

碲烯中的本征线偏振光电流与光导效应的机制分离

周 锐, 马 惠

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2026年5月6日; 录用日期: 2026年7月27日; 发布日期: 2026年8月4日

摘 要

碲烯(Te)具有手性结构和D3点群对称性, 其价带顶附近的Weyl锥为研究非线性光电流效应提供了理想平台。在低对称性材料中, 光电流通常来源于本征线偏振光电流(LPGE)与光导效应的共存, 但如何有效区分两者沿不同晶向的贡献仍是当前难点。本研究采用非对称电极设计, 在碲烯器件中独立激发和测量沿a轴与c轴的线偏振光电流, 通过系统考察零偏压与有偏压、低温与室温下的响应, 建立了偏压依赖性、栅压响应特性和温度敏感性三个独立判据。实验发现: 零偏压下LPGE在费米能级位于价带顶时最强; 有偏压时纵向配置为LPGE与光导效应叠加, 横向配置以光导效应为主, 其栅压不对称性源于光吸收各向异性; 温度对比进一步验证了光导效应的强温度敏感性。本研究为低对称性拓扑材料中光电流机制的解析提供了实验范式。

关键词

碲烯, 光导效应, 本征线偏振光电流, 各向异性, Weyl锥

Separation of Intrinsic Linear Photogalvanic Effect and Photoconductive Effect in Tellurene

Rui Zhou, Hui Ma

School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Received: May 6, 2026; accepted: July 27, 2026; published: August 4, 2026

Abstract

Tellurene (Te) possesses a chiral structure with D3 point group symmetry, and its Weyl cones near

文章引用: 周锐, 马惠. 碲烯中的本征线偏振光电流与光导效应的机制分离[J]. 凝聚态物理学进展, 2026, 15(3): 41-50.
DOI: 10.12677/cmp.2026.153005

the valence band maximum provide an ideal platform for investigating nonlinear photocurrent effects. In low-symmetry materials, photocurrents typically originate from the coexistence of intrinsic linear photogalvanic effect (LPGE) and photoconductive effects, yet effectively distinguishing their contributions along different crystal orientations remains a challenge. In this study, an asymmetric electrode design is employed to independently excite and measure linear photogalvanic currents along the *a*-axis and *c*-axis in tellurene devices. By systematically examining responses at zero bias and with applied bias, as well as at low temperature and room temperature, three independent criteria are established: bias dependence, gate voltage response characteristics, and temperature sensitivity. Experimental results show that under zero bias, LPGE is strongest when the Fermi level lies at the valence band maximum. With applied bias, the longitudinal configuration combines LPGE and photoconductive effects, while the transverse configuration is dominated by photoconductive effects, with its gate asymmetry originating from anisotropic light absorption. Temperature-dependent measurements further confirm the strong temperature sensitivity of photoconductive effects. This study provides an experimental paradigm for analyzing photocurrent mechanisms in low-symmetry topological materials.

Keywords

Tellurene, Photoconductive Effect, Linear Photogalvanic Effect, Anisotropy, Weyl Cones

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

非中心对称材料中的光电流效应因其在新型光电探测器、自旋电子学及拓扑光子学中的潜在应用而备受关注[1]-[3]。当材料同时具备低晶体对称性和拓扑能带结构时,光与物质的相互作用可产生多种非线性光电响应,其中最具代表性的是本征线偏振光电流(LPGE)和光导效应[4][5]。LPGE源于二阶非线性光学过程,无需外加偏压,直接由偏振光激发产生定向电流;而光导效应则依赖外加电场对光生载流子的漂移驱动,其偏振各向异性通常来自迁移率或光吸收的各向异性。两者在实验中往往共存,且沿不同晶向的相对贡献可能截然不同,但如何系统分离并独立表征它们,一直是凝聚态光电研究中的难点[6][7]。

碲烯(Te)作为一种新兴的二维拓扑材料,理论预言其价带顶附近存在 Weyl 锥,且由于缺乏反演对称性,该体系允许 LPGE 和光导效应同时出现[8]。然而,已有实验多集中于单一方向的光电流测量,缺乏对纵向和横向配置的系统对比,也未建立基于栅压、电场极性和温度调控的机制分离判据[9]。此外,LPGE 与光导效应对费米能级位置的依赖是否存在本质差异,以及不同偏振分量的响应规律如何,这些问题尚未得到清晰解答[10]。

为此,本研究在水热法合成的碲烯薄片上制备非对称四电极器件,实现了沿 *a* 轴与 *c* 轴的独立电学激发与光电探测。通过对比零偏压与有偏压、低温与室温、纵向与横向配置下的线偏振光电流,系统分析 S_1 、 S_2 随栅压、电场及温度的变化。结果表明:零偏压下栅压响应呈现纯 LPGE 行为,信号在费米能级位于价带顶时最强;有偏压下纵向配置为 LPGE 与光导效应叠加,横向配置以光导效应为主,其栅压不对称性源于光吸收各向异性而非迁移率。据此归纳出偏压依赖性、栅压响应及温度敏感性三个独立判据。上述发现阐明了碲烯各向异性光电响应的物理起源,并与其他低对称性拓扑材料中混合光电流的解耦提供了可推广的实验方法。

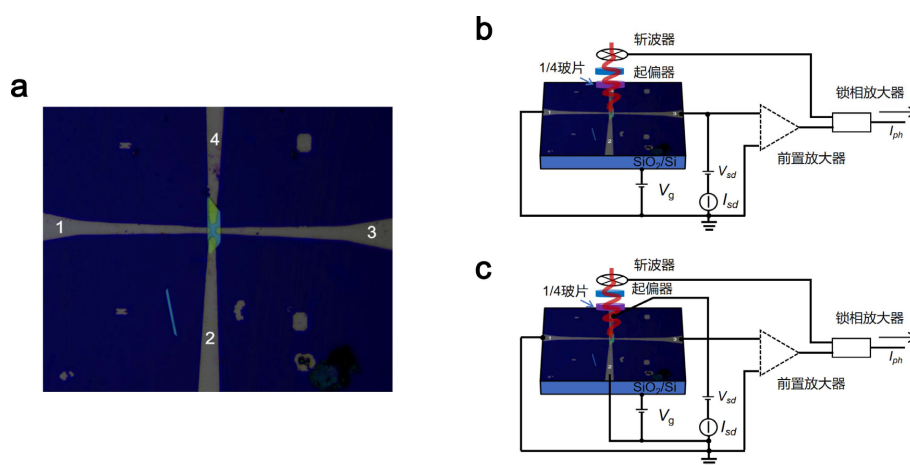
2. 实验方法

2.1. 碲烯薄片的合成

碲烯薄片采用水热法合成。我们在室温磁力搅拌下, 依次将 1 克聚乙烯吡咯烷酮(PVP, 分子量 58 K) 和 0.2 克亚碲酸钠(Na_2TeO_3 , 纯度 99.9%)溶解于 66 毫升去离子水中。随后, 依次向溶液中加入 4.4 毫升氨水溶液(25 wt%)和 1.24 毫升水合肼(85 wt%)。将混合溶液转移至聚四氟乙烯内衬的不锈钢高压反应釜中, 密封后于 180°C 加热 30 小时。反应结束后, 使反应釜自然冷却至室温。最终通过离心分离(4000 转/分钟, 8 分钟)收集固体产物, 并用去离子水洗涤 3~6 次。所得最终产物分散于乙醇中, 以备后续器件制备使用。

2.2. 器件制备

将合成的碲烯薄片通过滴管滴加到覆盖有 285 nm SiO_2 的重掺杂硅衬底上(硅衬底作为全局背栅电极)。采用有掩膜紫外光刻和热蒸镀工艺制备电极: 电极 1 和 3 沿短轴(a 轴)方向排列, 间距 $5\ \mu\text{m}$; 电极 2 和 4 沿长轴(c 轴)方向排列, 间距 $5\ \mu\text{m}$ 。电极材料为 Cr/Au (5 nm/35 nm), 蒸镀后经快速热退火(150°C , 真空, 30 分钟)改善接触。器件结构示意图类似见图 1。



(a) 碲烯器件的光学显微图像; (b) 纵向配置; (c) 横向配置。

Figure 1. Optical image of the device and schematic diagram of the experimental setup

图 1. 器件光学图像及实验测试示意图

2.3. 光电测量系统

光电流测量采用波长为 1064 nm 的半导体激光二极管进行光激发。激光束通过 100 倍物镜(Mitutoyo Plan Apo NIR, 数值孔径 0.50)聚焦到样品表面。光斑尺寸为 $2\ \mu\text{m}$, 偏振态通过旋转四分之一波片(QWP)调制, 波片旋转角度从 0° 到 360° 以步长 5° 扫描。测量时, 源漏电压 V_{sd} 由 Keithley 2450 源表施加, 栅压 V_g 由 Keithley 2400 源表提供, 交流光电导测量的激发光由 88 Hz 的光学斩波器调制, 光电导信号经差分输入前置放大器放大后, 采用标准锁相检测技术进行测量。

3. 线偏振光电流物理机制分析

3.1. 数据拟合方法

实测光电流 $I_{ph}(x)$ (x 为波片旋转角度, 单位: 度)采用以下函数拟合:

$$I_{ph}(x) = S_1 \cos\left(4x \cdot \frac{\pi}{180}\right) + S_2 \sin\left(4x \cdot \frac{\pi}{180}\right) + S_3 \sin\left(2x \cdot \frac{\pi}{180}\right) + S_0 \quad (1)$$

其中 S_0 为偏振无关背景电流, S_1 和 S_2 为线偏振光电流系数, S_3 为圆偏振光电流系数。本研究主要关注线偏振光电流, 故重点分析 S_1 和 S_2 。

3.2. 光导效应

光生载流子在外加电场下沿 a 轴漂移, 其偏振依赖于各向异性的光吸收或载流子迁移率。光导贡献的光电流可表示为:

$$J_i^{PC} = \sigma_{ij}(V_{sd}) \cdot G_j(\theta) \cdot \tau_{scat} \quad (2)$$

其中 J_i^{PC} 为光导效应贡献的光电流密度矢量; σ_{ij} 为电导率张量; $G_j(\theta)$ 为偏振依赖的光生载流子产生率; τ 为载流子散射寿命。

3.3. 本征线偏振光电流效应(LPGE)

LPGE 是一种二阶非线性光学效应, 无需外加偏压, 由晶体对称性允许的带间跃迁直接产生。其电流密度可写为:

$$J_i^{LPGE} = \chi_{ijk}(\omega) E_j(\omega) E_k^*(\omega) \quad (3)$$

其中 J_i^{LPGE} 为 LPGE 贡献的光电流密度矢量; χ_{ijk} 为二阶非线性光电张量; E_j 入射光电场矢量的第 j 分量; E_k^* 为入射光电场矢量的第 k 分量的复共轭; $\chi_{ijk} E_j E_k^*$ 表示所有电场分量组合对光电流的贡献。

3.4. 对称性分析与二阶光电张量

Te 晶体的三角晶格属于手性点群 D3, 其空间群为 P3221 和 P3121。该点群缺乏反演对称性和镜面对称性, 但具有绕 c 轴的三重旋转轴(C3)以及垂直于 c 轴的二重旋转轴(C2')。基于此对称性, 可以分析二阶非线性光电张量 χ_{ijk} (对下标 j, k 对称)的非零独立分量。

根据 D3 点群的对称性约束, 独立的二阶非线性光学系数分量包括 χ_{111} , χ_{122} , χ_{212} (其中 1 对应 a 轴, 2 对应 c 轴, 3 对应法线方向) [11]。在实验几何配置下, 沿 a 轴吸收的光电流可表示为:

$$I_a = \chi_{111} E_a^2 + \chi_{122} E_c^2 + \chi_{212} E_a E_c \quad (4)$$

其中 $E_a = E_0 \sin \varphi$, $E_c = E_0 \cos \varphi$, φ 为偏振方向与 c 轴的夹角。带入后得到光电流随偏振角度的依赖函数:

$$I_a(\varphi) = \chi_{122} E_0^2 + (\chi_{111} - \chi_{122}) E_0^2 \sin^2 \varphi + \chi_{212} E_0^2 \sin \varphi \cos \varphi \quad (5)$$

展开后可得 $\cos 4\varphi$ 和 $\sin 4\varphi$ 项, 其系数 S_1 和 S_2 与独立张量分量的关系为:

$$S_1 \propto (\chi_{111} - \chi_{122}), S_2 \propto \chi_{212} \quad (6)$$

因此, 实验中测得的 S_1 和 S_2 分别反映了不同二阶光电张量分量的贡献, 两者独立且符号相反的关系源于 D3 点群的对称性约束。该分析为理解纵向与横向配置下 S_1 、 S_2 的不同行为提供了理论依据。

对于圆偏振光电流(S_3 系数), 圆偏振光电流(CPGE)源于光子角动量向电子的转移, 在非中心对称材料中与贝里曲率密切相关[12] [13]。Ma 等人[12]在中红外波段观察到碲中的 CPGE 随波长反转符号, 并将其归因于 Weyl 锥内跃迁与跨带隙 Weyl 锥间跃迁的不同手性选择定则。de Juan 等人[13]进一步提出, Weyl 点附近的贝里曲率奇点导致 CPGE 注入贡献的量子化特征。在本工作中, 1064 nm 激发波长下, S_3 信号与线偏振分量相比较弱, 这可能是由于该波长偏离了 Weyl 锥间共振跃迁的最佳条件。

4. 讨论

4.1. 横向与纵向线偏振光电流的机制分离

定义两种测量配置：横向配置：施加电流 V_{24} 沿 c 轴，光电流沿 a 轴；纵向配置：短轴施加电流 V_{13} ，同时测量短轴光电流。转移特性曲线图 2 说明该器件为 p 型掺杂，零栅压时费米能级位于价带顶附近，有利于利用价带 Weyl 锥的拓扑特性。所有光电流测量均采用波长为 1064 nm 的激光，偏振态通过四分之一波片调制，并聚焦于碲烯薄片的中心区域。除特别说明外，所有测试均在 85 K 下进行，以抑制热激发载流子干扰并确保能带结构锐利。

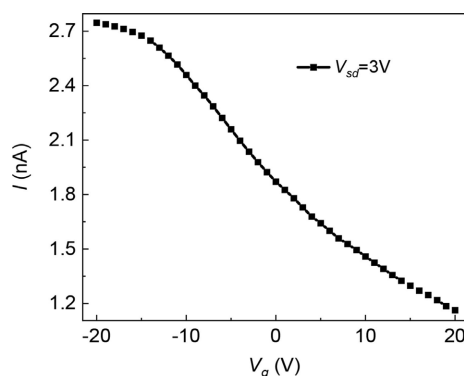
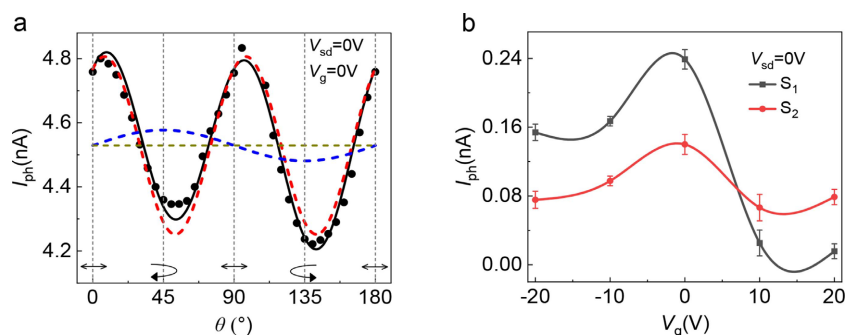


Figure 2. Transfer characteristics of tellurene
图 2. 碲烯的转移特性曲线

4.2. 零偏压下的栅压依赖：本征 LPGE 行为

首先测量无外加偏压 ($V_{sd} = 0$) 时，短轴方向光电流的 S_1 , S_2 随栅压 V_g 的变化，结果如图 3 所示。发现 S_1 与 S_2 均为正值，且在 $V_g = 0$ 处取得最大值；当 $|V_g|$ 增大时，两者单调减小，但符号始终保持正。该现象揭示了 LPGE 的纯粹行为。LPGE 是一种二阶非线性光学效应，其强度正比于联合态密度(JDOS) [14] [15]。零栅压时，器件为 p 型掺杂，费米能级恰好位于价带 Weyl 锥节点附近，JDOS 最大，故信号最强。栅压偏离零点使费米能级远离节点，JDOS 下降，LPGE 减弱。符号不随 V_g 变化表明该测量方向下跃迁矩阵元的相位关系固定。

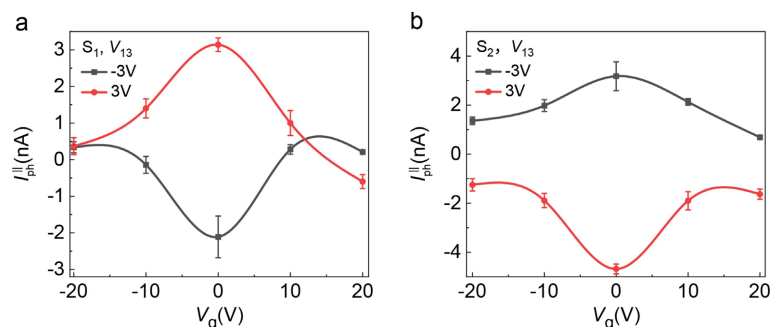


(a) 光电流 I_{ph} 随偏振角 θ 的变化关系。在激光垂直入射即功率为 350 uW 时如图所示，黑色实心圆为实验数据，黑色曲线为 I_{ph} 通过式(1)的拟合曲线，红色、蓝色和绿色虚线分别为线偏振、圆偏振和非偏振光电流随偏振角度的变化关系。(b) 从图(a)中提取出来的线偏振光电流随栅压的变化关系。

Figure 3. Gate-Tunable intrinsic LPGE
图 3. 本征 LPGE 的栅压依赖性

4.3. 有偏压下的栅压依赖：光导效应的介入

图 4 和图 5 展示了固定面内电场 $V_{sd} = \pm 3$ V, 测量 S_1 与 S_2 随栅极电压 V_g 的变化, 揭示了两种光电流对静电掺杂的不同响应行为。纵向配置(如图 4): S_1 和 S_2 的幅值在 $V_g = 0$ V 处达到最大, 与零偏压情况对比, 有偏压时符号相反, 说明光导效应贡献了符号相反的偏振分量。光导效应源于偏压驱动光生载流子漂移, 其偏振依赖来自各向异性的迁移率或光吸收[16][17]。施加偏压后, 线偏振光电流来源于本征 LPGE 和光导效应的线性叠加。在零栅压处, 载流子浓度和迁移率各向异性均最大, 光导效应亦最强, 与 LPGE 叠加后总信号取极大值。栅压偏离零点时, 两种贡献同步衰减, 但因光导效应幅值在本实验条件下始终大于本征 LPGE, 其符号反转特性主导了总信号的符号, 使得 S_1 与 S_2 保持反号。

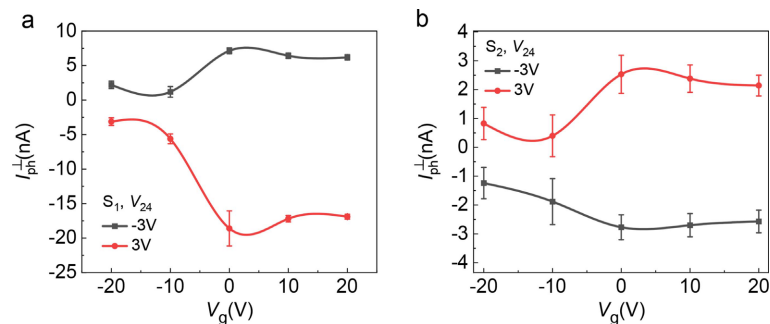


S_1 (a) 和 S_2 (b) 在不同偏置条件下随栅压的变化关系。

Figure 4. Gate dependence in the biased longitudinal configuration

图 4. 纵向配置下有偏压的栅压依赖性

横向配置(如图 5): 横向 S_1 和 S_2 同样在 $V_g = 0$ V 处出现极值, 且随 V_{24} 极性反转而符号反转。相同电场下, 横向 S_1 和 S_2 极性始终相反。 $V_g < 0$ V 时, 横向信号的栅压响应更为陡峭; 而 $V_g > 0$ V 时, 横向信号相对平缓。在横向配置下, 光电流以光导效应为主导, 因为 LPGE 在横向配置下张量元很小, 见 4.4 小节中横向线偏振信号比纵向高一个数量级, 说明 LPGE 贡献可忽略。对于栅压响应不对称, 因为负栅压使费米能级深入价带, 能带斜率减小, 沿 c 轴的光吸收偏振调制深度迅速退化, 同时高浓度载流子增强俄歇复合, 有效寿命下降, 导致光导效应急剧衰减。正栅压使费米能级向带隙移动, 空穴浓度指数下降, 但光吸收各向异性保持较好, 故衰减较缓。这一现象揭示了光导效应中偏振依赖项对能带填充的强烈敏感性。



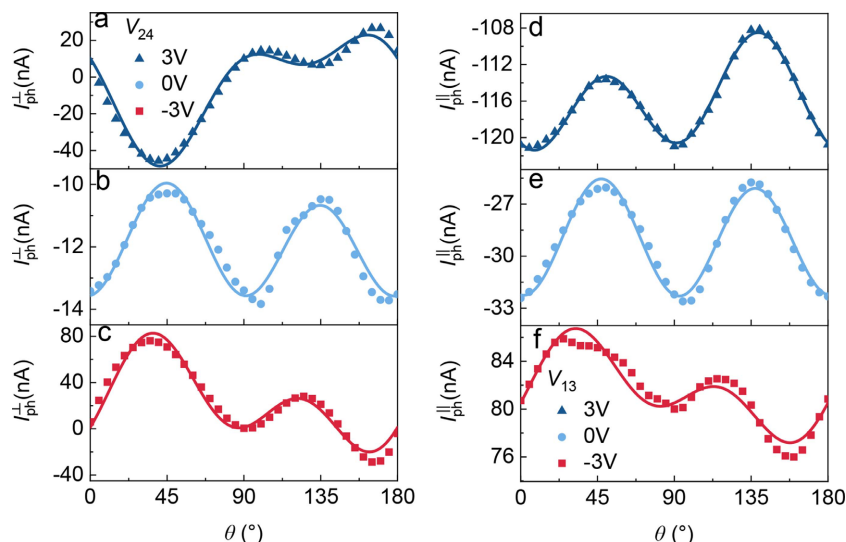
S_1 (a) 和 S_2 (b) 在不同偏置电压下随栅压的变化关系。

Figure 5. Gate dependence in the biased transverse configuration

图 5. 横向配置下有偏压的栅压依赖性

4.4. 零栅压下的面内电场的依赖关系

图 6 所示, 零栅压条件下, 我们测量了横向与纵向偏振依赖的光电流与面内电场的关系。通过公式 (1) 拟合得到线偏振光电流系数 S_1 和 S_2 , 其随面内电场 V_{sd} 的变化关系绘于图 7。纵向与横向的 S_1 , S_2 呈现相同规律: ① 随 V_{sd} 极性反转而符号反转; ② S_1 与 S_2 始终反号; ③ 横向信号幅值比纵向高约一个数量级。

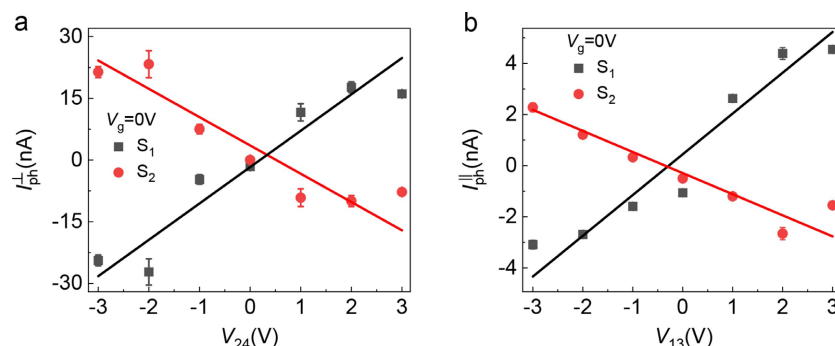


(a)~(c)在偏压 V_{24} 分别为 3 V、-3 V 和 0 V 时横向光电流的偏振依赖关系; (d)~(f)在偏压 V_{13} 分别为 3 V、-3 V 和 0 V 时纵向光电流的偏振依赖关系。

Figure 6. Modulation of polarization-dependent photocurrents by in-plane electric fields at zero gate voltage

图 6. 零栅压下面内电场对横向与纵向偏振依赖光电流的调制

为了解释横向与纵向光导效应幅值约一个数量级的差异, 根据以前报道的碲烯偏振拉曼光谱以及第一性原理计算表明[18] [19], 其沿 c 轴的吸收效率约为 a 轴的 8~10 倍。在我们器件中, 线偏振光电流斜率比值 $K_{S1}^{\perp}/K_{S1}^{\parallel} (K_{S2}^{\perp}/K_{S2}^{\parallel})$ (取 $V_g = 0$ V 时) 分别为 14.4 和 8.2 倍, 与文献中吸收各向异性量级一致。因此, 我们推断横向光导效应更强是由于沿 c 轴偏振的光吸收效率显著高于沿 a 轴偏振。



横向(a)和纵向(b)的 S_1 、 S_2 随偏压的变化关系。

Figure 7. Modulation of S_1 and S_2 by in-plane electric fields at zero gate voltage

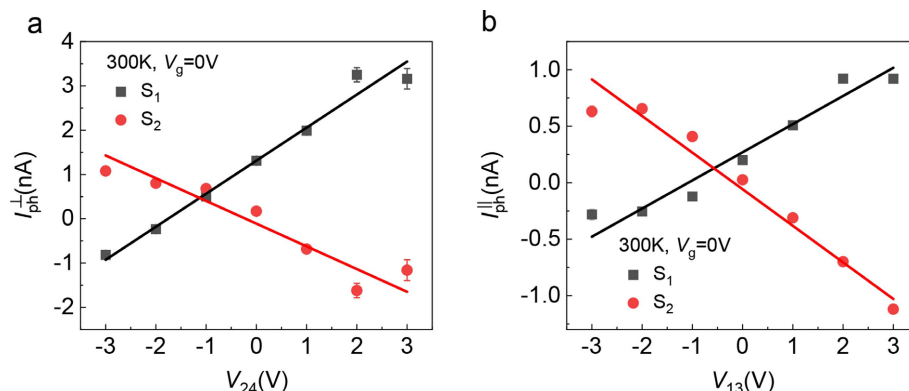
图 7. 零栅压下面内电场对 S_1 、 S_2 的调控

这些特征完全符合光导效应的主导作用。符号随偏压反转是漂移电流的本质属性；横向信号更强反映了碲晶体沿 c 轴的迁移率及光吸收效率远高于 a 轴，因此 c 轴电场驱动的横向漂移电流显著。纵向信号较弱说明沿 a 轴的光导效应本身效率较低。注意，在零栅压处本征 LPGE 虽强，但其贡献远小于光导效应。

4.5. 温度依赖：区分光导效应与 LPGE 的关键

图 8 展示了温度变化对横向与纵向线偏振光电流的影响。如图 7 所示，在室温(300 K)、零栅压条件下， S_1 与 S_2 的电场依赖趋势与 85 K 低温时的观测结果完全一致，表明温度并未改变线偏振光电流的基本电场依赖行为。但温度对两种配置下信号幅值的衰减程度存在显著差异。从 85 K 升至 300 K，横向 S_1 和 S_2 的幅值衰减约一个数量级，且 S_1 相对于面内电场没有发生完全的极性反转。而纵向 S_1 衰减约一个数量级， S_2 仅衰减约一半。

这一温度依赖差异的物理根源在于两种配置的主导机制不同。与光导效应相比，本征线偏振光电流(LPGE)具有显著的温度稳定性。这源于两者物理机制的差异：光导效应依赖温度的载流子输运过程(迁移率、寿命)，而 LPGE 由二阶非线性光电张量 χ_{ijk} 主导，其强度主要取决于 JDOS，对温度变化相对不敏感[15]。温度升高增强声子散射，迁移率普遍下降[20]。横向配置以光导效应为主，故大幅衰减(10 倍)。纵向信号中， S_2 的弱温度依赖表明其以本征 LPGE 贡献为主，而 S_1 仍以光导效应为主，故衰减显著。室温下横向光导效应已非常弱，在低偏压(-1 V)时，光导效应贡献的负 S_1 小于本征 LPGE (零偏压下 $S_1 > 0$) 的正贡献，导致净值为正；而更高偏压下光导效应占优，净值为负。这直接验证了室温下光导效应大幅削弱，LPGE 的相对贡献得以显现。



横向(a)和纵向(b)的 S_1 、 S_2 随偏压的变化关系。

Figure 8. In-Plane electric field modulation at room temperature

图 8. 室温下的面内电场调控

4.6. 与已有工作的对比及本工作的新颖性

已有研究表明，碲烯及其同族材料(如硒、锑烯)具有手性结构和拓扑非平庸的 Weyl 锥[21]。与传统的 LPGE 研究相比，本工作在碲烯器件中通过电极非对称设计(沿 a 轴和 c 轴分别激发和测量)实现了横向与纵向光电流的独立表征，并利用电场极性反转、栅压调制和温度依赖性三大判据，明确区分了光导效应与本征 LPGE 的主导区域。特别是，我们发现的横向与纵向信号对温度的不同响应为两种机制的分离提供了定量依据，这在以往的拓扑材料光电研究中鲜有报道。这一方法为其他低对称性拓扑材料(如 WTe_2 、 TaIrTe_4)中混合光电效应的解耦提供了通用策略[22]-[25]。

5. 总结

本研究通过零偏压与有偏压、低温与室温、纵向与横向配置的系统对比, 明确了碲烯中线偏振光电流的物理机制。零偏压下 S_1 和 S_2 在 $V_g=0$ 处最大且符号恒定, 表明本征线偏振光电流(LPGE)由联合态密度主导, 费米能级位于价带顶时最强。有偏压时, 纵向配置为 LPGE 与光导效应的叠加, S_1 和 S_2 符号相反; 横向配置以光导效应为主, 其栅压响应的不对称性(负栅压衰减更陡峭)源于光吸收各向异性而非迁移率。电场依赖关系符合光导效应典型特征: 符号随偏压反转、低场斜率大、高场饱和, 且横向信号比纵向高一个数量级。温度对比进一步区分两种机制: 横向(光导效应)从 85 K 到 300 K 衰减约 10 倍, 纵向 S_2 (LPGE 为主)仅衰减约 50%, 室温下横向低偏压出现的符号异常直接验证了 LPGE 的相对贡献。综上, 本研究建立了偏压依赖性、栅压响应和温度敏感性三个独立判据, 为低对称性拓扑材料中光电流机制的解析提供了实验依据。

参考文献

- [1] Wang, J., Han, N., Lin, Z., Hu, S., Tian, R., Zhang, M., *et al.* (2024) A Giant Intrinsic Photovoltaic Effect in Atomically Thin ReS_2 . *Nanoscale*, **16**, 3101-3106. <https://doi.org/10.1039/d3nr05355e>
- [2] Tao, L.L. (2024) Spin Polarization in Materials Described by Noncentrosymmetric and Nonsymmorphic Space Groups. *Physical Review B*, **110**, L121125. <https://doi.org/10.1103/physrevb.110.121125>
- [3] Suo, P., Geng, L., Yang, Y., Wang, C., Zhang, Y., Lin, X., *et al.* (2026) Unlocking and Controlling Efficient Second-Order Nonlinear Terahertz Photocurrents in Centrosymmetric Dirac Semimetals. *ACS Photonics*, **13**, 582-591. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.5c02677>
- [4] Bharti, A. and Dixit, G. (2024) Photocurrent Generation in Solids via Linearly Polarized Laser. *Physical Review B*, **109**, Article ID: 104309. <https://doi.org/10.1103/physrevb.109.104309>
- [5] Sidiropoulos, T.P.H., Di Palo, N., Rivas, D.E., Summers, A., Severino, S., Reduzzi, M., *et al.* (2023) Enhanced Optical Conductivity and Many-Body Effects in Strongly-Driven Photo-Excited Semi-Metallic Graphite. *Nature Communications*, **14**, Article No. 7407. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43191-5>
- [6] Zhu, L., Liu, Y., Gao, H., Qin, X., Li, Y., Wu, Q., *et al.* (2014) Observation of Anomalous Linear Photogalvanic Effect and Its Dependence on Wavelength in Undoped InGaAs/AlGaAs Multiple Quantum Well. *Nanoscale Research Letters*, **9**, Article No. 493. <https://doi.org/10.1186/1556-276x-9-493>
- [7] Leppenen, N.V. and Golub, L.E. (2023) Linear Photogalvanic Effect in Surface States of Topological Insulators. *Physical Review B*, **107**, L161403. <https://doi.org/10.1103/physrevb.107.1161403>
- [8] Zha, J., Dong, D., Huang, H., Xia, Y., Tong, J., Liu, H., *et al.* (2024) Electronics and Optoelectronics Based on Tellurium. *Advanced Materials*, **36**, e2408969. <https://doi.org/10.1002/adma.202408969>
- [9] Niu, C., Huang, S., Ghosh, N., Tan, P., Wang, M., Wu, W., *et al.* (2023) Tunable Circular Photogalvanic and Photovoltaic Effect in 2D Tellurium with Different Chirality. *Nano Letters*, **23**, 3599-3606. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.3c00780>
- [10] Kaner, N.T., Wei, Y., Fu, B., Ying, T., Li, W., Raza, A., *et al.* (2023) Unveiling the Linear Photogalvanic Effect in a Two-Dimensional Organic Tin Halide Perovskite: $(\text{CH}_3)_2\text{NH}_2\text{SnI}_3$. *ACS Applied Energy Materials*, **6**, 5135-5143. <https://doi.org/10.1021/acsaem.2c04112>
- [11] Tsirkin, S.S., Puente, P.A. and Souza, I. (2018) Gyrotropic Effects in Trigonal Tellurium Studied from First Principles. *Physical Review B*, **97**, Article ID: 035158. <https://doi.org/10.1103/physrevb.97.035158>
- [12] Ma, J., Cheng, B., Li, L., Fan, Z., Mu, H., Lai, J., *et al.* (2022) Unveiling Weyl-Related Optical Responses in Semiconducting Tellurium by Mid-Infrared Circular Photogalvanic Effect. *Nature Communications*, **13**, Article No. 5425. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33190-3>
- [13] de Juan, F., Grushin, A.G., Morimoto, T. and Moore, J.E. (2017) Quantized Circular Photogalvanic Effect in Weyl Semimetals. *Nature Communications*, **8**, Article No. 15995. <https://doi.org/10.1038/ncomms15995>
- [14] Lai, J., Zhan, J., Liu, P., Shirakawa, T., Seiji, Y., Chen, X., *et al.* (2024) Universal Enhancement Effect of Nonlinear Optical Response from Band Hybridization. *Advanced Optical Materials*, **12**, Article ID: 2401143. <https://doi.org/10.1002/adom.202401143>
- [15] Wang, Y.M., Yu, J.L., Zeng, X.L., Chen, Y.H., Liu, Y., Cheng, S.Y., *et al.* (2019) Temperature and Excitation Wavelength Dependence of Circular and Linear Photogalvanic Effect in a Three Dimensional Topological Insulator Bi_2Se_3 .

- Journal of Physics: Condensed Matter*, **31**, Article ID: 415702. <https://doi.org/10.1088/1361-648x/ab2b55>
- [16] Zhou, X., Hu, X., Jin, B., Yu, J., Liu, K., Li, H., *et al.* (2018) Highly Anisotropic Gese Nanosheets for Phototransistors with Ultrahigh Photoresponsivity. *Advanced Science*, **5**, Article ID: 1800478. <https://doi.org/10.1002/advs.201800478>
- [17] Liu, F., Zheng, S., He, X., Chaturvedi, A., He, J., Chow, W.L., *et al.* (2016) Highly Sensitive Detection of Polarized Light Using Anisotropic 2D ReS₂. *Advanced Functional Materials*, **26**, 1169-1177. <https://doi.org/10.1002/adfm.201504546>
- [18] Tutihasi, S., Roberts, G.G., Keezer, R.C. and Drews, R.E. (1969) Optical Properties of Tellurium in the Fundamental Absorption Region. *Physical Review*, **177**, 1143-1150. <https://doi.org/10.1103/physrev.177.1143>
- [19] Sang, D.K., Wen, B., Gao, S., Zeng, Y., Meng, F., Guo, Z., *et al.* (2019) Electronic and Optical Properties of Two-Dimensional Tellurene: From First-Principles Calculations. *Nanomaterials*, **9**, Article No. 1075. <https://doi.org/10.3390/nano9081075>
- [20] Zhang, P., Hou, Z., Jiang, L., Yang, J., Saidi, W.A., Prezhdo, O.V., *et al.* (2021) Weak Anharmonicity Rationalizes the Temperature-Driven Acceleration of Nonradiative Dynamics in Cu₂ZnSnS₄ Photoabsorbers. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **13**, 61365-61373. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c21526>
- [21] Hirayama, M., Okugawa, R., Ishibashi, S., Murakami, S. and Miyake, T. (2015) Weyl Node and Spin Texture in Trigonal Tellurium and Selenium. *Physical Review Letters*, **114**, Article ID: 206401. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.114.206401>
- [22] Zhang, Y., Liu, Y., Xue, X., Zeng, X., Wu, J., Shi, L., *et al.* (2022) Current-Induced Spin Photocurrent in GaAs at Room Temperature. *Sensors*, **22**, Article No. 399. <https://doi.org/10.3390/s22010399>
- [23] Ma, J., Gu, Q., Liu, Y., Lai, J., Yu, P., Zhuo, X., *et al.* (2019) Nonlinear Photoresponse of Type-II Weyl Semimetals. *Nature Materials*, **18**, 476-481. <https://doi.org/10.1038/s41563-019-0296-5>
- [24] Wang, Y., Zhang, X., Li, C., Yao, X., Duan, R., Graham, T.K.M., *et al.* (2023) Visualization of Bulk and Edge Photocurrent Flow in Anisotropic Weyl Semimetals. *Nature Physics*, **19**, 507-514. <https://doi.org/10.1038/s41567-022-01898-0>
- [25] Lim, S., Rajamathi, C.R., Süß, V., Felser, C. and Kapitulnik, A. (2018) Temperature-Induced Inversion of the Spin-Photogalvanic Effect in WTe₂ and MoTe₂. *Physical Review B*, **98**, Article ID: 121301. <https://doi.org/10.1103/physrevb.98.121301>