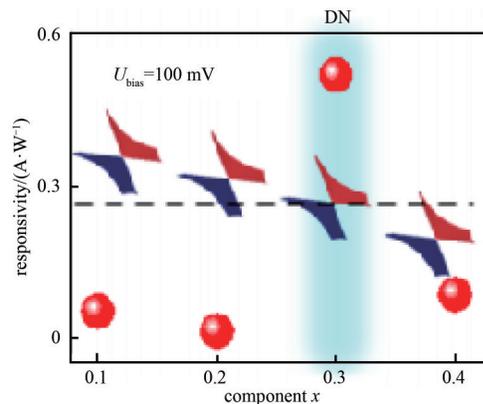


Fig.13 Relative position of Dirac point and Fermi level and responsivity corresponding to different doping ratios of Ir_{1-x}Pt_xTe₂

图 13 Ir_{1-x}Pt_xTe₂ 不同掺杂比例对应的狄拉克点与费米能级相对位置及响应率

3.2.2 优化 Ir_{1-x}Pt_xTe₂ 能带结构实现材料太赫兹吸收异常增强

由于只有狄拉克点附近的准粒子激发才满足狄拉克费米子行为，而 PtTe₂ 材料的狄拉克点距费米能级仍有较远距离，寻找一种狄拉克点与费米能级相近的材料成为研究人员的目标。2017 年，Yan 等^[45]提出在 IrTe₂ 材料中引入 Pt 的替位掺杂，由于 Pt 原子比 Ir 原子多一个原子序数，因此这种施主掺杂的引入并不会对狄拉克锥的形成造成重大干扰，并可以通过提供额外电子来调节材料的费米能级。研究发现，由于 IrTe₂ 的电荷密度波相变会在 x > 0.04 时被抑制^[80]，所以 1T 相可以稳定存在于 Ir_{1-x}Pt_xTe₂ 材料中，而 1T-TMD 族的狄拉克色散受到晶体对称性保护，故 Pt 的替位掺杂会使 1T 亚稳相稳定^[81]。

如图 13 所示，在 x ≈ 0.3 时，通过 ARPES 观测到费米能级与狄拉克点对齐，此时狄拉克费米子表现出出色的电子运输能力，载流子迁移率上升，对低能太赫兹光子的吸收能力提高，太赫兹辐射与局域电场的相互作用更强，促成了太赫兹响应的异常增强^[82]。实验证明，在 0.3 THz 辐射下，仅有 Pt 组分 x ≈ 0.3 的材料检测出了光响应，在 100 mV 偏压下响应率可达 0.45 A/W，响应时间为 3 μs。

研究人员设计了 Ir_{1-x}Pt_xTe₂-石墨烯范德瓦异质结构，对比 x ≈ 0.3 组分的纯材料器件和异质结器件发现，异质结零偏响应率明显提高。当在源漏两端施加 100 mV 偏压时，Ir_{0.7}Pt_{0.3}Te₂ 纯材料器件在 0.12 THz 和 0.3 THz 处的 NEP 约为 0.5 nW/Hz^{1/2}，Ir_{0.7}Pt_{0.3}Te₂-石墨烯异质结则分别为 60 pW/Hz^{1/2} 和 80 pW/Hz^{1/2}。在 0.3 THz 下的成像图显示，如

图 14 所示, 该器件能清晰扫描出金属钥匙的形状轮廓, 展现出与商用探测器媲美的优异性能。该工作证明了在原子尺度上构建新型拓扑材料的可行性, 预示了狄拉克半金属在成像领域的巨大应用潜力, 被收录于《2021 年中国半导体十大研究进展候选推荐》。



Fig.14 Terahertz(0.3 THz) imaging based on $\text{Ir}_{0.7}\text{Pt}_{0.3}\text{Te}_2$ material

图 14 基于 $\text{Ir}_{0.7}\text{Pt}_{0.3}\text{Te}_2$ 材料的太赫兹(0.3 THz)成像

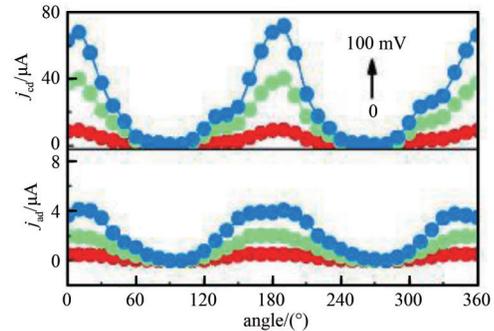


Fig.15 Polarization dependence of photocurrent at different bias voltages along two perpendicular directions of NiTe_2 -based terahertz photodetectors

图 15 沿 NiTe_2 基太赫兹光电探测器两个垂直方向上不同偏压下的光电流偏振依赖关系

3.2.3 高各向异性比的 NiTe_2 太赫兹高频整流器

2021 年, 中国科学院上海技术物理研究所王林课题组报道了一种基于 NiTe_2 低能狄拉克费米子的同质整流器^[83]。零偏时, 0.04 THz、0.12 THz、0.3 THz 下响应率分别为 12.57 A/W、5.72 A/W、0.25 A/W, 相应的 NEP 分别为 4.9 $\text{pW}/\text{Hz}^{1/2}$ 、19.6 $\text{pW}/\text{Hz}^{1/2}$ 、89.8 $\text{pW}/\text{Hz}^{1/2}$ 。研究人员分析, 图 15 中偏振角依赖的二阶非线性光响应是由 NiTe_2 反演对称破缺表面态中的不对称散射引起的。源自极化入射场与表面态各向异性三角散射之间相互作用的整流信号表现出较大的各向异性比为 22, 与 NiTe_2 中电子态的各向异性性质一致。这种奇异的性质意味着可以通过光场同时操纵电子自旋和电荷来进行超高速率和极低功耗的信息处理, 为探索新型太赫兹光电物理和高灵敏度应用提供新思路, 该工作发表于《Nature Communications》。

2022 年, NiTe_2 -石墨烯范德瓦尔斯异质结太赫兹探测器被报道^[84]。实验结果表明, 该器件在 0.28 THz 时, 峰值响应率达到 1.31 A/W, 相应的 NEP 为 17.56 $\text{pW}/\text{Hz}^{1/2}$, 显示出大面积成像、快速响应和高信噪比等优异性能, 媲美商用探测器。

3.2.4 基于 PdTe_2 材料的太赫兹偏振探测

PdTe_2 具有原子堆叠的拓扑对称性加上其强自旋-轨道耦合形成的倾斜狄拉克锥, 使其具有各项异性半闭合的费米面以及大的 THz 吸收系数。中国科学院上海技术物理研究所郭程等在研究中发现, 基于对数天线集成的 PdTe_2 光电探测器在 0.12 THz 下, 零偏响应率达到 0.2 A/W, 100 mV 偏压下可达 10 A/W。郭程等认为零偏光响应来源于 PdTe_2 -金属(Cr)界面电荷和电场的不对称, 载流子在 C_{3v} 等效双金字塔结构的上部和下部散射概率不相同 (PGE 效应), 产生不可抵消的横向电流和高频电磁整流效应^[85], 原理图见图 16。郭程等还设计了基于 6 端环形电极耦合的偏振探测实验, 验证了表面光电流极性分布满足 C_{3v} 非平衡散射及晶格对称性关联, 实验获得了 2 $\text{pW}/\text{Hz}^{1/2}$ 的探测灵敏度与快速响应, 表明半金属材料的奇异行为可能在长波光光子探测中带来新变革。在 0.12 THz 和 0.3 THz 下

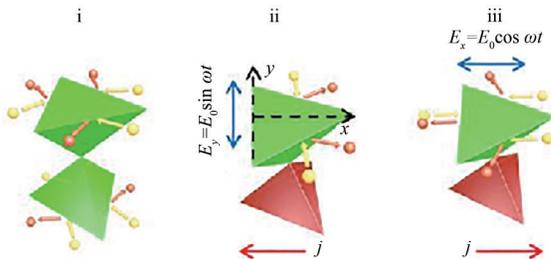


Fig.16 Process of photocurrent generated by PGE effect
图 16 PGE 效应产生光电流的过程

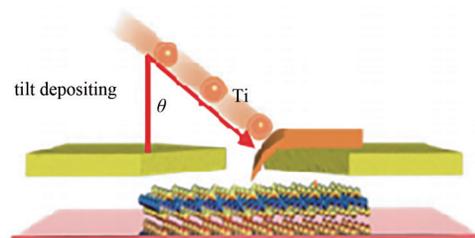


Fig.17 Secondary tilt deposition process
图 17 二次斜蒸工艺

的成像结果表明, PdTe_2 器件可以实现宽频高性能探测与成像。

3.2.5 基于 PtSe_2 材料的低能光子收集太赫兹光电探测器

PtSe_2 具有打破洛伦兹不变性的倾斜狄拉克锥色散, 低能准粒子的存在使其具有各向异性的热电性和可达

1800 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 的室温迁移率^[86]。中国科学院上海技术物理研究所王林等通过图 17 中的倾斜沉积工艺有效缩短沟道长度, 根据 FDTD 仿真结果显示, 沟道长度的缩短对 THz 辐射在沟道处的聚焦有明显增强作用, 促进了 THz 等离极化激元在金属-PtSe₂界面的发射^[87]。同时二次沉积的金属为 Ti/Au, 不同于第一次沉积的 Cr/Au, 人为引入了非对称结构, 实现了高效的低能光电探测。在 0.3 THz 辐射下, 零偏响应率达到 0.2 A/W, PtSe₂-石墨烯异质结的线性动态范围超过 3 个数量级, 零偏光响应为 0.08 A/W, NEP 低至 38 $\text{pW}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

3.3 其他狄拉克半金属太赫兹探测

3.3.1 节线型狄拉克半金属 ZrGeSe

狄拉克节线半金属体带交叉线性色散^[88], 在布里渊区内形成闭环, 展现出超高的量子稳定性、量子霍尔效应和巨大的磁阻。2021 年, 东华大学张力波等与中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所董卓等、中国科学院上海技术物理研究所王林等合作, 通过合成具有狄拉克节线半金属非凡量子特性的高质量 ZrGeSe, 设计对称性破缺的 Cr/Au-ZrGeSe-Ni/Au 结构, 在光热电效应的辅助下实现了高效的自供电光电转换^[89]。纯材料峰值响应率达到了 0.56 A/W@0.1 THz、0.11 A/W@0.26 THz, 噪声等效功率约为 0.15 $\text{nW}/\text{Hz}^{1/2}$, 上升时间 8.1 μs , 下降时间 6.3 μs , 以及 20 kHz 调制频率下未明显退化的光电流都显示了该器件具有高灵敏度和快速响应能力。此外, 在 77 K 的低温实验中, 观察到显著增加的光电流。为进一步抑制暗电流, 研究人员将 ZrGeSe 与石墨烯集成, 在 0.27 THz 下 NEP 约为 14.6 $\text{pW}/\text{Hz}^{1/2}$, 此外对信封内墨水和金属剪刀的投射成像进一步验证了 ZrGeSe 基太赫兹光电探测器的优异性能。

3.3.2 狄拉克半金属 Cd₃As₂ 薄膜

Cd₃As₂ 材料是一种稳定的三维狄拉克半金属材料, 具有很高的载流子迁移率^[90], 光生载流子弛豫时间显示出超快的载流子动力学^[91], 其狄拉克费米点的费米速度为石墨烯的 1.5 倍^[92]。Cd₃As₂ 薄膜的电子态也会随厚度改变, 50 nm 以上呈半金属态, 50 nm 以下为半导体^[93]。2021 年, 中国科学院上海技术物理研究所姚晓梅等分别研究了 400 nm 厚半金属相和 30 nm 厚半导体相的 Cd₃As₂ 薄膜的太赫兹光电转换能力^[94]。半金属相的 Cd₃As₂ 薄膜在 0.3 THz 下响应率为 0.04 A/W, NEP 为 430 $\text{pW}/\text{Hz}^{1/2}$, 在 0.12 THz 时, 上升时间和下降时间分别为 15 μs 和 14 μs , 表现出比半导体相 Cd₃As₂ 更高的迁移率、更快的响应速度和更强的太赫兹吸收能力。此外, 为增强光热电效应, 研究人员在沟道处引入了金手指结构构造非对称结构, 在 0.04 THz, 零偏压响应率为 0.5 A/W, NEP 为 7.2 $\text{pW}/\text{Hz}^{1/2}$, 该项工作展现出狄拉克半金属太赫兹光电探测器在芯片级集成领域的应用潜力。

4 总结与展望

本文从太赫兹辐射的特点和研究背景介绍并阐述了太赫兹光电探测器之于太赫兹技术乃至当下科技发展的重要意义, 介绍了狄拉克半金属的特殊性质及其在超导、反常霍尔效应、相变调控等领域的广泛应用, 概括了图 18 中不同狄拉克半金属太赫兹探测器的探测机理, 并对比了其性能指标, 如表 1 所示。挖掘了狄拉克半金属材料具有推动太赫兹光电探测器朝着室温高灵敏度、快速响应、便携小型化目标发展的潜力。

作为新兴的前沿领域, 对狄拉克半金属太赫兹探测器的研究任重道远。目前, 仍缺少合适的探测机理和有效的实验手段去合理分析太赫兹辐射下狄拉克半金属的电子特性: 第一、二类狄拉克半金属太赫兹探测器局限在较低频段; 第三、四类狄拉克半金属太赫兹探测的研究现阶段尚无突破; 高质量材料的生长及规模化制备技术的不成熟使得狄拉克半金属太赫兹探测器距阵列化、大面积集成仍有较远距离。在后续的研究工作中, 通过体掺杂^[95]、表面掺杂^[96]、改变维度^[97]、电流调控^[98]等方式对狄拉克半金属能带结构进行调控意义非凡; 高质量材料的生长制备是器件性能均匀并通过阵列化集成实现高分辨力(高频)实时成像的必由之路; 此外, 对其他狄拉克半金属材料的预测与验证将为太赫兹光电探测器提供更多选择。未来, 狄拉克半金属为实现更高质量太赫兹实时成像、能量无损传播、量子信息技术创新提供可能。

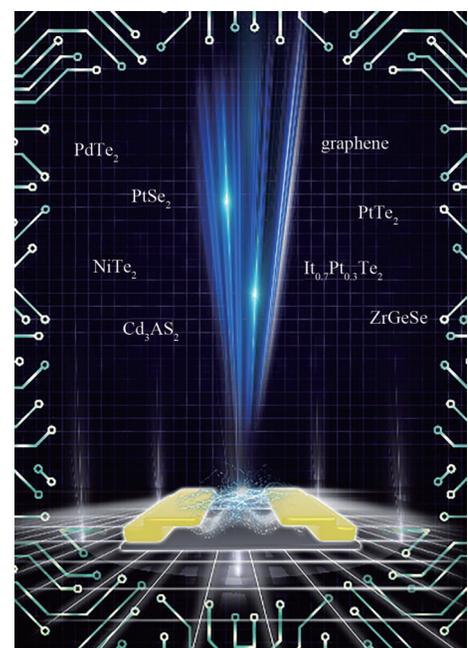


Fig.18 Schematic of Dirac semimetal terahertz detection
图 18 狄拉克半金属太赫兹探测示意图

表 1 基于不同狄拉克半金属材料的太赫兹光电探测器性能对比

Table 1 Performance comparison of THz photodetectors based on different Dirac semimetal materials

materials	f/THz	responsivity@ bias voltage	NEP	response time(τ_r/τ_d)/ μs	references
graphene	0.487	2 V/W	3 nW/Hz ^{1/2}	–	[68]
	3.110	0.232 A/W	–	–	[69]
	0.237	0.1 V/W	207nW/Hz ^{1/2}	–	[70]
	0.330	30 V/W	51pW/Hz ^{1/2}	–	[71]
PtTe ₂	0.120	1.6 A/W @ 0 V	10 pW/Hz ^{1/2}	17/16	[78]
		3.8 A/W @ -100 mV	–	–	
PtTe ₂ -graphene	0.120	537 V/W @ 0 V	–	10	[79]
		1.4 kV/W @-100 mV	–	–	
PtTe ₂	0.300	19 mA @ 0V	1.01 nW/Hz ^{1/2}	8/3	[79]
Ir _{0.7} Pt _{0.3} Te ₂	0.120	0.52 A/W @ 100 mV	0.5 nW/Hz ^{1/2}	3/1.5	[82]
		0.45 A/W @ 0 V	0.5 nW/Hz ^{1/2}	–	
Ir _{0.7} Pt _{0.3} Te ₂ -graphene	0.120	–	80 pW/Hz ^{1/2}	–	[82]
		0.300	–	24 pW/Hz ^{1/2}	
NiTe ₂	0.120	5.72 A/W @ 0 V	19.6 pW/Hz ^{1/2}	2.7	[83]
		0.300	251 mA/W @ 0 V	89.8 pW/Hz ^{1/2}	
NiTe ₂ -graphene	0.280	1.31 A/W @ 0 V	17.56 pW/Hz ^{1/2}	8.5/1.8	[84]
PdTe ₂	0.120	0.2 A/W @ 0 V	1 pW/Hz ^{1/2}	1/2.2	[34]
		0.300	10 A/W @ 100 mV	–	
PtSe ₂	0.300	0.2 A/W @ 0 V	89 pW/Hz ^{1/2}	–	[87]
PtSe ₂ -graphene	0.300	0.08 A/W @ 0 V	38 pW/Hz ^{1/2}	–	[87]
ZrGeSe	0.100	0.56 A/W @ 0V	–	–	[88]
ZrGeSe-graphene	0.270	–	14.6 pW/Hz ^{1/2}	–	[88]
Cd ₃ As ₂	0.120	–	–	15/14	[94]
		0.300	40 mA/W	430 pW/Hz ^{1/2}	

参考文献:

- [1] CROWE T W, BISHOP W L, PORTERFIELD D W, et al. Opening the terahertz window with integrated diode circuits[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005,40(10):2104–2110.
- [2] FERGUSON B, ZHANG X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002,1(1):26–32.
- [3] DRAGOMAN D, DRAGOMAN M. Terahertz fields and applications[J]. Progress in Quantum Electronic, 2004,28(1):1–66.
- [4] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002,50(3):910–928.
- [5] NAGATSUMA T. Terahertz technologies: present and future[J]. IEICE Electronics Express, 2011,8(14):1127–1142.
- [6] HORIUCHI N. Terahertz technology: endless applications[J]. Nature Photonics, 2010,4(3):140.
- [7] GUO X, CAO J, ZHANG R, et al. Recent progress in terahertz quantum-well photodetectors[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013,19(1):8500508-1–8.
- [8] QIU Q, HUANG Z. Photodetectors of 2D materials from ultraviolet to terahertz waves[J]. Advanced Materials, 2021,33(15):2008126-1–19.
- [9] SOOLE J B, SCHUMACHER H. InGaAs metal-semiconductor-metal photodetectors for long wavelength optical communications[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991,27(3):737–752.
- [10] XU S, CHUA S, MEI T, et al. Characteristics of InGaAs quantum dot infrared photodetectors[J]. Applied Physics Letters, 1998,73(21):3153–3155.
- [11] MARTYNIUK P, ANTOSZEWSKI J, MARTYNIUK M, et al. New concepts in infrared photodetector designs[J]. Applied Physics Reviews, 2014,1(4):041102.
- [12] WANG Y, GU Y, CUI A, et al. Fast uncooled mid-wavelength infrared photodetectors with heterostructures of van der Waals on epitaxial HgCdTe[J]. Advanced Materials, 2022,34(6):2107772.
- [13] VITI L, POLITANO A, ZHANG K, et al. Thermoelectric terahertz photodetectors based on selenium-doped black phosphorus flakes[J]. Nanoscale, 2019,11(4):1995–2002.
- [14] YU W, LI S, ZHANG Y, et al. Near-infrared photodetectors based on MoTe₂/graphene heterostructure with high responsivity and flexibility[J]. Small, 2017,13(24):1700268.
- [15] YOUNG S M, KANE C. Dirac semimetals in two dimensions[J]. Physical Review Letters, 2015,115(12):126803.
- [16] BURKOV A A. Topological semimetals[J]. Nature Materials, 2016,15(11):1145–1148.
- [17] MEHDI I, SILES J, CHEN C P, et al. THz technology for space communications[C]// Proceedings of the 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Kyoto, Japan: IEEE, 2018.

- [18] YOUNG S M,ZAHEER S,TEO J C,et al. Dirac semimetal in three dimensions[J/OL]. arXiv:1111.6483v2, 2012.
- [19] 张兴超,潘锐,韩嘉悦,等. 拓扑量子材料光电探测器研究进展[J]. 中国光学, 2021,14(1):43. (ZHANG Xingchao,PAN Rui, HAN Jiayue,et al. Research progress in photo detectors of topological quantum materials[J]. Chinese Optics, 2021,14(1):43.)
- [20] ARNONE D D,CIESLA C M,CORCHIA A,et al. Applications of terahertz(THz) technology to medical imaging[J]. Proceeding of SPIE, 1999(3828):209–219.
- [21] NGUYEN T K, KIM W T, KANG B J, et al. Photoconductive dipole antennas for efficient terahertz receiver[J]. Optics Communications, 2017(383):50–56.
- [22] WANG J,HAN J,CHEN X,et al. Design strategies for two–dimensional material photodetectors to enhance device performance[J]. Infomat, 2019,1(1):33–53.
- [23] ZHOU J,WANG X,CHEN Z,et al. A self–powered and sensitive terahertz photodetection based on PdSe₂[J]. Chinese Physics B, 2022,31(5):050701.
- [24] DYAKONOV M,SHUR M. Shallow water analogy for a ballistic field effect transistor: new mechanism of plasma wave generation by DC current[J]. Physical Review Letters, 1993,71(15):2465–2469.
- [25] DYAKONOV M I,SHUR M. Plasma wave electronics: novel terahertz devices using two dimensional electron fluid[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1996,43(10):1640–1645.
- [26] 郭万龙. 基于二维材料的红外–太赫兹光电探测的研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2021. (GUO Wanlong. Research on infrared–terahertz photodetection based on two–dimensional materials[D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences, 2021.)
- [27] CAO J C. Research progress in terahertz quantum cascade lasers[J]. Science China Information Sciences, 2012,55(1):16–26.
- [28] HIRAYAMA H,TERASHIMA W,LIN T T,et al. Recent progress and future prospects of THz quantum–cascade lasers[C]// Conference on Novel in–Plane Semiconductor Lasers XIV. San Francisco,US:[s.n.], 2015:157–167.
- [29] 张真真,符张龙,王长,等. 太赫兹量子阱探测器研究进展[J]. 红外与毫米波学报, 2022,41(1):103–109. (ZHANG Zhenzhen,FU Zhanglong,WANG Chang,et al. Research on terahertz quantum well photodetector[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022,41(1):103–109.)
- [30] QIU F,YOU G,TAN Z,et al. A terahertz near–field nanoscopy revealing edge fringes with a fast and highly sensitive quantum–well photodetector[J]. Iscience, 2022,25(7):104637.
- [31] WAN W J,LI H,CAO J C. Homogeneous spectral broadening of pulsed terahertz quantum cascade lasers by radio frequency modulation[J]. Optics Express, 2018,26(2):980–989.
- [32] LIAO X,LI Z,ZHOU K,et al. Broadband terahertz quantum cascade laser dual–comb sources under off–resonant microwave injection[J/OL]. arXiv:2111.07484, 2022.
- [33] DE–JUAN F,GRUSHIN A G,MORIMOTO T, et al. Quantized circular photogalvanic effect in Weyl semimetals[J]. Nature Communications, 2017,8(1):1–7.
- [34] GUO C,HU Y,CHEN G,et al. Anisotropic ultrasensitive PdTe₂–based phototransistor for room–temperature long–wavelength detection[J]. Science Advances, 2020,6(36):eabb6500.
- [35] 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]. 2020,39(2):191–210. (ZHANG Yuping,TANG Libin, LIU Yufei,et al. The research progress and application of novel terahertz detectors[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020,39(2):191–210.)
- [36] 杨昕昕,孙建东,秦华. HEMT 太赫兹探测器响应度和 NEP 的检测与分析[J]. 微纳电子技术, 2013,50(2):69–73. (YANG Xinxin,SUN Jiandong,QIN Hua. Detection and analysis of the responsivity and NEP for HEMT terahertz detectors[J]. Micro–Nano Electronics Technology, 2013,50(2):69–73.)
- [37] LIU J,XIA F,XIAO D,et al. Semimetals for high–performance photodetection[J]. Nature Materials, 2020,19(8):830–837.
- [38] 崔亚宁,任伟. 拓扑量子材料的研究进展[J]. 自然杂志, 2019,41(5):348–357. (CUI Yaning,REN Wei. Research advances of topological quantum materials[J]. Chinese Journal of Nature, 2019,41(5):348–357.)
- [39] WANG Z J,SUN Y,CHEN X Q,et al. Dirac semimetal and topological phase transitions in A₃Bi(A=Na,K,Rb)[J]. Physical Review B, 2012,85(19):195320.
- [40] LIU Z,ZHOU B,ZHANG Y,et al. Discovery of a three–dimensional topological Dirac semimetal,Na₃Bi[J]. Science, 2014,343(6173):864–867.
- [41] 邓韬,杨海峰,张敬,等. 拓扑半金属材料角分辨光电子能谱研究进展[J]. 物理学报, 2019,68(22):113–134. (DENG Tao,YANG Haifeng,ZHANG Jing,et al. Progress of ARPES study on topological semimetals[J]. Acta Physica Sinica, 2019,68(22):113–134.)

- [42] DAMASCELLI A, SHEN Z X, HUSSAIN Z. Angle-resolved photoemission studies of the cuprate superconductors[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2003,75(2):473.
- [43] MUKHERJEE S P, CARBOTTE J P. Absorption of circular polarized light in tilted type-I and type-II Weyl semimetals[J]. *Physical Review B*, 2017,96(8):085114.
- [44] 徐煌. 基于第二类狄拉克半金属的太赫兹探测器件研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2021. (XU Huang. Research on terahertz detection devices based on the second type of Dirac semimetals[D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences, 2021.)
- [45] YAN M, HUANG H, ZHANG K, et al. Lorentz-violating type-II Dirac fermions in transition metal dichalcogenide PtTe₂[J]. *Nature Communications*, 2017,8(1):1-6.
- [46] GUAN S, LIU Y, YU Z M, et al. Two-dimensional spin-orbit Dirac point in monolayer HfGeTe[J]. *Physical Review Materials*, 2017,1(5):054003.
- [47] LIU Z, XIN H, FU L, et al. All-silicon topological semimetals with closed nodal line[J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2018,10(2):244-250.
- [48] HE X, GAO P, SHI W. A further comparison of graphene and thin metal layers for plasmonics[J]. *Nanoscale*, 2016,8(19):10388-10397.
- [49] HE Xiaoyong, LIU Feng, LIN Fangting, et al. 3D Dirac semimetal supported tunable TE modes[J]. *Annalen der Physik*, 2022,534(4):2100355.
- [50] HE X, ZHAO Z, SHI W. Graphene-supported tunable near-IR metamaterials[J]. *Optics Letters*, 2015,40(2):178-181.
- [51] HE X, LI R. Comparison of graphene-based transverse magnetic and electric surface plasmon modes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013,20(1):62-67.
- [52] HE X. Tunable terahertz graphene metamaterials[J]. *Carbon*, 2015(82):229-237.
- [53] CAO Y, FATEMI V, FANG S, et al. Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices[J]. *Nature*, 2018, 556(7699):43-50.
- [54] CAO Y, PARK J M, WATANABE K, et al. Pauli-limit violation and re-entrant superconductivity in moire graphene[J]. *Nature*, 2021,595(7868):526-531.
- [55] HE G, SHANG X, YUE J, et al. Giant circular dichroism induced by a tunable metamirror with Dirac semimetal[J]. *Journal of the Optical Society of America, B*, 2020,37(4):927-932.
- [56] WU M, ZHENG G, CHU W, et al. Probing the chiral anomaly by planar Hall effect in Dirac semimetal Cd₃As₂ nanoplates[J]. *Physical Review B*, 2018, 98(16):161110.
- [57] HUAN C, ZHOU T, ZHANG H, et al. Proximity-induced surface superconductivity in Dirac semimetal Cd₃As₂[J]. *Nature Communications*, 2019,10(1):2217.
- [58] WANG H, WANG H, LIU H, et al. Observation of superconductivity induced by a point contact on 3D Dirac semimetal Cd₃As₂ crystals[J]. *Nature Materials*, 2016,15(1):38-42.
- [59] LIU F, LI J, ZHANG K, et al. Pressure-induced Lifshitz transition in the type II Dirac semimetal PtTe₂[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019,62(4):1-7.
- [60] XIA H, LI Y, CAI M, et al. Dimensional crossover and topological phase transition in Dirac semimetal Na₃Bi films[J]. *ACS Nano*, 2019,13(8):9647-9654.
- [61] WANG L, ZHANG S, MCEVOY N, et al. Nonlinear optical signatures of the transition from semiconductor to semimetal in PtSe₂ [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019,13(8):1900052.
- [62] LIU Y, HUANG Y, DUAN X J N. Van der Waals integration before and beyond two-dimensional materials[J]. *Nature*, 2019,567(7748):323-333.
- [63] TAN Y W, ZHANG Y, STORMER H L, et al. Temperature dependent electron transport in graphene[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2007,148(1):15-18.
- [64] CASTRO E V, OCHOA H, KATSNELSON M, et al. Limits on charge carrier mobility in suspended graphene due to flexural phonons[J]. *Physical Review Letters*, 2010,105(26):266601.
- [65] BALANDIN A A, GHOSH S, BAO W, et al. Superior thermal conductivity of single-layer graphene[J]. *Nano Letters*, 2008,8(3):902-907.
- [66] RYZHII V, OTSUJI T, RYZHII M, et al. Double graphene-layer plasma resonances terahertz detector[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012,45(30):302001.
- [67] 甘凯仙. 石墨烯场效应晶体管太赫兹光电特性研究[D]. 上海:东华大学, 2016. (GAN Kaixian. Study on terahertz optoelectronic properties of graphene field effect transistors[D]. Shanghai, China: Donghua University, 2016.)

- [68] YANG X, VOROBIEV A, GENERALOV A, et al. A flexible graphene terahertz detector[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(2): 021102.
- [69] DENG T, ZHANG Z, LIU Y, et al. Three-dimensional graphene field-effect transistors as high-performance photodetectors[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(3): 1494–1503.
- [70] YANG X X, SUN J D, QIN H, et al. Room-temperature terahertz detection based on CVD graphene transistor[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(4): 047206.
- [71] QIN H, SUN J, LIANG S, et al. Room-temperature, low-impedance and high-sensitivity terahertz direct detector based on bilayer graphene field-effect transistor[J]. *Carbon*, 2017(116): 760–765.
- [72] BANDURIN D A, SVINTSOV D, GAYDUCHENKO I, et al. Resonant terahertz detection using graphene plasmons[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1–8.
- [73] WOESSNER A, LUNDEBERG M B, GAO Y, et al. Highly confined low-loss plasmons in graphene-boron nitride heterostructures[J]. *Nature Materials*, 2015(14): 421–425.
- [74] NI G. Fundamental limits to graphene plasmonics[J]. *Nature*, 2018, 557(7706): 530–533.
- [75] CAI X, SUSHKOV A B, JADIDI M M, et al. Plasmon-enhanced terahertz photodetection in graphene[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(7): 4295–4302.
- [76] CASTILLA S, TERRES 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.
- [77] POLITANO A, CHIARELLO G, GHOSH B, et al. 3D Dirac plasmons in the type-II Dirac semimetal PtTe₂[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(8): 086804.
- [78] 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.
- [79] ZHANG K, XING H, WANG L. PtTe₂-based terahertz photodetector integrated with an interdigital antenna[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022(123): 104168.
- [80] PYON S, KUDO K, NOHARA M. Emergence of superconductivity near the structural phase boundary in Pt-doped IrTe₂ single crystals[J]. *Physica C: Superconductivity*, 2013(494): 80–84.
- [81] UGEDA M M, PULKIN A, TANG S, et al. Observation of topologically protected states at crystalline phase boundaries in single-layer WSe₂[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1–7.
- [82] 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.
- [83] ZHANG L, CHEN Z, ZHANG K, et al. High-frequency rectifiers based on type-II Dirac fermions[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1–8.
- [84] SHEN J, XING H, WANG L, et al. A Van der Waals heterostructure based on nickel telluride and graphene with spontaneous high-frequency photoresponse[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(6): 063501.
- [85] 郭程. 红外太赫兹器件的光场调控及探测机理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020. (GUO Cheng. Study on optical field regulation and detection mechanism of infrared terahertz devices[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.)
- [86] LI Y, XIA Y, EKAHANA S A, et al. Topological origin of the type-II Dirac fermions in PtSe₂[J]. *Physical Review Materials*, 2017, 1(7): 074202.
- [87] 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): 1–10.
- [88] YU R, FANG Z, DAI X, et al. Topological nodal line semimetals predicted from first-principles calculations[J]. *Frontiers of Physics*, 2017, 12(3): 1–14.
- [89] 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.
- [90] NEUPANE M, XU S Y, SANKAR R, et al. Observation of a three-dimensional topological Dirac semimetal phase in high-mobility Cd₃As₂[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1–8.
- [91] ZHANG W, YANG Y, SUO P, et al. Ultrafast photocarrier dynamics in a 3D Dirac semimetal Cd₃As₂ film studied with terahertz spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(22): 221102.
- [92] BOSTWICK A, OHTA T, SEYLLER T, et al. Quasi-particle dynamics in graphene[J]. *Nature Physics*, 2007, 3(1): 36–40.