

五碲化锗超快光激发表面电流特性研究

吕海慧¹, 李敏^{1*}, 夏宇¹, 刘峥¹, 贺明洋³, 袁帅¹, 曾和平^{1,2,3,4}

- (1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;
2. 华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062;
3. 济南量子技术研究院, 山东 济南 250101;
4. 华东师范大学 重庆研究院, 重庆 401121)

摘要: 利用反射式太赫兹时域光谱研究飞秒光激发狄拉克半金属五碲化锗表面产生的瞬态光电流, 进而分析五碲化锗产生太赫兹辐射的几种物理过程。实验结果表明, 偏振无关的光电流是表面电流的主要成分, 同时太赫兹振幅与泵浦脉冲的线偏振相关, 表明部分电流产生于非线性光整流效应。圆偏振光泵浦下, 太赫兹振幅随泵浦脉冲呈四倍周期性变化, 证实五碲化锗在飞秒脉冲泵浦下产生圆偏振光电流效应。进一步分析超短激光脉冲激发下的太赫兹时域电场, 揭示五碲化锗在光诱导下发生反演对称性破缺, 产生 B_{1u} 声子, 形成瞬态外尔点, 发生从狄拉克态到外尔态的转变。这对研究拓扑相变和其他拓扑态等方面具有重要意义。

关键词: 太赫兹光谱; 狄拉克材料; 五碲化锗; 圆偏光电流效应

中图分类号: O43 文献标识码: A

Surface current properties of $ZrTe_5$ excited by ultrafast laser

LUY Hai-Hui¹, LI Min^{1*}, XIA Yu¹, LIU Zheng¹, HE Ming-Yang³, YUAN Shuai¹, ZENG He-Ping^{1,2,3,4}

- (1. School of Optical Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093 China;
2. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062 China;
3. Jinan Institute of Quantum Technology, Jinan 250101 China;
4. Chongqing Institute of East China Normal University, Chongqing 401121 China)

Abstract: The transient photocurrent generated by femtosecond laser excitation on the surface of Dirac semimetal $ZrTe_5$ were measured through the reflected terahertz time-domain spectroscopy. Experimental results reveal several physical mechanisms of terahertz radiation generated from $ZrTe_5$. The results show that the polarization-independent photocurrent is the main component of the surface current, and the terahertz amplitude is related to polarization of the pump laser pulse, which indicates that part of the current is caused by nonlinear optical rectification effect. Under circularly polarized laser pumping, the terahertz amplitude changes four times periodically with the pump laser pulse, which confirms that circular photogalvanic effect of $ZrTe_5$. Besides, we have analyzed the terahertz time-domain electric field excited by ultrashort laser pulses. The $ZrTe_5$ inversion symmetry is broken under the excitation of the femtosecond laser pulse, which produces B_{1u} phonons, forming a transient Weyl point, and undergoing a phase transition from the Dirac state to the Weyl state. This is of great significance to the study of topological phase transitions and other topological states.

Key words: terahertz spectroscopy, Dirac materials, $ZrTe_5$, circular photogalvanic effect

PACS: 42.70.Nq

引言

太赫兹 (THz) 辐射是介于微波与红外之间的电磁波, 通常是指频率在 0.1~10 THz、波长在

0.03~3 mm 范围内的电磁波。THz 波独特的低能性、相干性、瞬态性、宽带性等特征意味着其在安全检测、生物医学、无损探伤、宽带通信等领域具有重

收稿日期: 2021-12-08, 修回日期: 2022-01-07

基金项目: 国家自然科学基金 (11727812, 61927813)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (11727812, 61927813)

作者简介 (Biography): 吕海慧 (1996—), 女, 安徽滁州人, 硕士, 主要研究领域为太赫兹探测及应用, E-mail: ahk1881369@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 李敏, E-mail: minli_1220@163.com

Received date: 2021-12-08, Revised date: 2022-01-07

要应用前景。因此,对THz辐射源、光谱技术及其相关应用的研究也受到极大关注^[1-5]。THz光谱技术被证实是一种研究材料结构和性质的有效方法,其时域脉冲信号测量可反馈THz电场的振幅、相位、极性等信息,一系列研究证明THz光谱技术在探究材料的辐射机制、表面态、光电流分布等领域发挥了重要作用^[6-8]。如,通过飞秒激光激发下Bi₂Se₃的THz辐射研究,确定其表面发射机制^[9];通过拓扑绝缘体Sb₂Te₃薄膜中螺旋相关THz辐射研究,为拓扑表面态的光学耦合提供方法^[10];利用THz发射光谱实现外尔半金属TaAs中与极化有关的超快光电流研究^[11];通过Bi₂Te₃表面产生的超快THz辐射分析表面微观机制^[12];利用外尔半金属TaAs实现强相干THz辐射^[13]。因此,以THz发射光谱为研究手段,分析光激发材料产生的THz振幅、相位及偏振特性,不仅为研究材料表面瞬态光电流、非线性极化、表面状态等表面特性提供有效的研究方法,同时丰富材料表面瞬态光电流、自旋电流等量子物理分析,为研究自旋极化及进一步开发新型光自旋电子器件起到推动作用。

狄拉克半金属材料是近年来发现的一类新型材料,其能带结构和石墨烯相似,在动量空间的三个方向上均具有线性色散关系,也被称为“三维的石墨烯”^[14]。为研究狄拉克半金属材料特性,THz光谱技术已被广泛采用。五碲化锆(ZrTe₅)是一种特殊的狄拉克材料,在结构上,ZrTe₅是一种层状材料,通过层间范德瓦尔斯结合在一起。由于ZrTe₅的层间范德华力较弱,因此很容易通过机械剥离的方法得到不同厚度的ZrTe₅材料。不同层数的ZrTe₅会呈现出不同的拓扑相。单层ZrTe₅是具有较大能隙的二维拓扑绝缘体。多层ZrTe₅由于层间晶格常数的微小差异,其三维体相会表现出弱拓扑绝缘体、强拓扑绝缘体、狄拉克半金属等多个拓扑相。因此,ZrTe₅在研究拓扑相变和其他拓扑量子态等方面具有重要的基础研究价值。三维狄拉克点可以看作是二个具有相反手性的外尔点的简并对,当时间反演对称性或者空间反演对称性被破坏时,它可以在动量空间中分离成一对外尔点^[15]。外尔点具有明显的手性和自旋结构,通过圆偏振光激发会产生奇异的载流子响应,即圆偏振光电流效应(Circular Photogalvanic Effect, CPGE)^[16]。CPGE是一种二阶非线性光电响应,是指材料在圆偏振光的激发下产生随偏振角度变化的光电流。其为外尔点特有的

一种手征拓扑特性,狄拉克点中不存在CPGE。观察圆偏振光电流效应是验证光激发狄拉克点到外尔点拓扑相变的一个重要标志。基于此,通过THz光谱技术研究ZrTe₅产生的光电流可进一步明确ZrTe₅的材料拓扑特性。

本文利用超快、非接触式THz发射光谱作为研究手段,分析在不同偏振态的泵浦脉冲激发下ZrTe₅产生的THz电场振幅、偏振特性。THz振幅峰峰值随泵浦光偏振态的变化关系证明偏振无关的位移电流是产生THz辐射的主要成分,线偏振相关的少量光整流电流同样促进了THz电场的产生;THz振幅峰峰值随四分之一波片的变化关系则证明了ZrTe₅在光诱导下具有圆偏振光电流效应,从而证实其产生了从狄拉克点到外尔点的相变。

1 材料介绍

ZrTe₅同时具有一维链状和二维层状的结构特点^[17],图1为ZrTe₅晶体的结构图。一个Zr原子和三个Te原子组成一个三棱锥,沿着*a*轴方向延伸排列成链,在*c*轴方向通过锯齿状的Te-Te键链接起来形成层状结构,这些层沿着*b*轴由范德瓦尔斯键相叠加形成三维结构^[18],其层间耦合较弱,层内载流子迁移率较高。作为典型的层状材料,由于顶端Te原子连接棱柱和锯齿状链,ZrTe₅具有稳定的结构。同时,两链之间的Te-Te键的长度比锯齿状链中的Te-Te键的长度长,层间距离约是Te-Te键长度的两个数量级。因此,ZrTe₅材料具有较强的各向异性^[19]。图2为室温状态下,用竖直偏振态的飞秒光激发ZrTe₅测到的拉曼光谱图。在50~200 cm⁻¹范围内,显示五个主要的拉曼振动峰,分别为78 cm⁻¹、110 cm⁻¹、117 cm⁻¹、140 cm⁻¹、175 cm⁻¹。78 cm⁻¹峰是由B_{2g}振动模式产生,其余四个峰是由A_g振动模式产生。相对较高的117 cm⁻¹和175 cm⁻¹分别对应A_g²、A_g⁴振动模式。其中,A_g⁴振动模式是由相邻两链之间的锯齿状Te-Te键的振动产生,具有强的电子-声子耦合。在飞秒光激发的非平衡态恢复过程中,强电子-声子耦合会导致范德华层之间较大的距离变化,高频振动引起的声子不断激发产生新的电子-空穴对。不仅调制了材料的电子结构和密度,也进一步增强材料的各向异性^[20]。

2 实验装置

实验装置如图3所示,实验选用重复频率为80 MHz的飞秒光纤激光器,其中心波长为780 nm,脉

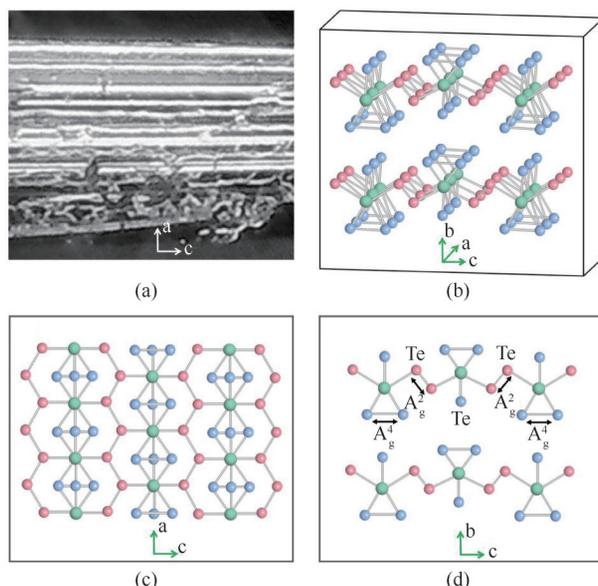


图1 (a) ZrTe₅晶体实物图, (b) ZrTe₅原子排布结构图, (c) 结构图的俯视图, (d) 结构图的正视图

Fig. 1 (a) Picture of the ZrTe₅ crystal, (b) atomic arrangement structure of the ZrTe₅ crystal, (c) top view of the crystal structure, (d) front view of the crystal structure

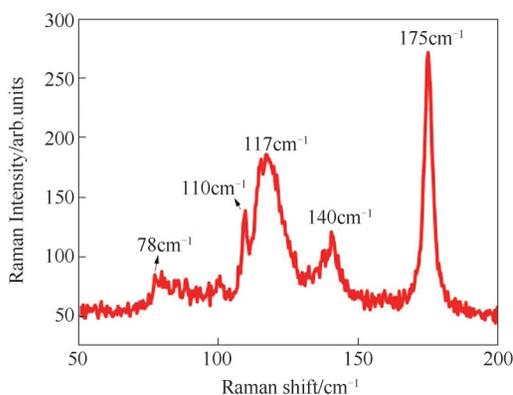


图2 ZrTe₅拉曼光谱图

Fig. 2 Raman spectrum of ZrTe₅

冲宽度为 125 fs, 输出功率为 150 mW。实验采用反射式 THz 探测系统。飞秒光纤激光器发射出的激光经分束片 (BS) 分为两束激光, 一束作为泵浦光泵浦 ZrTe₅ 产生 THz 辐射, 另一束作为探测光。泵浦光经聚焦透镜 Lens1 ($f=150$ mm) 后以 45° 入射到狄拉克半金属 ZrTe₅ 的 ac 面 (如图 1 所示), ZrTe₅ 受到激发产生 THz 辐射。其后, 放置一片 Teflon (聚四氟乙烯), 阻挡剩余 780 nm 激光脉冲。由离轴抛物面镜 PM1、PM2 收集并汇聚至光电导天线 PCA。旋转波片角度可调节泵浦光偏振态 (半波片 HWP, 用于水平偏振和垂直偏振泵浦脉冲之间的切换; 四分之一波片 QWP, 产生左旋或右旋圆偏振脉冲)。探测光经时间延迟装置 Time delay 反射后, 由透镜 Lens2 ($f=8$ mm) 聚焦到光电导天线 PCA。在两个抛

物面镜 PM1 和 PM2 之间放置 THz 金属线栅偏振片 WGP, 可用于确定不同偏振方向的 THz 辐射分量。此外, 由于 ZrTe₅ 体积较小、厚度较薄, 为便于实验的进行, 将其附着在硅片上进行实验测量。

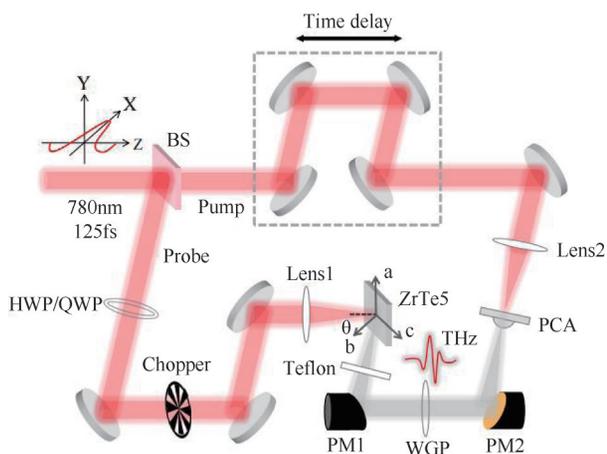


图3 实验装置图 注: BS 为分束镜; HWP 为二分之一波片; QWP 为四分之一波片; Chopper 为斩波器; Lens1、Lens2 为聚焦透镜; Teflon 为特氟龙 (聚四氟乙烯, 阻挡激光, 透射太赫兹信号); PM1、PM2 为离轴抛物面镜; WGP 为金属线栅偏振片; PCA 为光电导天线; Time delay 为时间延迟装置

Fig. 3 Diagram of experimental setup Note: BS: beam splitter; HWP: half-wave plate; QWP: quarter-wave plate; Lens1 and Lens2: convex lens; Teflon: PTFE (Poly tetra fluoroethylene, blocking laser and transmitting THz); PM1 and PM2: off-axis parabolic mirror; WGP: wire-grid polarizer; PCA: photoconductive antenna; Time delay: optical delay line

3 结果与讨论

用反射式 THz 探测系统对样品进行测试,由于 ZrTe₅ 晶体附着在硅片上,需验证所探测的 THz 辐射是由 ZrTe₅ 产生。将激光脉冲汇聚在硅片上,未探测到 THz 脉冲,其结果如图 4 插图中的黑线所示。将 ZrTe₅ 附着在硅片上,光激发下可探测到 THz 脉冲信号,如图 4 插图中的红线所示。由此可证实,实验探测的 THz 辐射是由 ZrTe₅ 产生,硅片对 THz 辐射的贡献可忽略不计。由图 4 可知,在泵浦功率为 50 mW 的飞秒光脉冲激发下,ZrTe₅ 产生 THz 辐射时域宽度约为 2 ps,信噪比较高的频谱范围为 0.05~1.2 THz,0.5 THz 附近频谱动态范围约为 55 dB。

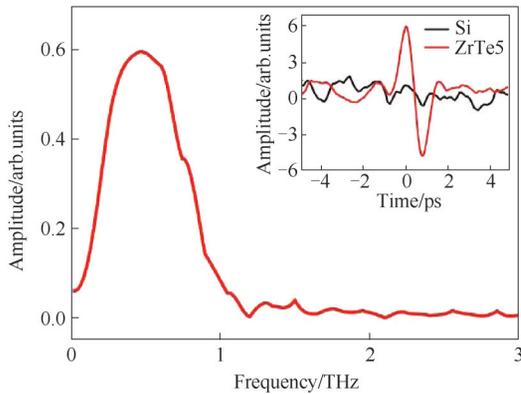


图4 太赫兹辐射时频域谱图

Fig. 4 Time and frequency domain spectrum of THz radiation

光激发下,产生 THz 辐射有以下几种机制,表面耗尽场、光牵引效应、光致丹伯尔效应、非线性光整流和圆偏振光电流效应。表面耗尽电场引起的 THz 辐射常出现在宽带隙的半导体材料中。由于 ZrTe₅ 的带隙较小,表面耗尽场的弛豫时间短,相应的电流贡献几乎可以忽略不计。光牵引效应由入射光波矢和晶格常数决定,不受材料反演对称性的限制。在大多数材料中,光牵引电流的贡献都很少。光致丹伯尔电场的形成是由电子的传播速度比空穴的传播速度快引起。同时,光致丹伯尔电场和载流子的浓度梯度成正比。泵浦脉冲激发 ZrTe₅ 晶体时,电子获得了多余的能量,且 ZrTe₅ 具有较高电子迁移率,使得光致丹伯尔效应进一步增强^[21]。光致丹伯尔电场可超快建立,且弛豫时间较长,在窄带隙半导体材料中起到产生表面光电流的主要作用。非线性光整流效应是二次非线性效应,类似于二次谐波生成过程与二阶非线性极化张量相关。为明

确 ZrTe₅ 在光激发下的表面电流,实验测量在不同偏振光泵浦下产生的 THz 辐射,从图 5(a)和图 5(b)中可知,偏振无关的光电流在 ZrTe₅ 产生 THz 辐射中占主导地位(约为 90%)。偏振相关的 THz 辐射主要是来源于光激发 ZrTe₅ 产生的非线性光电流和圆偏振光电流^[12]。图 5 显示脉冲光激发下 ZrTe₅ 产生的水平偏振 THz 电场振幅峰峰值与泵浦光偏振态的关系。振幅峰峰值为水平偏振 THz 辐射波峰与波谷的差值。图 5(a)中,二分之一波片旋转角 ϕ 为 0° 时,泵浦光为水平偏振态; ϕ 为 45° 时,泵浦光为竖直偏振态。当泵浦光为水平偏振态时,水平极化 THz 辐射峰峰值达到最大值;当泵浦光为竖直偏振态时,水平极化 THz 辐射峰峰值为最小值。水平极化 THz 辐射峰峰值随二分之一波片旋转角呈周期性变化,振幅变化幅度约为 10%。虽然水平极化 THz 辐射峰峰值随泵浦光极化变化幅值较小,但明确表现出各向异性,呈现非线性光电流特性。图 5(b)中,四分之一波片旋转角 ϕ 为 0° 时,泵浦光为圆偏振态; ϕ 为 45° 时,泵浦光为线偏振态。由图 5(b)和图 5(d),水平极化 THz 振幅峰峰值随四分之一波片旋转角的变化呈现出明显的四倍旋转对称性,表现为螺旋相关光电流,其对 THz 产生的贡献表示为^[22]:

$$E_{\text{THz}} \propto C \sin 2\phi + L_1 \sin 4\phi + L_2 \sin 4\phi + D, \quad (1)$$

其中, E_{THz} 为水平极化 THz 电场, ϕ 为波片旋转角度, C 为螺旋度相关的光电流贡献, L_1 和 L_2 取决于线性偏振并且与二次非线性效应相关, D 源于与偏振无关的光致丹伯尔效应。图 5(b)和(d)所示 THz 电场与泵浦光偏振的周期性变化关系与理论相符,证实圆偏振光电流的产生,表明 ZrTe₅ 在光诱导下具有圆偏振光电流效应。圆偏振光电流效应是外尔态特有的拓扑性质。因此,ZrTe₅ 表面发生了从狄拉克态到外尔态的拓扑相变^[22]。

进一步分析圆偏振泵浦脉冲激发 ZrTe₅ 产生 THz 电场的偏振状态。图 6(a)为不同偏振分量的 THz 时域电场图,红色线表示竖直偏振分量(S 偏振),蓝色线表示水平偏振分量(P 偏振)。图 6 中,纵坐标表示 THz 时域电场强度;横坐标表示时间轴,负值为 THz 脉冲前沿,正值为 THz 脉冲后沿。如图 6(a)所示,THz 脉冲前沿 S 偏振分量和 P 偏振分量无明显相位延迟,THz 脉冲表现为线偏振态;绿色圆圈标记处的 THz 脉冲后沿,S 偏振分量和 P 偏振分量存在明显的相位延迟。取绿色圆圈标记处的 THz 电场 S 和 P 偏振分量,描绘其轨迹,其偏振态接近圆偏振

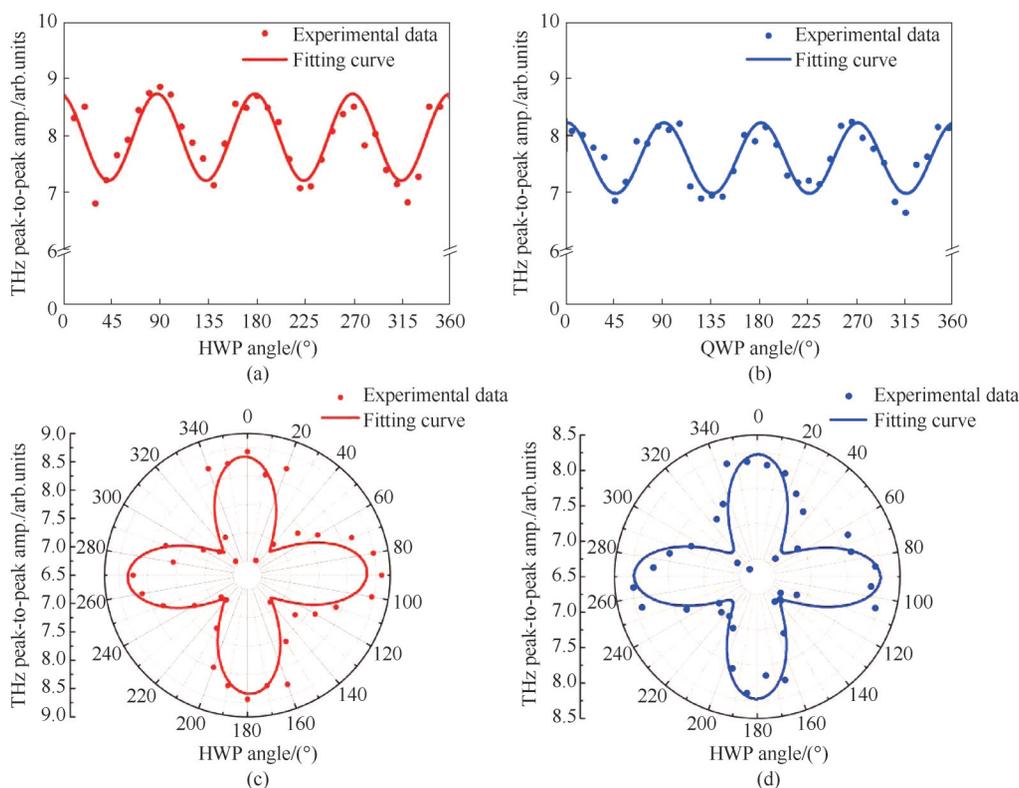


图5 水平极化THz振幅的峰峰值和波片旋转角关系图 (a)和(c)泵浦光为线偏振态,(b)和(d)泵浦光为椭圆偏振态
Fig. 5 The horizontal polarized THz peak-to-peak amplitude as a function of wave plate rotation angle (a) and (c) are from linear-polarized pump pulse, (b) and (d) are from circular-polarized pump pulse

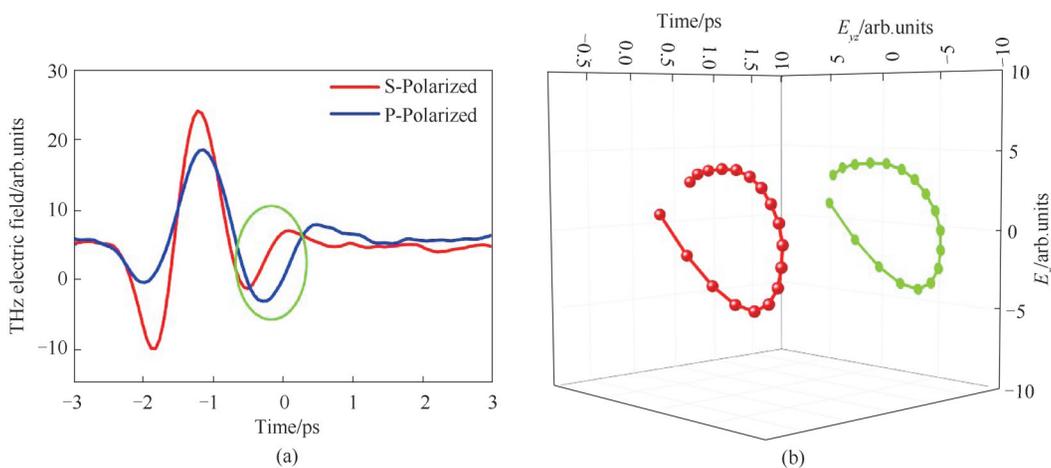


图6 圆偏振态泵浦光激发的THz时域电场及偏振图
Fig. 6 THz time domain electric field and polarization excited by pump pulse with circular polarization

态,如图6(b)所示。前文中,THz电场振幅峰峰值随泵浦光偏振态的关系图已证实THz脉冲峰值处偏振无关的光致丹伯尔效应占据主导地位,同时产生少量偏振相关圆偏振光电流。因此,产生的THz脉冲主要表现为线偏振态。THz脉冲后沿表现出圆偏振态,则是由圆偏振光电流引起。在中心对称的狄拉克ZrTe₅中,超短激光脉冲诱导破坏了材料的反演对

称性,产生B_{1u}声子^[22]。在B_{1u}声子的驱动作用下,ZrTe₅中形成瞬态外尔点并产生螺旋相关的表面电流。瞬态外尔态中的电子散射较强,导致光致丹伯尔效应产生的光电流寿命比相干B_{1u}声子退相干时间短^[22]。因而,THz脉冲后沿受螺旋度相关的圆偏振光电流影响较大,表现为圆偏振态。该现象进一步说明,在圆偏振光泵浦下,ZrTe₅中出现外尔点,

发生从狄拉克态到外尔态的拓扑相变。

4 结论

本文利用反射式 THz 发射光谱技术,研究狄拉克半金属 ZrTe₅ 在光诱导下的表面光电流效应。分析了不同偏振光泵浦下的 THz 电场特性,区分不同物理过程产生的表面光电流,进而揭示 ZrTe₅ 产生 THz 辐射的物理机制。同时,通过分析 THz 时域电场特性及偏振态证实 ZrTe₅ 在超短激光脉冲激发下产生了瞬态外尔点,其表面特性从狄拉克态转变为外尔态,这为更深入地了解物质的奇异结构和状态,了解电子在拓扑材料中的迁移规律提供研究手段,同时促进电子学、超导体领域的发展。

References

- [1] Carbajo S, Schulte J, Wu X J, *et al.* Efficient narrowband terahertz generation in cryogenically cooled periodically poled lithium niobate [J]. *Optics Letters*, 2015, **40** (24): 5762–5765.
- [2] Roeder F, Shalaby M, Beleites B, *et al.* THz generation by optical rectification of intense near-infrared pulses in organic crystal BNA [J]. *Optics Express*, 2020, **28** (24): 36274–36285.
- [3] HE Yi-Xin, PANG Zi-Bo, ZHU Xian-Li, *et al.* High-energy, ultra-wideband tunable and compact terahertz source based on DAST crystal via difference frequency generation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (贺奕焮, 庞子博, 朱先立, 等. 基于 DAST 晶体的高能量超宽带可调谐小型化差频 THz 辐射源研究. *红外与毫米波学报*), 2019, **38** (4): 485–492.
- [4] Pfeiffer T, Molter D, Von G, *et al.* Terahertz detection by upconversion to the near-infrared using picosecond pulses [J]. *Optics Express*, 2020, **28** (20): 29419–29429.
- [5] XU Xin-Yue, ZHANG Xiao-Dong, WU Jing, *et al.* High responsivity Bi₂Te₃-based roomtemperature terahertz detector based on metal-semiconductor-metal (MSM) structure [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (徐新月, 张晓东, 吴敬, 等. 基于金属-半导体-金属结构的 Bi₂Te₃ 室温高响应率太赫兹探测器. *红外与毫米波学报*), 2019, **38** (5): 533–539.
- [6] Hamh S Y, Park S H, Jerng S K, *et al.* Helicity-dependent photocurrent in a Bi₂Se₃ thin film probed by terahertz emission spectroscopy [J]. *Physical Review B*, 2016, **94** (16): 161405.
- [7] Karasawa H, Komori T, Watanabe T, *et al.* Observation of amplified stimulated terahertz emission from optically pumped heteroepitaxial graphene-on-silicon materials [J]. *J Infrared Milli Terahz Waves*, 2011, **32**: 655–665.
- [8] Huang Y, Yao Z, He C, *et al.* Terahertz surface and interface emission spectroscopy for advanced materials [J]. *Journal of Physics Condensed Matter*, 2019, **31** (15): 153001.
- [9] Zhu L G, Kubera B, Mak K F, *et al.* Effect of surface states on terahertz emission from the Bi₂Se₃ surface [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 10308.
- [10] Tu C M, Chen Y C, Huang P, *et al.* Helicity-dependent terahertz emission spectroscopy of topological insulator Sb₂Te₃ thin films [J]. *Physical Review B*, 2016, **94** (19): 195407.
- [11] Sirica N, Tobey R I, Zhao L X, *et al.* Tracking ultrafast photocurrents in the Weyl semimetal TaAs using THz emission spectroscopy [J]. *Physical Review Letters*, 2019, **122** (19): 197401.
- [12] Fang Z J, Wang H T, Wu X J, *et al.* Nonlinear terahertz emission in the three-dimensional topological insulator Bi₂Te₃ by terahertz emission spectroscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, **115** (16): 191102.
- [13] 高羽. 外尔半金属中太赫兹辐射研究 [D]. 西安: 电子科技大学, 2020.
- [14] Yang B J, Nagaosa N. Classification of stable three-dimensional Dirac semimetals with nontrivial topology [J]. *Nature Communications*, 2014, **5**: 4898.
- [15] Xie B Y, Liu H, Cheng H, *et al.* Dirac points and the transition towards Weyl points in three-dimensional sonic crystals [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, **9**: 201.
- [16] Gao Y, Kaushik S, Philip E J, *et al.* Chiral terahertz wave emission from the Weyl semimetal TaAs [J]. *Nature Communications*, 2020, **11**: 720.
- [17] Li X B, Huang W K, LUY Y Y, *et al.* Experimental observation of topological edge states at the surface step edge of the topological insulator ZrTe₅ [J]. *Physical Review Letters*, 2016, **116** (17): 176803.
- [18] Qiu G, Du Y, Charnas A, *et al.* Observation of optical and electrical in-plane anisotropy in high-mobility few-layer ZrTe₅ [J]. *Nano Letters*, 2016, **16** (12): 7364–7369.
- [19] Wu R, Ma J Z, Nie S M, *et al.* Evidence for topological edge states in a large energy gap near the step edges on the surface of ZrTe₅ [J]. *Physical Review X*, 2016, **6** (2): 021017.
- [20] Li N, Liang W, Luo S N. Hot carrier dynamics and phonon anharmonicity of ZrTe₅ revealed with femtosecond transient optical spectroscopy [J]. *Physical Review B*, 2020, **101** (1): 014304.
- [21] Apostolopoulos V, Barnes M E. THz emitters based on the photo-Dember effect [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2014, **47** (37): 374002.
- [22] Luo L, Cheng D, Song B, *et al.* A light-induced phononic symmetry switch and giant dissipationless topological photocurrent in ZrTe₅ [J]. *Nature Materials*. 2021, **20**: 329–334.