

拓扑量子体系中的长波光电探测

张凯旋 陈支庆子 王林[†]

(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)

2020-11-05 收到

[†] email: wanglin@mail.sitp.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20210106

拓扑绝缘体是一类体态绝缘而表面态具有金属特性的材料，它作为一种全新的量子物质，引起了人们对新型拓扑相的关注。寻找自然界中新的拓扑材料已经成为近十几年来凝聚态物理中的研究热点。继拓扑绝缘体之后，能带结构的拓扑分类又被扩展到了金属体系，出现了另一类具有特殊电子结构的拓扑材料，即拓扑半金属。拓扑半金属的能带交叉点在费米能上，并且它具有耗散低、极高的载流子迁移率，以及自旋电性可控等特点^[1-3]，可以用来制作低能耗的光电子学器件，极大地促进了光电子技术、信息科学和半导体技术等领域的发展。

拓扑半金属材料具有丰富多样的拓扑表面态，根据其准粒子的激发是否可以打破洛伦兹不变性分为第一类外尔/狄拉克半金属(Na₃Bi, TaAs, NbAs, Cd₃As₂等)^[4]和第二类外尔/狄拉克半金属(MoTe₂, WTe₂, PtSe₂, PtTe₂, PdTe₂等)^[5]。如图1(a), (b)所示，第一类拓扑半金属的狄拉克点/外尔点在导带和价带相交于一点，但是第二类拓扑半金属中的狄拉克点/外尔点出现在电子口袋和空穴口袋的交叉边界，能带结构出现强烈的倾斜。

此外，拓扑半金属具有显著的手性关联输运特性、非线性光学现象、拓扑超导等常规材料所不具备的奇异物理性质，并具有较大的态密度以及强的光-物质相互作用能力。近年来，已有相

关研究表明拓扑半金属能够在宽带光电探测方面表现出优异性^[7, 8]。基于第二类拓扑半金属材料零带隙的能带结构以及能带在交点附近严重倾斜导致的各向异性，已经实现了在中波红外的高灵敏光电探测以及偏振光电探测^[9]。其中在外尔点附近贝里曲率发散引起的光电流增强被证明是提升光电探测性能的关键^[10]。所有这些非平庸物理现象的观测依赖于中红外(光子能量~sub-eV)能量激发、弛豫所导致的基态或低能激发态的输运，然而在长波波段(光子能量~meV)的低光子能量下，拓扑半金属材料的激发效率将会急剧下降。另一方面，零带隙的拓扑半金属材料面临的暗电流问题是造成光子探测器信号湮没的另外一个关键因素。传统的长波红外光子探测器(碲镉汞、量子阱、II类超晶格探测器等)，通过组分掺杂缩小禁带或子带以匹配光子能量的方式，促使光子激发形成电子-空穴对，然而随着波长的增加，器件需要在极低温工作来抑制暗电流或热噪声以维持光子激发的量子效率，因而长波光子的探测面临着极大的难度。因此，从传统光子探测器思路来说，拓扑半金属材料由于更大的暗电流噪声，认为其并不适合室温下的长波红外探测。

然而，拓扑半金属由于对称保护的电子态具有独特的载流子特性，如太赫兹激发下的动态手性反常性、反常霍尔效应、手性太赫兹场发射等等，预示着利用光子的电、磁分量进行探测的可行性，而这种电磁效应并不类似于光子探测模式面临的热噪声极限问题。当前已确定第二类拓扑半金属材料可以有效吸收长波光子的电磁场能量，但仍然需要深入理解其拓扑

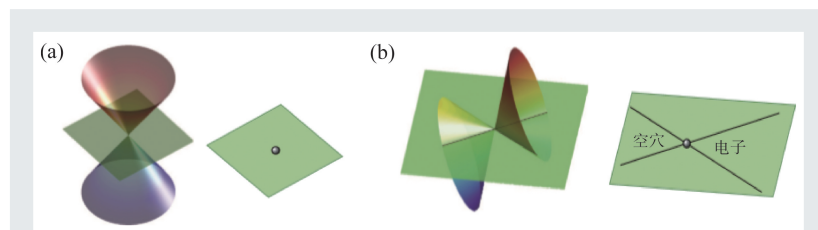


图1 拓扑半金属第一类狄拉克锥(a)和第二类狄拉克锥(b)^[6]

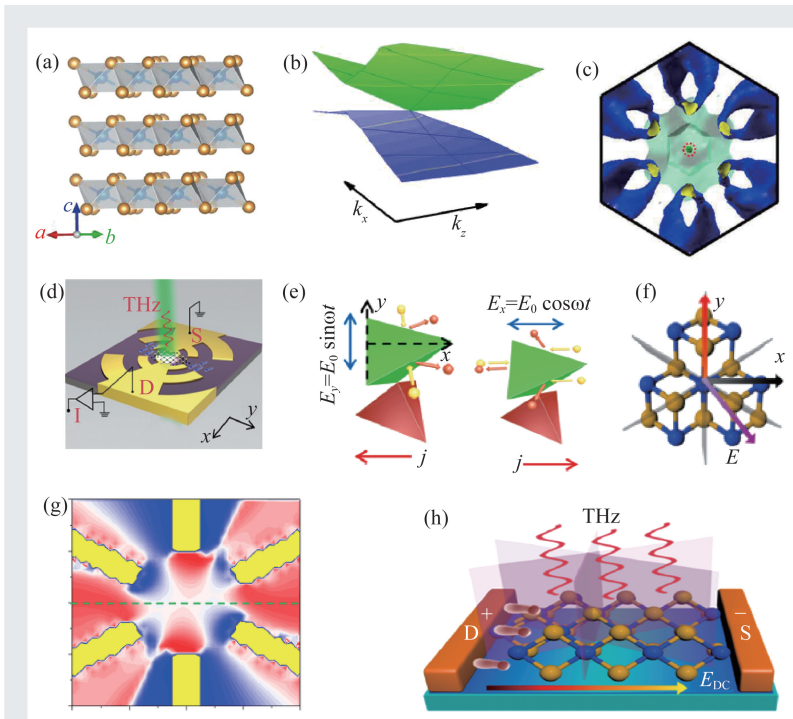


图2 (a)碲化钯(PdTe_2)的晶体结构; (b) PdTe_2 的三维狄拉克锥; (c) PdTe_2 费米面的电子—空穴费米包结构; (d)基于 PdTe_2 的光电探测器原理图(金色图案是亚波长的金属电极, 沟道处的材料是拓扑半金属); (e)太赫兹光电转换机理, C_{3v} 等效的双金字塔结构; (f)理想的材料极化场与对称面的相对方向微观图; (g) C_{3v} 对称的光致电流效应(photogalvanic, PGE)的光电流微观分布; (h)偏压调控的光电流机制原理图

特征对光电信号产生的影响。

针对此, 我们采用具有第二类狄拉克半金属特征的碲化钯(PdTe_2)材料并构建了相关的器件结构。如图2(a)所示, PdTe_2 具有原子堆叠的拓扑对称性结构, 在晶体的对称保护下, PdTe_2 的狄拉克锥在 k_x-k_z 平面上的投影如图2(b)所示^[11], 并在 k_x-k_y 费米面形成电子和空穴包, 使得该材料具有各向异性动量分布以及大的长波光吸收系数, 如图2(c)所示。

为了深入理解第二类拓扑狄拉克半金属的微观电子态电磁响应过程, 我们提出了一种基于亚波长的金属—拓扑半金属—金属(MTM)结构来探测太赫兹长波光光子(图2(d))。金属电极采用特殊设计的对数(log)周期性天线结构, 并通过FDTD电磁仿真验证其宽带耦合特性。首先, 我们通过紫外光刻、电子束蒸发等一系列制备工艺, 对天线耦合的平面 PdTe_2 器件进行光电响应研究。亚波长的金属电极(S和D)可以将长波长的光子有效耦合

到拓扑半金属的表面(电极沟道处的材料), 增强电磁波与狄拉克费米子的相互作用。相对于光子探测方式, 通过电磁场耦合的方式可以根据目标波长进行合理设计, 从而可实现宽的调谐范围。在实验中发现, 金属Cr与 PdTe_2 界面电荷转移形成界面态, 通过金属对数天线耦合的共同作用引起 PdTe_2 表面电子产生周期性的驱动震荡, 即在金属—材料界面附近会产生电荷转移和电场局域化的协同作用。由于第二类拓扑半金属 PdTe_2 无带隙性质, 在太赫兹辐射的作用下, 其光子吸收会得到增强, 同时光电流也会由于大的费米子态密度变得增强。

通过对不同器件结构的偏振探测研究发现, 界面电荷和电场的不对称破坏了 C_{3v} 载流子散射概率/动量分布的对称性, 进而产生

无需电偏压的横向电流(PGE效应)(图2(e), (f)), 导致了器件中一个大的二阶非线性光电流的产生。在没有太赫兹辐射的情况下, 各向异性散射电子的流动会被完全抵消, 因此不会有光电流产生。在太赫兹光子的电磁驱动下, 产生的感应电流方向取决于电场偏振极化和晶轴的相对方向。

我们基于密度泛函理论并结合非平衡格林函数的第一性原理模拟包nanocal^[12]计算了 PdTe_2 的运输特性, 采用原子轨道线性组合以及赝势场的方法, 通过PBE(Perdew—Burke—Ernzerhof)广义梯度近似引入自旋—轨道耦合交换关联相互作用, 揭示了 PdTe_2 体系受晶格对称性保护形成第二类狄拉克锥结构, 从理论上定性证明了各向异性光电流的存在。为了验证局部材料—金属界面的光电流分布特性, 我们采用了垂直电极、环形电极等器件结构, 形成对入射电磁波的耦合调控, 通过改变电磁场的偏振方向, 从而改变电磁场的分布以便更好地体现光电流的变化与局部电

磁分量、材料对称性的关联性。通过环形电极的偏振实验与电磁模态的分布,进一步验证了 C_{3v} 对称特性的整流光电流以及偏振控制现象(图2(g))。另外,通过进一步施加偏置电压(E_{DC})可以打破沟道的平面对称,使非平衡载流子沿电场横向移动,局域于金属-材料界面附近的非平衡载流子除了产生偏压无关的光电流外,还产生与 E_{DC} 成比例的净非线性分量(图2(h))。

我们实现的第二类狄拉克半金属材料室温太

赫兹探测器,表现出较强的光电流响应、低噪声、低功耗的优异性能,且具有偏振敏感的各向异性光电流,通过有效结合拓扑半金属时间-空间反演对称性保护的特征、强的长波光吸收与电磁特性,有望为下一代太赫兹长波光电器件设计提供新思路。该成果有利于促进凝聚态物理的前沿探索与光电子器件应用的交叉研究,已于近期在 *Science Advances* 上发表^[13]。

参考文献

- [1] Rostami H *et al.* Phys. Rev., 2018, 97: 195151
 [2] Yuan H *et al.* Nat. Nanotechnol., 2015, 9: 851
 [3] Zyuzin A A *et al.* Phys. Rev. B, 2016, 95: 085127
 [4] Gao Y *et al.* Nat. Commun., 2020, 11: 720
 [5] Chia X *et al.* Adv. Funct. Mater., 2016, 26: 4306
 [6] Yan B *et al.* Annu. Rev. Condens. Ma. P., 2016, 8: 337
 [7] Wang Q *et al.* Nano. Lett., 2017, 17: 834
 [8] Yang M *et al.* ACS Photonics, 2018, 5(8): 3438
 [9] Lai J *et al.* Adv. Mater., 2018, 30: 1707152
 [10] Ma J *et al.* Nat. Mater., 2019, 18: 476
 [11] Fei F *et al.* Phys. Rev. B, 2017, 96: 041201
 [12] Taylor J *et al.* Phys. Rev. B, 2001, 63: 245407
 [13] Guo C *et al.* Sci. Adv., 2020, 6: 6500

■ Single Bellows Manipulation



Miniax XY Table
HPT

■ Dual Bellow Manipulators



Transax Omniax Wide Bore

■ Omniax Manipulator



Omniax

■ Z-Axis Manipulators



LTM Wide Bore LTM Series TR Series



卓凌机电
FOR VACUUM · FOR CRYOGENICS

VACGEN 位移台
一站式真空低温设备
及应用方案

合作厂商:








电话 0551-63637062 网址 www.zlvacuum.com
 手机 15375344777 邮箱 liuxin@zlvacuum.com
 合肥办公室 合肥市经开区东湖高新合肥创新中心13-2栋403
 上海办公室 上海市浦东新区华佗路68号张江源北区11号楼105



联系人
刘鑫

《《 想了解更多
产品可咨询