



三重简并拓扑半金属MoP中超快圆偏振光产生和调控光生热电流

加孜拉·哈赛恩 朱恪嘉 孙飞 吴艳玲 石友国 赵继民

Generation and control of photo-excited thermal currents in triple degenerate topological semimetal MoP with circularly polarized ultrafast light pulses

Jiazila Hasaien Zhu Ke-Jia Sun Fei Wu Yan-Ling Shi You-Guo Zhao Ji-Min

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 207801 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200031

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200031>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三重简并拓扑半金属磷化钼的时间分辨超快动力学

Time-resolved ultrafast dynamics in triple degenerate topological semimetal molybdenum phosphide

物理学报. 2020, 69(7): 077801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191816>

非线性克尔效应对飞秒激光偏振的超快调制

Ultrafast polarization modulation of laser pulses at terahertz frequencies via optical Kerr effect

物理学报. 2018, 67(23): 237801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181450>

铁磁异质结构中的超快自旋流调制实现相干太赫兹辐射

Coherent terahertz radiation via ultrafast manipulation of spin currents in ferromagnetic heterostructures

物理学报. 2018, 67(19): 197202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181178>

磁性硅烯超晶格中电场调制的谷极化和自旋极化

Valley and spin polarization manipulated by electric field in magnetic silicene superlattice

物理学报. 2018, 67(8): 086801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180080>

Fe₃GeTe₂纳米带的结构稳定性、磁电子性质及调控效应

Structure stability, magneto-electronic properties, and modulation effects of Fe₃GeTe₂ nanoribbons

物理学报. 2019, 68(20): 208502 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191103>

拓扑绝缘体中的超快电荷自旋动力学

Ultrafast charge and spin dynamics on topological insulators

物理学报. 2019, 68(22): 227202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191433>

专题：太赫兹自旋光电子

三重简并拓扑半金属 MoP 中超快圆偏振光产生和调控光生热电流*

加孜拉·哈赛恩^{1)2) #} 朱恪嘉^{1)2) #} 孙飞¹⁾²⁾吴艳玲¹⁾ 石友国¹⁾³⁾ 赵继民^{1)2)3) †}

1) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190)

2) (中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049)

3) (松山湖材料实验室, 东莞 523808)

(2020 年 1 月 6 日收到; 2020 年 4 月 6 日收到修改稿)

超快激光可以用来产生和调控拓扑量子材料中的拓扑相变和自旋极化电流, 这些光诱导产生的新奇物性源于材料中受到体系对称性保护的线性色散能带结构的简并节点. 作为一种同时具有两重和三重简并节点的拓扑半金属, 磷化钼 (MoP) 是一类非常独特的拓扑半金属体系. 本文初步探索了三重简并拓扑半金属晶体 MoP 中产生自旋极化电流和奇异光学响应的机理, 设计并搭建了以圆偏振光产生并调控光电流的实验装置. 首先采用该装置成功在拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 中产生了光电流, 与国际上已报道的实验结果对比效果很好, 证明了实验装置的可行性和可靠性; 进而对 MoP 进行了同样的光电流产生与调控实验. 采用 400 nm 的圆偏振超快激光脉冲, 在样品不同位置成功观测到了电流信号, 分析认为其为热电流, 不是与三重简并拓扑特性相关的光电流. 这为未来进一步产生和调控光电流提供了重要的研究基础, 对于研究普遍的拓扑量子材料的光电流效应具有可借鉴的意义.

关键词: 光电流, 三重简并拓扑材料, 超快光谱, 自旋极化

PACS: 78.47.J-, 03.65.Vf, 78.20.Ek, 78.20.nb

DOI: 10.7498/aps.69.20200031

1 引言

外尔半金属是凝聚态物质中一种独特的拓扑物相, 它具有非平庸的拓扑能带结构, 在动量空间中具有手性相反的两重简并节点, 并且不同手性的节点总是成对存在, 在基础物性研究中具有重要意义, 为“手征电子学”和信息器件的发展提供了新的契机^[1]. 自从理论预测和实验证实了具有两重简并

的外尔半金属存在后^[2,3], 科学家们致力于寻找简并度更为丰富的准粒子, 更预言了三重、六重以及八重简并态的可能存在^[4]. 随后实验上在 MoP 中同时观测到三重简并点^[5-7]和两重简并的外尔点, 并发现他们受到体系的旋转以及镜像对称性保护. 三重简并点的发现大大促进了人们对拓扑量子态的理解, 对探索新奇物理现象及发展新型电子器件提供了一个新的发展前景.

超快激光与物质的相互作用, 可以激发固体内

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2017YFA0303603, 2016YFA0300303, 2017YFA0302901)、国家自然科学基金 (批准号: 11574383, 11774408, 11774399)、中国科学院战略重点研究计划先导专项 B (批准号: XDB30000000)、中国科学院国际合作项目 (批准号: GJHZ1826)、北京市自然科学基金 (批准号: 4191003) 和中国科学院创新交叉团队项目资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: jmzhao@iphy.ac.cn

部的准粒子产生新奇的光学或电学效应. 例如, 时间分辨抽运-探测方法研究激发态准粒子的超快动力学, 包括非常规高温超导体^[8–11]、强关联体系^[12–14]、拓扑量子态^[15–17]、半导体材料^[18,19]等以及激光诱导及调控的电子相干性^[20–24]、晶格相干性^[15,16]、声波相干性^[25]、自旋波量子压缩态^[26,27]等. 激发光的偏振可用于产生和控制表面源自拓扑特性的自旋极化光电流^[28–34](通常只有 pA—nA^[32–34]). 2012 年, Mclver 等^[32]利用 795 nm 的激光对拓扑绝缘体 Bi₂Se₃ 进行探测, 成功观察到了源于拓扑绝缘体表面态贡献的光电流, 并发现改变光的偏振方向会逆转光电流的方向. 2017 年, 他们还使用中红外激光 (10.6 μm) 成功探测了拓扑半金属 TaAs^[33] 中的光电流, 并分辨了外尔费米子的手性. 2019 年, Ma 等^[34]在二类外尔半金属 TaIrTe₄ 中采用中红外激光 (4 μm) 观测到了较强的圆偏振光调控的光电流响应. 拓扑半金属 MoP 内部具有三重简并费米子的自旋状态, 光电流可以在其拓扑表面产生或控制自旋极化电流.

本文设计并搭建了激光产生并调控电流的实验装置, 在 Bi₂Se₃ 中成功探测到了对激光偏振依赖的光电流的变化. 采用上述装置, 用 400 nm 圆偏振激发光对 MoP 进行了光电流的探索, 以期激发及表征其三重简并费米子的手性特征或奇异表面态性质. 观测到了不同空间位置不随激发光偏振变化的电流信号, 判断其并非光电流而是热电流, 分析总结了 MoP 中没有产生光电流的原因. 本文的实验探索为研究更多的拓扑半金属和拓扑绝缘体材料的光电流响应提供了有益的借鉴, 为拓扑材料的光生热电流等的潜在应用提供了重要的物性基础.

2 实验

2.1 光电流的实验测量

采用中心波长为 800 nm, 重复频率为 250 kHz, 脉宽为 70 fs 的掺 Ti-蓝宝石飞秒激光光源以及倍频后的 400 nm 光源进行光电流实验. 实验装置如

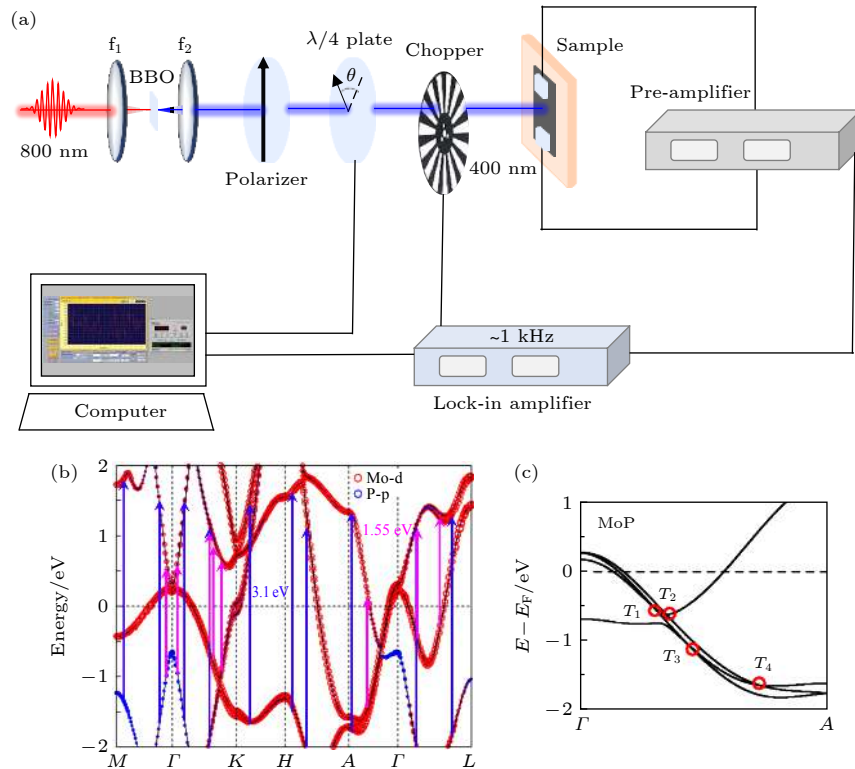


图 1 (a) 光电流产生和探测实验装置, f_1 和 f_2 为透镜, BBO 为倍频非线性晶体; (b) 800 nm (1.55 eV, 粉红色箭头) 和 400 nm (3.1 eV, 蓝紫色箭头) 脉冲激光可能激发的动量区域, 其中能带结构引自文献^[35] 计算结果; (c) MoP 中的 4 个三重简并点局域放大 (红色圆圈)^[35]

Fig. 1. (a) Schematic photocurrent experimental setup. f_1 and f_2 are focusing lenses. BBO is the doubling frequency nonlinear crystal; (b) the allowed excitation areas by 800 nm (1.55 eV, pink arrows) and 400 nm (3.1 eV, purple arrows) pulsed lasers, respectively. The band structure is adapted from Ref. ^[35]; (c) the four triple points are highlighted by the red circles^[35].

图 1(a) 所示, 800 nm (或经过 BBO 晶体倍频后的 400 nm) 超快激光脉冲经过偏振片后, 再通过旋转后面的 $\lambda/4$ 波片的角度周期性地改变出射光的偏振类型 (左旋光-线偏振光-右旋光). 最后入射光经过采样频率为 1 kHz 的斩波器调制后由焦距为 10 cm 的凸透镜聚焦到样品表面, 光斑直径大小为 60 μm . 由于光激发的电流信号非常小, 通常在 pA 至 nA 量级 [32–34], 需要在样品上制备两个电极接至前置放大器上将电流放大, 最终再通过锁相放大器按照斩波器的采样频率进行采集记录, 获得光电流的信号. 采用电动旋转装置精确调节 $\lambda/4$ 波片旋转的角度 θ , 由自行编制的 LabVIEW 软件对其进行控制. 图 1(b) 为引文 [35] 报道的 MoP 的能

带结构, 用粉红色和蓝紫色箭头分别表示 800 nm (1.55 eV) 和 400 nm (3.1 eV) 激光脉冲激发电子可能产生光电流的区域. 图 1(c) 为引文 [35] 报道的三重简并点, 是图 1(b) 的局域放大图. 红色圆圈为 4 个三重简并点.

2.2 样品的表征

MoP 的单晶通过固相反应合成, 样品制备详情见文献 [5]. 用扫描电子显微镜 (scanning electron microscopy, SEM) 观察样品表面, 图 2(a) 展示了样品整体的 SEM 扫描图像, 图 2(e), (f) 分别展示了样品在 5 和 20 μm 分辨率下的 SEM 扫描图像, 大小约为 1 mm \times 1 mm, 样品厚度为 162 μm ,

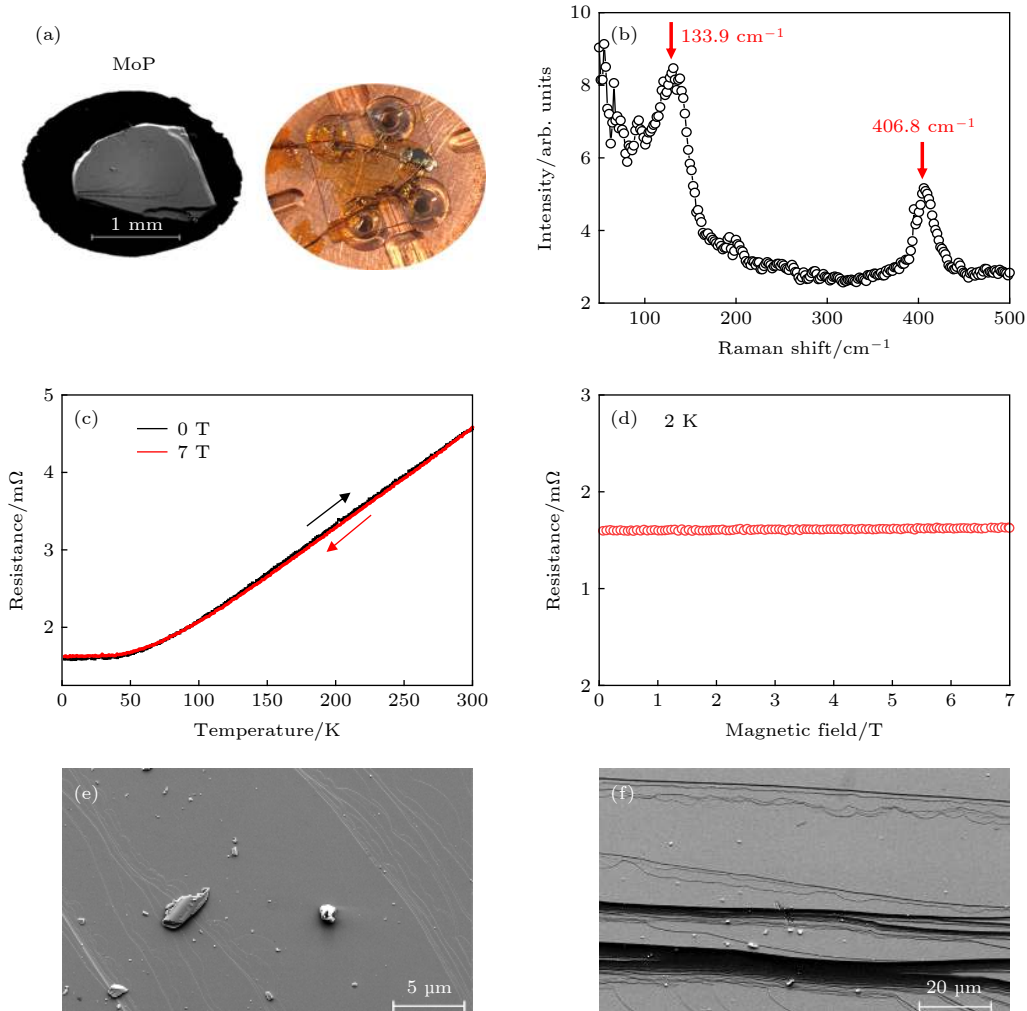


图 2 MoP 样品的表征 (a) 光电流实验所使用的 MoP 样品, 左图为 SEM 图像, 右图为加电极后粘到铜托上的样品实物图; (b) 常温下的 Raman 光谱, 红色箭头标出两个拉曼峰; (c) 0 和 7 T 下的电输运测量; (d) 2 K 温度下的电阻随磁场的变化; (e) 5 μm 分辨率样品局部放大 SEM 图; (f) 20 μm 分辨率样品局部放大 SEM 图

Fig. 2. Characterizations of the MoP sample in the photocurrent experiment: (a) SEM image (left panel) and the sample after adding the electrodes (right panel); (b) Raman spectroscopy at room temperature, two red arrows mark the Raman peaks; (c) temperature dependence of the resistance at 0 and 7 T external magnetic field; (d) magnetic field dependence of resistance at 2 K; (e) SEM image with a resolution of 5 μm ; (f) SEM image with a resolution of 20 μm .

其表面非常平整, 适合用于光电流实验及其他表征. 图 2(a) 右图展示了样品加上两个电极后底部通过低温胶粘在铜托上的实物图, 两根直径为 $20\ \mu\text{m}$ 的 Pt 丝的一端通过银胶粘在样品两侧的表面上, 另一端连接到外电路上.

对样品进行了 Raman 和输运表征. 图 2(b) 为 MoP 样品的 Raman 散射光谱, 采用 $532\ \text{nm}$ 波长、 $0.9\ \text{mW}$ 功率的线性偏振连续激光作为光源进行了近场共聚焦拉曼光谱测量, 透过一个 $50\times$ 的物镜汇聚到样品表面, Raman 光谱的分辨率为 $2\ \text{cm}^{-1}$. 从获得的 Raman 光谱中可以看到, 在 133.9 和 $406.8\ \text{cm}^{-1}$ 处各出现了一个 Raman 峰, 尚未发现有关 MoP 的详细的 Raman 研究工作被报道. 图 2(c) 为 MoP 在 0 和 $7\ \text{T}$ 磁场下进行的电输运测量, 其中黑色曲线为不加磁场时的数据 (黑色箭头表示升温过程), 红色曲线为 $7\ \text{T}$ 磁场下的测量数据 (红色箭头表示降温过程). 由图 2(c) 中曲线可以看出, 在有无磁场条件下, 电阻率随温度的变化曲线基本重合, 均在大约 $50\ \text{K}$ 附近出现转折.

说明磁场不会对 MoP 的输运特性产生影响. 在 $0\ \text{K}$ 时电阻率不为 0 , 经计算剩余电阻率 (residual resistance ratio, RRR) 大约为 $\text{RRR} = R_{300\ \text{K}}/R_{2\ \text{K}} = 2.87$; 与文献 [35] 的结果趋势相似, 仅 RRR 有些差异, 可能与样品生长条件不同、掺杂浓度不同、电极接触电阻、或样品表面有氧化等有关. 图 2(d) 所示为 MoP 在 $2\ \text{K}$ 温度下测得的电阻随磁感应强度的变化曲线, 图 2(d) 中显示其电阻随磁场基本不变; 这也与文献 [35] 报道的数值有较大出入, 可能是同样原因造成, 或者系不同样品三重简并点离费米面距离不一样所致.

3 实验结果和讨论

为了验证实验装置的可靠性, 首先利用上述实验装置对拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 进行光电流探测实验, 成功观测到了对偏振依赖的光电流信号 (图 3). 图 3(a) 为光电流实验的示意图, α 为激光入射方向与样品表面法线的夹角, θ 为 $\lambda/4$ 波片旋转的角度,

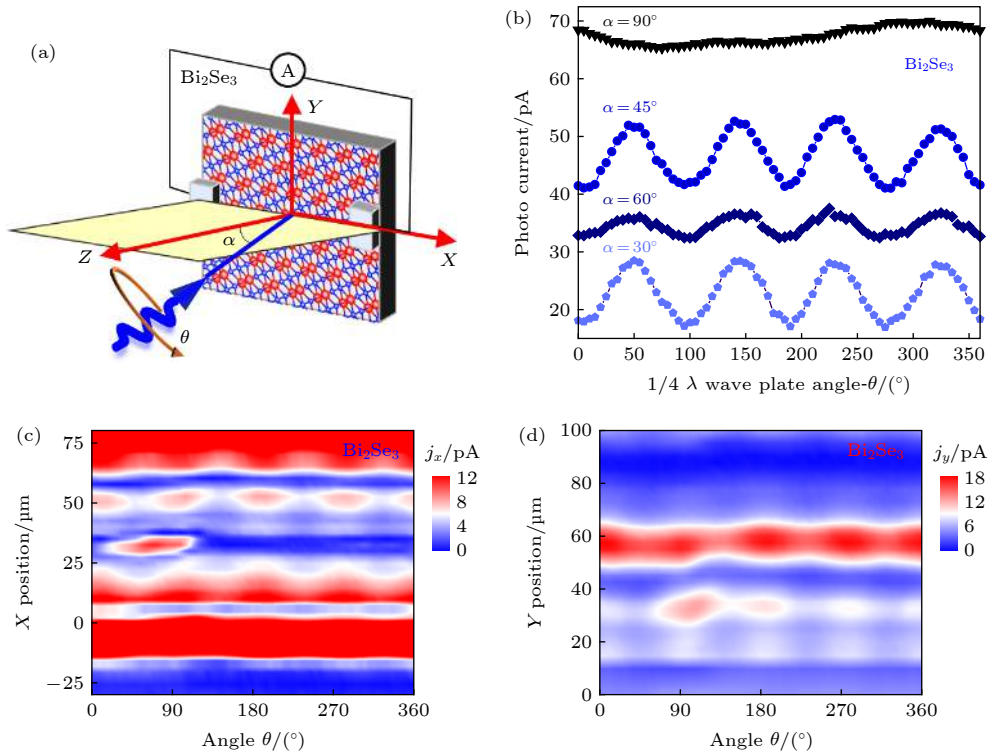


图 3 (a) 光电流实验示意图; (b) 不同入射角情形下 Bi_2Se_3 样品的光电流强度对激发光圆偏振度的依赖关系 (有 offset); (c) 光 45° 入射 Bi_2Se_3 样品情形下, 扫描 X 方向位置, 光电流强度对偏振的依赖关系图; (d) 光 45° 入射 Bi_2Se_3 样品情形下, 扫描 Y 方向位置, 光电流强度对偏振的依赖关系图

Fig. 3. (a) Schematic of the experimental geometry; (b) photocurrent intensity depending on the polarization of the laser beam under different incident angles, which is offset for clarity; (c) photocurrent intensity depending on the sample position along the X axis, where the incident angle of ultrafast pulses is 45° ; (d) photocurrent intensity depending on the sample position along the Y axis, with 45° incidence angle.

样品表面标记为 XY 平面. 图 3(b) 为不同 α 角度下光电流随 $\lambda/4$ 波片旋转角度的变化, 采用中心波长为 800 nm 的激光脉冲, 入射光斑相对于样品的位置 (对应图 3(a) 坐标) 为 (0 μm , 30 μm). 从图 3 可以看到, 其光电流随 θ 改变呈周期性变化, 说明光电流的强度受到了激发光偏振类型的周期性调制. 图 3(c), (d) 为激发光在 45° 入射下, 激光在 X 和 Y 方向的不同位置的光电流变化的彩图, 此图清楚地显示了不同位置下光电流受圆偏振周期性调制的特点, 从图 3(c), (d) 中可以看出, 在实验中探测到的电流由两部分组成, 一部分是与激光偏振类型无关, 仅与光斑位置有关的热电流; 另一部分是与激光偏振类型紧密相关的光电流. 本研究组的实验范式与国际上已经发表的工作相符, 观测到所测信号受到 $\lambda/4$ 波片调控 [32], 说明了实验方法的有效性. 本研究组实验报道了一种实验构型, 与文献 [32] 的图 2(b) 实验构型相符, 实验结果接近 (注: 文献 [32] 是 15 K 的实验结果, 本研究组的是室温结果), 与图 2(a),(c) 构型不同, 结果没有可比性. 在进行光电流实验及其所需样品与器件制备方面, 本研究组也积累了比较成熟的经验和技巧, 这为 MoP 的光电流实验探测提供了光学输运实验和样品器件制备两方面的基础.

接下来分别采用 800 和 400 nm 的激发光对 MoP 样品进行了类似的光电流实验. MoP 的晶体结构如图 4(a) 所示, 其空间群为 $P\bar{6}m2$, 具有 C_{3z} 旋转对称性和 M_y, M_z 两种镜像对称性 [5]. 图 4(a) 中, 紫色实心球为 P 原子, 位于 (0, 0, 0) 的顶点位置; 棕色实心球为 Mo 原子, 位于 (1/3, 2/3, 1/2) 的体内位置. 图 4(b) 为光激发样品时的空间位置示意图. 采用 800 nm 波长 (能量 1.55 eV) 和 400 nm 波长 (能量 3.1 eV) 的激光分别进行了光电流的实验, 其中入射角 $\alpha = 45^\circ$. 实验表明, 在 800 nm 激发下, 没有观察到光电流或热电流的信号; 在 400 nm 激发下, 观测到微弱的电流信号. 图 4(c) 中展示了该电流信号, 其中红色和蓝色小球分别代表在两个对称位置 P_1 和 P_2 处 (图 4(b)) 测得的电流强度, 作为对比同时展示了没有激光照射时的测量结果 (灰色小球). 在整个对比实验过程中, 实验室灯光是关闭的, 以剔除其他光源引起的电流效应. 图 4(c) 实验数据显示, 在没有激光照射下, 测量的均值为 0; 在有激光脉冲照射时, 在 P_1 和 P_2 两处测量到非零的电流信号 (红色和蓝色区域的中间深色横条为测量值的均值). 该电流信号是激光照射造成的样品电流, 我们认为是光照下样品表面形成了温度梯度, 进而引起的热电流, 理由有两点. 第一, 图 4(c) 的实验结果没有表现出电

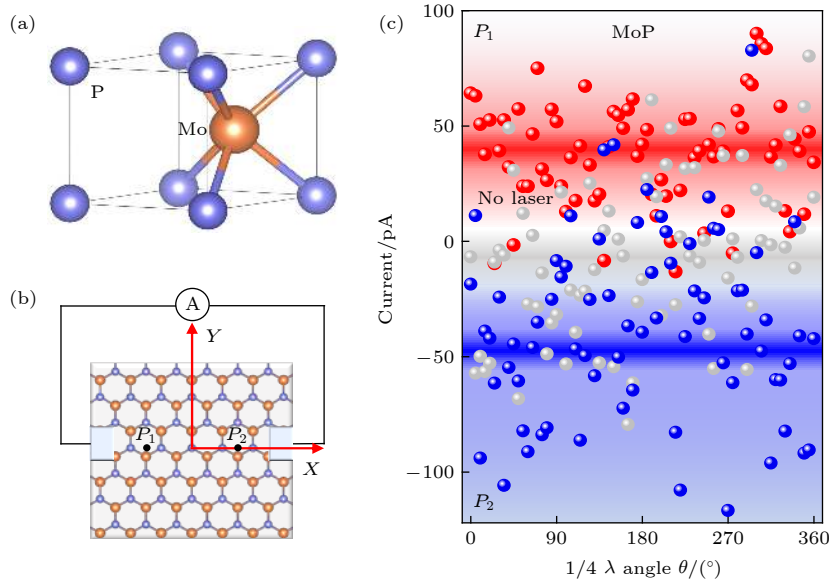


图 4 (a) MoP 样品的晶格结构示意图; (b) 光激发样品的光斑位置示意图; (c) 400 nm 超快激光照射 MoP 样品的 P_1 和 P_2 两个对称位置时, 分别测得的电流随偏振的依赖关系. 红色和蓝色代表 P_1 和 P_2 两个位置, 灰色为不加光照射时测得的电流

Fig. 4. (a) Schematic lattice structure of MoP, purple and brown spheres represent P and Mo atoms, respectively; (b) schematic diagram of the experiment illustrating the two photoexcitation positions on the sample; (c) polarization dependence of the current intensity at P_1 and P_2 under 400 nm light excitation. Solid dots in red and blue are current intensity data obtained at P_1 and P_2 , respectively. Gray dots donate the situation without any light excitation.

流信号对角度的依赖. 对图 4(c) 的数据进行傅里叶变换, 结果完全为噪声, 没有峰值迹象, 在目前实验噪声水平上可以确认没有角度依赖. 这与图 3(b) 的周期性实验结果不同, 说明没有观测到光电流的典型特征. 第二, 在 P_1 和 P_2 两处对称位置测得的电流信号绝对值相同, 方向相反, 这是热电流的典型特征.

分析在实验中未能在 MoP 单晶中观测到偏振依赖类型的光电流可能的原因有: 1) 虽然能量匹配, 但是其中只有很小一部分是直接或间接激发了三重简并点附近的电子, 在这一小部分电子中可能有一部分在室温下失去了拓扑特性, 剩余的部分自旋还受扩散等因素影响使得自旋寿命为有限, 最终的效果是使得探测光电流很具挑战性; 2) 电极制作技术不够精密, 接触电阻太大, 使得信号被淹没在背底之中, 但从较为成功的 Bi_2Se_3 对比实验看来, 这方面的影响并不是决定性的; 3) MoP 的表面存在杂质或者已经氧化; 4) 在该体系中, 外尔锥或三重简并锥不够倾斜, 不同的外尔锥附近的光激发载流子产生的电流相互抵消, 总的净电流为 0. 针对以上可能的原因, 为了进一步探测该体系中的光电流响应, 对于实验的方案进行了改进, 包括: 1) 选取更为合适的激发波长, 例如中远红外、THz 波段等, 但此方法面临拓扑量子态深埋于费米面以下等挑战; 2) 对样品电极制备进行更为精密的微加工处理, 进一步减小接触电阻; 3) 对样品表面进行抛光处理, 必要情况下尝试进行原位生长测量; 4) 增加对样品的外场调控, 诸如磁场、应力场等.

4 结 论

本研究组设计并搭建了超快圆偏振激光调控光电流的实验装置, 并成功在拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 中观测到了随 $\lambda/4$ 波片角度依赖的周期性变化的光电流信号, 说明实验装置的有效性和可靠性. 进一步对拓扑半金属 MoP 进行了光电流实验的初步探索, 在 400 nm 激光照射下明确地探测到了热电流信号, 为下一步在 MoP 中产生和调制光电流信号提供了重要的实验基础, 也为研究普遍的拓扑量子材料的光电流效应提供了更为广阔的空间.

参考文献

- [1] Armitage N P, Mele E J, Vishwanath A 2018 *Rev. Mod. Phys.* **90** 015001
- [2] Wan X G, Turner A M, Vishwanath A, Savrasov S Y 2011 *Phys. Rev. B* **83** 205101
- [3] Huang X C, Zhao L X, Long Y J, Wang P P, Chen D, Yang Z H, Liang H, Xue M Q, Weng H M, Fang Z, Dai X, Chen G F 2015 *Phys. Rev. X* **5** 031023
- [4] Bradlyn B, Cano J, Wang Z J, Vergniory M G, Felser C, Cava R J, Bernevig B A 2016 *Science* **353** 6299
- [5] Lü B Q, Feng Z L, Xu Q N, Gao X, Ma J Z, Kong L Y, Richard P, Huang Y B, Strocov V N, Fang C, Weng H M, Shi Y G, Qian T, Ding H 2017 *Nature* **546** 627
- [6] Chi Z H, Chen X L, An C, et al. 2018 *npj. Quantum. Materials* **3** 28
- [7] Zhu Z M, Winkler G W, Wu Q S, Li J, Soluyanov A A 2016 *Phys. Rev. X* **6** 031003
- [8] Tian Y C, Zhang W H, Li F S, Wu Y L, Wu Q, Sun F, Zhou G Y, Wang L L, Ma X C, Xue Q K, Zhao J M 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 107001
- [9] Wu Q, Zhou H X, Wu Y L, Hu L L, Ni S L, Tian Y C, Sun F, Zhou F, Dong X L, Zhao Z X, Zhao J M 2020 *Chin. Phys. Lett. (Express Letter)* **37** 097802
- [10] Toda Y, Kawanokami F, Kurosawa T, et al. 2014 *Phys. Rev. B* **90** 094513
- [11] Cao N, Long Y B, Zhang Z G, Gao L J, Yuan J, Zhao B R, Zhao S P, Yang Q S, Zhao J M, Fu P M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2543 (in Chinese) [曹宁, 龙拥兵, 张治国, 高丽娟, 袁洁, 赵伯儒, 赵士平, 杨乾生, 赵继民, 傅盘铭 2008 *物理学报* **57** 2543]
- [12] Wu Y L, Yin X, Hasaien J, Ding Y, Zhao J M 2020 *Chin. Phys. Lett. (Express Letter)* **37** 047801
- [13] Hu L L, Yang M, Wu Y L, Wu Q, Zhao H, Sun F, Wang W, He R, He S L, Zhang H, Huang R J, Li L F, Shi Y G, Zhao J M 2019 *Phys. Rev. B* **99** 094307
- [14] Hsieh D, Mahmood F, Torchinsky D H, Cao G, Gedik N 2012 *Phys. Rev. B* **86** 035128
- [15] Sun F, Yang M, Yang M W, Wu Q, Zhao H, Ye X, Shi Y G, Zhao J M 2018 *Chin. Phys. Lett.* **35** 116301
- [16] Sun F, Wu Q, Wu Y L, Zhao H, Yi C J, Tian Y C, Liu H W, Shi Y G, Ding H, Dai X, Richard P, Zhao J M 2017 *Phys. Rev. B* **95** 235108
- [17] Wang M C, Qiao S, Jiang Z, Luo S N, Qi J 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 036601
- [18] Aku-Leh C, Zhao J M, Merlin R, Menéndez J, Cardona M 2005 *Phys. Rev. B* **71** 205211
- [19] Bragas A V, Aku-Leh C, Costantino S, Ingale A, Zhao J M, Merlin R 2004 *Phys. Rev. B* **69** 205306
- [20] Wu Y L, Wu Q, Sun F, Cheng C, Meng S, Zhao J M 2015 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **112** 11800
- [21] Wu R, Zhang Y L, Yan S C, Bian F, Wang W L, Bai X D, Lu X H, Zhao J M 2011 *Nano Lett.* **11** 5159
- [22] Hu L L, Sun F, Zhao H, Zhao J M 2019 *Opt. Lett.* **44** 5214
- [23] Wu Y L, Zhu L L, Wu Q, et al. 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 241110
- [24] Wang W H, Wu Y L, Wu Q, Hua J J, Zhao J M 2016 *Sci. Rep.* **6** 107001
- [25] Tian Y C, Tian H, Wu Y L, Zhu L L, Tao L Q, Zhang W, Shu Y, Xie D, Yang Y, Wei Z Y, Lu X H, Ren T L, Shih C K, Zhao J M 2015 *Sci. Rep.* **5** 10582
- [26] Zhao J M, Bragas A V, Lockwood D J, Merlin R 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 107203
- [27] Zhao J M, Bragas A V, Merlin R, Lockwood D J 2006 *Phys. Rev. B* **73** 184434
- [28] Chan C K, Lindner N H, Refael G, Lee P A 2017 *Phys. Rev. B* **95** 041104

- [29] Morimoto T, Zhong S D, Orenstein J, Moore J E 2016 *Phys. Rev. B* **94** 245121
- [30] Juan F D, Grushin A G, Morimoto T, Moore J E 2017 *Nat. Commun.* **8** 15995
- [31] Morimoto T, Nagaosa N 2016 *Sci. Adv.* **2** e1501524
- [32] McIver J W, Hsieh D, Steinberg H, Herrero P J, Gedik N 2012 *Nat. Nanotech.* **7** 96
- [33] Ma Q, Xu S Y, Chan C K, Zhang C L, Chang G Q, Lin Y X, Xie W W, Palacios T, Lin H, Jia S, Lee P A, Herrero P J, Gedik N 2017 *Nat. Phys.* **13** 842
- [34] Ma J C, Gu Q Q, Liu Y N, Lai J W, Yu P, Zhuo X, Liu Z, Chen J H, Feng J, Sun D 2019 *Nat. Mater.* **18** 476
- [35] Kumar N, Sun Y, Nicklas M, et al. 2019 *Nat. Commun.* **10** 2475

SPECIAL TOPIC—Terahertz spintronic optoelectronics

Generation and control of photo-excited thermal currents in triple degenerate topological semimetal MoP with circularly polarized ultrafast light pulses*

Jiazila Hasaien^{1)2)#} Zhu Ke-Jia^{1)2)#} Sun Fei¹⁾²⁾ Wu Yan-Ling¹⁾
 Shi You-Guo¹⁾³⁾ Zhao Ji-Min^{1)2)3)†}

1) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China*)

(Received 6 January 2020; revised manuscript received 6 April 2020)

Abstract

Ultrafast spectroscopy is a powerful method to generate and control topological phase transitions and spin-polarized electrical currents in topological quantum materials. These light-induced novel physical properties originate from the topologically nontrivial states of Dirac and Weyl fermions. The topological semimetal molybdenum phosphide (MoP) exhibits double and triple degenerate points in the momentum space. We present the preliminary results of spin-polarized electrical currents and optical response investigations of MoP. We design and construct an experimental setup to perform the photocurrent generation and control by circularly polarized light in topological insulator Bi₂Se₃. The results compare well with those reported, which confirms the validity and reliability of our experimental setup. Further, we conduct the photocurrent experiment on MoP by using 400 nm laser pulses for excitation and successfully detect the current signals at different sample positions. We attribute the observed currents to photo-induced thermal currents (not the photo current associated with the triple degenerate topological properties), which facilitates generating and controlling photocurrents in MoP in the future investigation. Our thermal current investigations are of essence for further exploring the photocurrents in various types of topological quantum materials.

Keywords: photocurrent, triple degenerate topological material, ultrafast spectroscopy, spin polarization

PACS: 78.47.J-, 03.65.Vf, 78.20.Ek, 78.20.nb

DOI: 10.7498/aps.69.20200031

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2017YFA0303603, 2016YFA0300303, 2017YFA0302901), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11574383, 11774408, 11774399), the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. XDB30000000), the International Partnership Program of CAS (Grant No. GJHZ1826), the Beijing Natural Science Foundation, China (Grant No. 4191003), and the CAS Interdisciplinary Innovation Team.

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: jmzhao@iphy.ac.cn