

引用格式: LIAO Kun, LI Chentong, HU Xiaoyong, et al. Applications of Thin-film Topological Insulators in Ultrafast Optical Devices (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(8):0850210

廖琨,李辰童,胡小永,等. 拓扑绝缘体薄膜在超快光器件中的应用(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(8):0850210

拓扑绝缘体薄膜在超快光器件中的应用(特邀)

廖琨,李辰童,胡小永,龚旗煌

(北京大学 物理学院 人工微结构和介观物理国家重点实验室,北京 100871)

摘 要:随着超快光学的发展和对以 Bi_2Te_3 为代表的拓扑绝缘体材料研究的深入,近几年,将拓扑绝缘体薄膜应用于超快光器件的研究方向发展迅速并发表了一系列研究成果,本文综述了近年来基于拓扑绝缘体材料的超快激光及光器件的研究。从材料结构及制备方法出发,介绍了其独特的光学及光电特性,总结了其在超快激光及光器件中的应用研究进展,回顾和讨论了这一领域的成就和挑战,并对将拓扑绝缘体薄膜材料应用于超快光器件的进一步研究进行了展望。

关键词:拓扑绝缘体材料; Bi_2Te_3 薄膜; 宽频强非线性效应; 饱和吸收体; 超快光器件

中图分类号: O436

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215008.0850210

Applications of Thin-film Topological Insulators in Ultrafast Optical Devices (Invited)

LIAO Kun, LI Chentong, HU Xiaoyong, GONG Qihuang

(State Key Laboratory for Mesoscopic Physics, Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: With the development of ultrafast optics and the in-depth research on topological insulator materials represented by Bi_2Te_3 , the research on applying topological insulator thin films to ultrafast lasers and devices has developed rapidly, and a series of research results have been published in recent years. This paper reviews the research on ultrafast lasers and devices based on topological insulator materials by starting from structure characteristics and preparation methods, introducing their unique optical and optoelectronic properties, summarizing the research on their applications in ultrafast lasers and optical devices, as well as reviewing and discussing the achievements and challenges in this field. We also provide an outlook on further development directions on the application of topological insulator thin film materials in ultrafast optics.

Key words: Topological insulator materials; Bi_2Te_3 thin film; Broadband strong nonlinear effect; Saturated absorber; Ultrafast optical devices

OCIS Codes: 160.4330; 320.7080; 140.7090; 130.3120

0 引言

超快光学是随超短脉冲激光发展起来的一门学科,通常由调 Q 或锁模激光器提供光源,时间尺度在皮秒量级到飞秒量级附近。因其独特的高时空分辨率、宽频和高功率等性质,超快光在光学研究、通讯、化学、电子学和材料学等领域有着广泛的应用^[1]。近年来,随着超快光学的发展,超快激光及光

基金项目: 国家重点研究开发项目 (Nos. 2018YFB2200403, 2018YFA0704404), 国家自然科学基金 (Nos. 61775003, 11734001, 91950204, 11527901), 北京市科技计划课题 (No. Z191100007219001)

第一作者: 廖琨 (1996—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为光子信息处理芯片。Email: kunliao@pku.edu.cn

李辰童 (2000—), 男, 本科, 主要研究方向为光子信息处理芯片。Email: lichentong@pku.edu.cn

导师 (通讯作者): 胡小永 (1973—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光子信息处理芯片和拓扑光子学。Email: xiaoyonghu@pku.edu.cn

收稿日期: 2021-05-30; **录用日期:** 2021-07-22

<http://www.photon.ac.cn>

器件逐渐丰富,将新型薄膜材料应用于超快激光及光器件的研究也为器件性能的提升提供了新的思路。

随着人们对石墨烯等二维材料研究的深入,具有类似晶体及能带结构的拓扑绝缘体材料(Topological Insulator, TI)^[2],包括 Bi_2Te_3 、 Bi_2Se_3 、 Sb_2Te_3 等具有类似化学组分的 V2VI3 材料,逐渐进入研究者的视野^[3-6]。这类材料最大的特点是拥有一个能隙较小的体态以及无能隙的表面态^[7-10]。拥有独特能带结构的 TI 材料很快被研究者发现具有独特的光电及非线性光学特性。研究表明, Bi_2Te_3 等薄膜材料拥有很大的克尔折射率和饱和吸收特性。随着薄膜材料制备工艺的发展,这些材料逐渐被试验性地用于超快光器件的设计中。基于 Bi_2Te_3 等 TI 薄膜材料的脉冲激光器^[11-31]、光电探测器^[32-41],片上全光开关^[42-44]和全光调制器^[45-47]等超快光器件的实现被陆续报道。到目前为止,对这一类材料的研究工作已较为丰富,但尚未有相关的主题综述全面地概述其基本性质、制备方法、光学特性及其在超快光器件中应用的研究现状及发展趋势。本文旨在提供一个框架来介绍这类材料在超快光器件中的应用,以促进这一领域的进一步发展。

本文综述了近年来所发现的 Bi_2Te_3 等 TI 薄膜材料的结构特性、制备方法、独特的光学性质及其在超快光器件中的应用。首先,较为全面地总结了 TI 薄膜材料的结构特性及两大类主流的制备方法,包括自上而下的剥离方法和自下而上的生长方法,为后续的应用奠定了物理及工艺基础;之后,详细介绍了这类材料独特的超快光学特性,包括宽频强非线性效应及其能带结构所带来的光电特性;重点讨论了 TI 材料在超快光器件中的应用,包括其作为饱和吸收体在脉冲激光器中的应用,其强三阶非线性在光开关/路由/调制器中的应用,其光电响应在光电探测器中的应用,以及其作为相变材料在光存储器中的应用等。最后,总结了目前将 Bi_2Te_3 等 TI 薄膜材料用于超快光器件的研究进展,并对此研究方向的发展前景进行了展望。

1 TI 薄膜材料的结构性质和制备方法

晶体和能带特性描述了材料的基本性质,并能在很大程度上决定材料的光学及光电特性。TI 材料晶体具有层状的六面体结构及独特的能带,使其拥有与其他传统材料不同的电子学、热电和光电性质,因此 TI 材料受到了大量关注。

1.1 晶体和能带结构

以 Bi_2Te_3 晶体为例,其晶体结构属于斜方晶系,属于 $R\bar{3}m$ 群。 Bi_2Te_3 晶体具有六面体层状结构,同层的原子种类相同,层间呈现 $-\text{Te}^1-\text{Bi}-\text{Te}^2-\text{Bi}-\text{Te}^1-$ 的原子排布方式^[48-49]。每五层为一个单元,每个单元之间以范德华力结合,因此容易发生解理,这在薄膜材料的制备中需要注意^[49-50]。有研究表明,通过激光或其他方法可以实现 TI 材料在晶态与非晶态之间的可逆相变^[51-54]。由于两种状态下材料在光透过率上的差异,其在相变存储等领域有应用的潜力。

以 Bi_2Te_3 为代表的拓扑绝缘体与其他半导体材料的差异表现在其能带结构上。这类材料的能带具有一个较小的间隙,但是由于较强的自旋轨道耦合及其时间反演对称性的特点,在材料表面存在一个类似金属的无能隙的表面态^[6, 10, 55],这种特殊的性质带来的最为人知的效应就是量子自旋霍尔效应。 Bi_2Te_3 、 Bi_2Se_3 、 Sb_2Te_3 等材料的能带结构较为复杂并具有各向异性,在室温下其导带与价带之间的能隙 $\sim 0.1 \text{ eV}$ ^[10, 48]。这样的小能隙及表面态的存在带来了 TI 材料独特的光学性质。

2008 年,KAIVANY M 研究组通过一种复合的数值计算方法计算出了 Bi_2Te_3 的声子和电子传输特性,并解释了其电导率、热导率和光学性质^[49]。他们使用第一性原理计算、分子动力学(Molecule Dynamics, MD)模拟、波尔兹曼传播方程(Boltzmann Transport Equations, BTE)等方法,获得了与实验吻合的结果。ZHANG Shoucheng 课题组在 2009 年对 Bi_2Te_3 、 Bi_2Se_3 和 Sb_2Te_3 三种拓扑绝缘体的能带和表面态进行了详细分析,并提出了一个连续体模型^[10]。2015 年,SHI Hongliang 等研究者通过线性缀加平面波(Linearized Augmented Plane Wave, LAPW)等方法计算了 Bi_2Te_3 的能带,并解释了其电热特性^[56]。到目前为止,已经有很多课题组通过多种方法研究过 TI 材料的能带结构,图 1 展示了部分 TI 材料的晶体及能带结构。

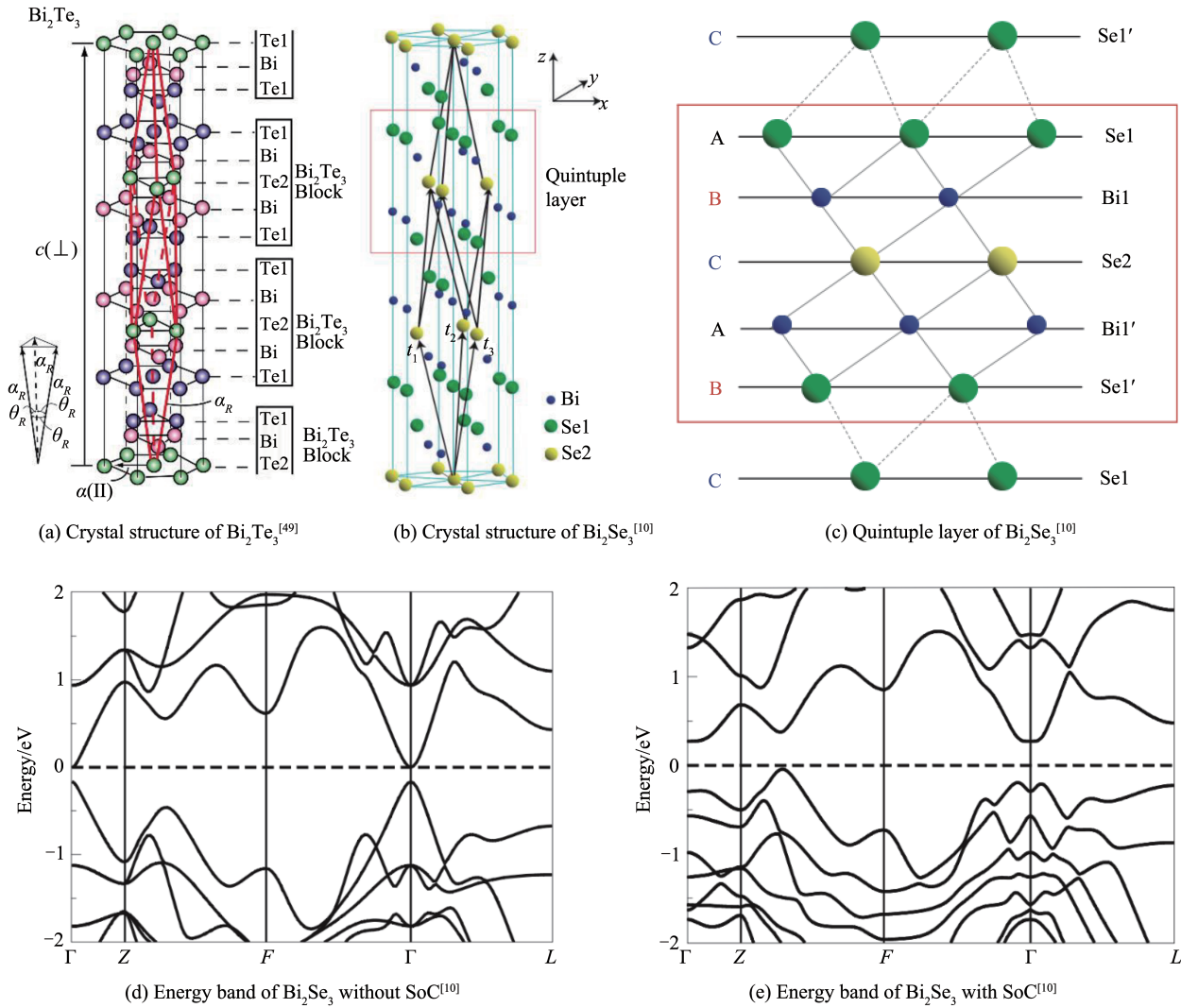


图1 TI材料的晶体结构和能带结构^[10,49]
Fig.1 Crystal structure and energy band of TIs^[10,49]

1.2 制备方法

Bi_2Te_3 等TI材料的制备方法,特别是薄膜的制备方法到目前为止已有了较为充分的研究^[9, 57-65]。大致可分为自上而下的剥离和自下而上的生长。对于剥离可以使用机械、激光或者溶液处理;生长方法较多,研究工作也较为丰富。

机械剥离法^[66]可以利用思高胶带(Scotch Tape)将单层或数层晶体从材料中剥离,这种来源于石墨烯的剥离方法操作简便但难以控制产率。化学溶液剥离^[67]可以规避机械剥离产率低的问题,但得到的产物可能存在较多的缺陷^[3],需要后处理来提高质量。此外还有液相剥离(Liquid-Phase-Exfoliation, LPE)^[68]等方法,但通常难以获得单层样品。剥离法利用材料层间结构较弱的范德华力,通常可以获得较为整洁的样品用于表征和输运性质研究^[3]。

对于自下而上的生长方法,目前TI薄膜材料常见的生长方法主要有化学蒸汽沉积法(Chemical Vapor Deposition, CVD)^[69-70]、分子束外延法(Molecule Beam Epitaxy, MBE)^[8, 61, 71]、范德华外延(Van der Waals Epitaxy)以及脉冲激光沉积法(Pulse Laser Deposition, PLD)^[42, 44, 72]等。CVD又可分为蒸汽-液态-固态法(Vapor-Liquid-Solid, VLS)、蒸汽-固态法(Vapor-Solid, VS)^[73]及最近发展的金属-有机物化学沉积法(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)^[70]等方法。在薄膜的制备上常用MOCVD和MBE方法,它们能够获得成分和结构高度可控的高质量薄膜,但是常受限于基底的成核率和晶格结构。范德华外延法能够克服这一问题,利用外延层与基底之间较微弱的范德华作用和TI材料低表面能、没有表面悬空键和各向异性的性

质,在外延过程中可以克服晶格错配的问题。选用具有适当表面性质的材料作为范德华外延的基底,可以获得取向可控、面积较大的薄膜材料^[57, 73-74]。由于PLD过程通常在真空中进行,能够较好地控制污染,获得的样品具有较高的纯度。另外,PLD可以方便地通过控制两种离子的蒸汽化比例控制薄膜中的离子比例^[3]。除此之外,还有溶热法(Solvothermal)^[75]和螺旋生长法(Spiral Growth)^[76]等制备方法近年来被陆续报道。

2011年,XUE Qikun利用MBE法制备了不同厚度的 Bi_2Te_3 和 Bi_2Se_3 薄膜,并进行了表面形态的研究^[77]。LEE Junsu研究组在2015年利用思高胶带制备了约 $31\ \mu\text{m}$ 厚的 Bi_2Te_3 用于调Q光纤激光的搭建^[24]。同年,RUAN Shuangchen研究组利用PLD法制备了TI包裹的微纤维,作为饱和吸收体^[44]。在2018年,WEN Shuangchun研究组采用LPE方法制备了 Bi_2Te_3 纳米晶体,研究了其非线性特性,并将其应用于锁模激光器^[78]。图2展示了几种不同方法制备的TI薄膜材料。

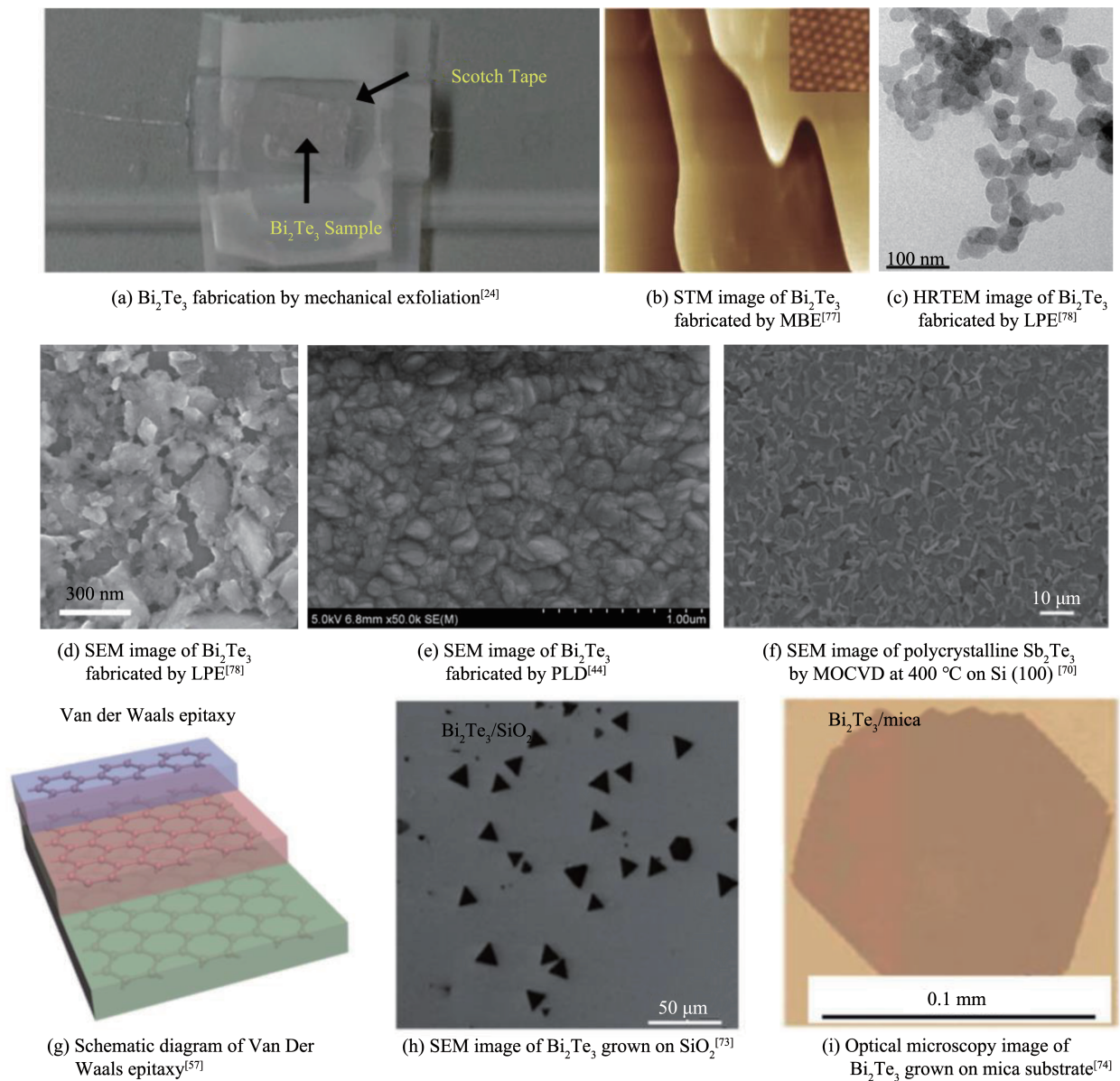


图2 TI材料在几种制备方法下的形貌图^[24, 44, 57, 70, 73-74, 77-78]

Fig.2 Structure images of TIs under several fabrication methods^[24, 44, 57, 70, 73-74, 77-78]

2 TI薄膜材料的光学特性

由于晶体和能带结构,及其存在表面态的特性,TI薄膜材料具有独特的光学及光电性质。主要表现在其较强的宽频三阶非线性,包括克尔效应和饱和吸收效应,以及宽频的光电流效应等。这些独特的性质在

超快光器件的设计中得到了广泛关注。此外, TI材料还具有相变特性和各向异性带来的双曲性, 相较之下这些性质在超快光学中得到的关注较少, 但同样拥有丰富的应用前景。

2.1 宽频强非线性

一般地, 材料的非线性来源于在电场中的极化。对于各向同性介质, 其在电场 $E(t)$ 中的极化强度 $P(t)$ 满足

$$P(t) = \epsilon_0(\chi^{(1)}E(t) + \chi^{(2)}E^2(t) + \chi^{(3)}E^3(t) + \dots) \quad (1)$$

式中, $\chi^{(1)}$ 、 $\chi^{(2)}$ 、 $\chi^{(3)}$ 分别对应线性、二阶及三阶非线性极化率, 三阶非线性引发的效应包括非线性折射率变化(克尔效应)、非线性吸收改变(饱和吸收和双光子吸收)以及三倍频的产生。通常介质的复折射率 n 与光强 I 满足

$$n = n_0 + n_2I - i\frac{\lambda}{4\pi}(\alpha_0 + \alpha_2I) \quad (2)$$

式中, λ 为入射光波长, n_0 、 α_0 分别为线性折射率和线性吸收系数, n_2 、 α_2 分别为克尔折射率和非线性吸收系数。

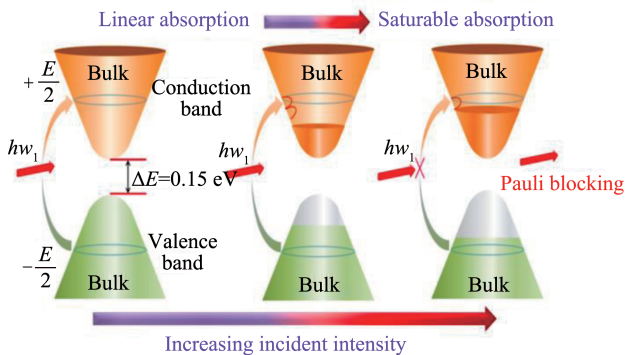
对于克尔效应, 在数十年来对传统材料非线性的研究中, 人们在许多场景下很难找到能够胜任的非线性材料^[47]。而以 Bi_2Te_3 为代表的新型 TI 材料具有更大的宽频三阶非线性特性^[79-81]。与石墨烯类似, 由于其特殊的表面态, TI 薄膜材料的克尔效应随光波长的增加而增强, 大约与 λ^4 相关^[79]。多个实验指出, Bi_2Te_3 的非线性克尔折射率在可见光波段 $\sim 10^{-11} \text{cm}^2/\text{W}$, 在通讯波段 $\sim 10^{-8} \text{cm}^2/\text{W}$ ^[79, 82]。此外有研究指出, 在 Bi_2Te_3 的纳米片上观测到了强三阶非线性引起的从近红外到紫外波段的空间自相位调制(Spatial Self Phase Modulation, SSPM)^[83-85], 这是一种由折射率变化引发的干涉现象, 可导致光束发散或聚焦。

饱和吸收是材料的另一种重要特性, 与材料的能带结构有密切联系^[78, 80, 82]。在光子能量高于带隙时, 任何电子都可能被激发到导带中, 在光强较弱的情况下, 电子和空穴最终重新结合并回到热平衡态。但当光强变得更强, 被激发的电子快速增加并占据了价带和导带交界附近的所有能态时, 材料对光子的吸收由于泡利阻塞效应而下降, 这构成了 TI 薄膜材料饱和吸收现象的原理^[80]。通常对饱和吸收现象的描述为

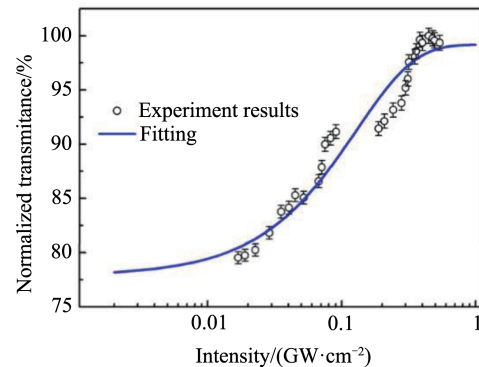
$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + I/I_s} \quad (3)$$

式中, α 为吸收系数, I_s 为饱和光强, α_0 为与材料恢复时间 τ 成反比的吸收系数。在某一波段拥有饱和吸收特性是某种材料可被用于脉冲调制的必要条件。 Bi_2Te_3 的饱和吸收性质最早在 2012 年被观测到^[31], 随后多种以此为原理的应用, 特别是调 Q 和锁模激光器相继被报道实现。3.1 节重点讨论了该材料在超快激光器中的应用。值得一提的是, 在应用于激光器时, 恢复时间越短的材料将产生越短的激光脉冲。

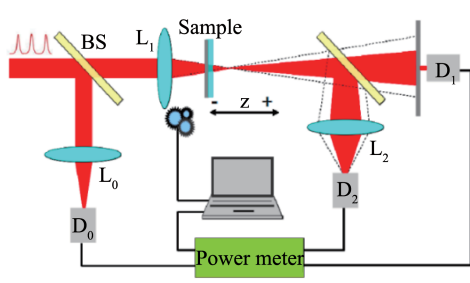
在 2013 年, ZHANG Han 研究组利用 Z-扫描测量^[86]方法测量了不同波长下 Bi_2Se_3 样品的饱和吸收特性和克尔折射率^[82]。次年, 同一研究组用同样的方法测量了 Bi_2Te_3 材料的饱和吸收特性, 但未测得克尔效应^[80], 图 3(a)、(b) 展示了其工作。2016 年, ZHAO Chujun 研究组同样通过 Z-扫描测量方法测量了化学合成法制备的 Bi_2Te_3 样品^[79](图 3(c)~(e))。实验利用开孔 Z-扫描测量了样品的饱和吸收特性, 随后利用闭孔 Z-扫描测量结果减去饱和吸收的影响得到了克尔折射率, 测得在波长为 1 930 nm 时材料具有最大的克尔折射率 $2.12 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{W}$ 。2018 年, 同一研究组用同样方法测量了 LPE 方法制备的 Bi_2Te_3 样品, 利用其搭建并实现了锁模光纤激光器^[78]。



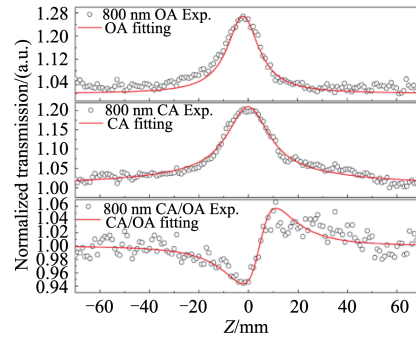
(a) Schematic diagram of saturable absorption^[80]



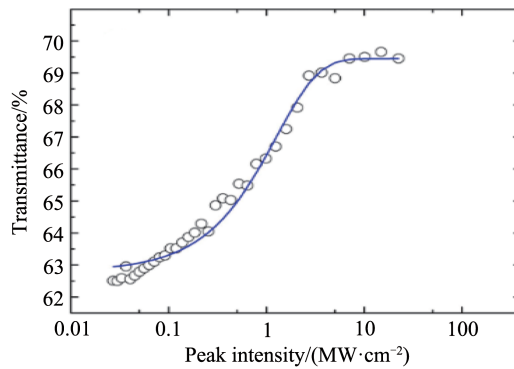
(b) Saturable absorption of Bi_2Te_3 at 1570 nm wavelength^[80]



(c) Z-scan experimental setup^[79]



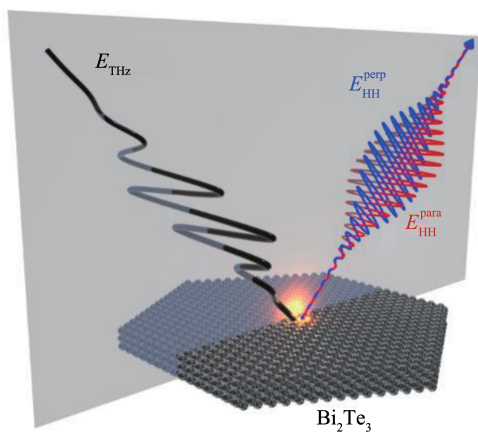
(d) Z-scan result of Bi_2Te_3 at 800 nm wavelength^[79]



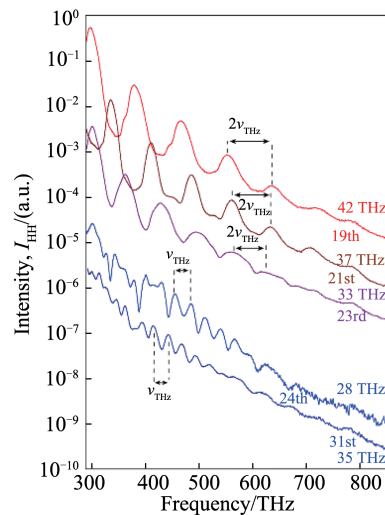
(e) Saturable absorption of Bi_2Te_3 at 800 nm wavelength^[79]

图3 TI材料的Z-扫描实验及其饱和和吸收特性^[79-80]
Fig.3 Z-scan experiments and saturable absorption properties of TIs^[79-80]

2021年, WILHELM J 研究组利用飞秒太赫兹激光脉冲研究了布里奇曼方法制备的 Bi_2Te_3 样品在受到接近其能隙能量的激光照射时的高次谐波效应^[87]。实验利用不同频率的激光观察了当能量高于能隙能量和低于能隙能量时高次谐波的不同响应,并分别用体态和表面态的性质进行了解释。重要的是,实验发现在表面态时会产生分数次谐波,且谐波次数与载波包络相位 (Carrier-Envelope Phase, CEP) 相关,而体态效应占主导时不会发生这种现象,这是目前最新的一项关于 Bi_2Te_3 材料非线性特性的研究工作(图4)。图4(a)中 E_{THz} 表示入射的 THz 的 s 偏振光, $E_{\text{HH}}^{\text{perp}}$ 和 $E_{\text{HH}}^{\text{para}}$ 分别表示产生的偏振方向垂直和平行于入射波的高次谐波。图4(c)和(d)中的横坐标表示高次谐波的级次,纵坐标表示 CEP。



(a) Schematic diagram of high harmonic generation



(b) High harmonic generation of Bi_2Te_3 at different frequency ~ 30 THz

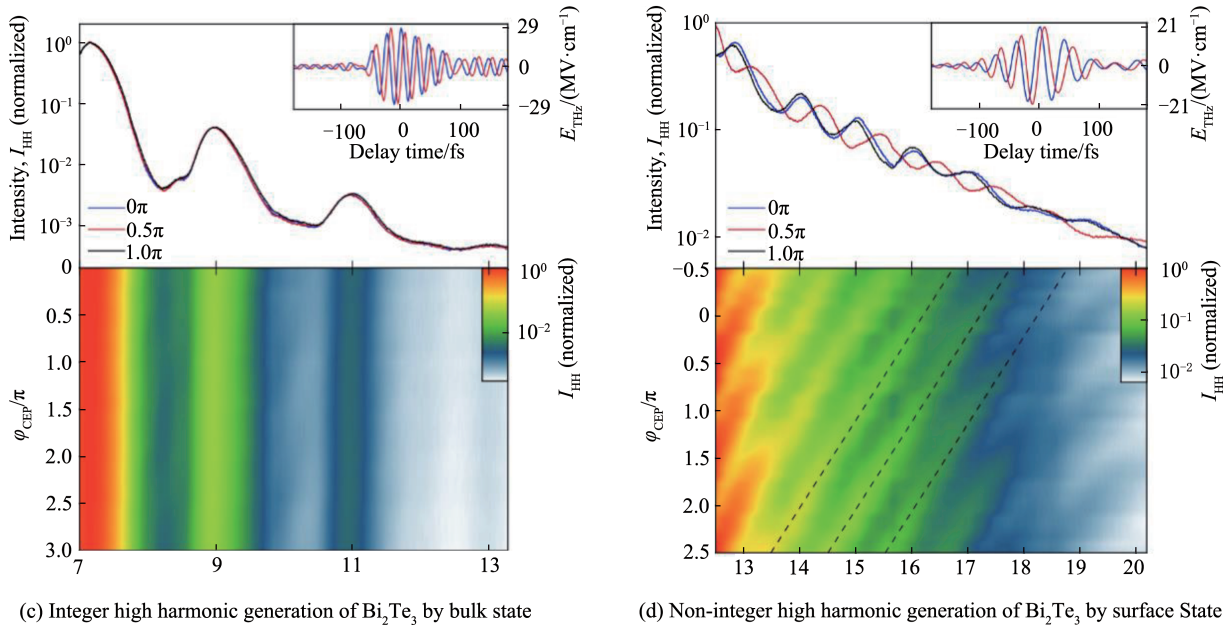
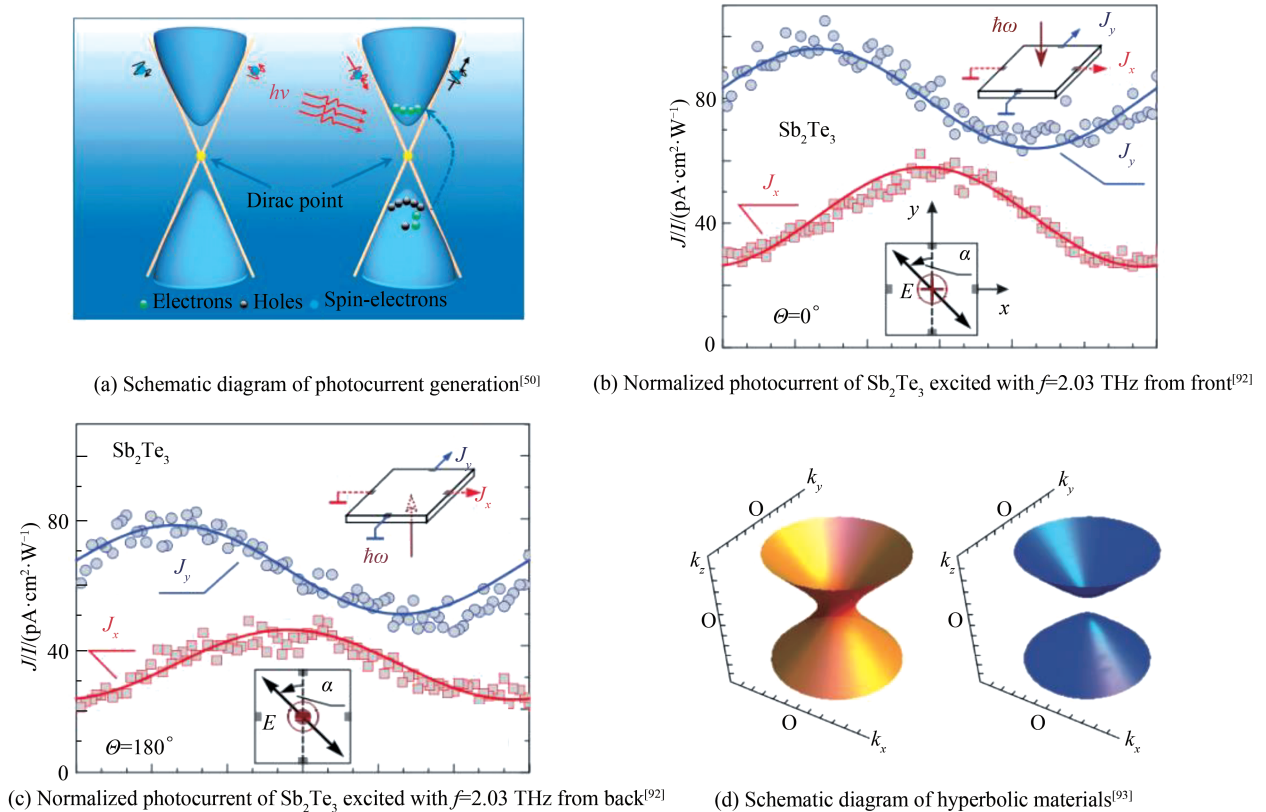
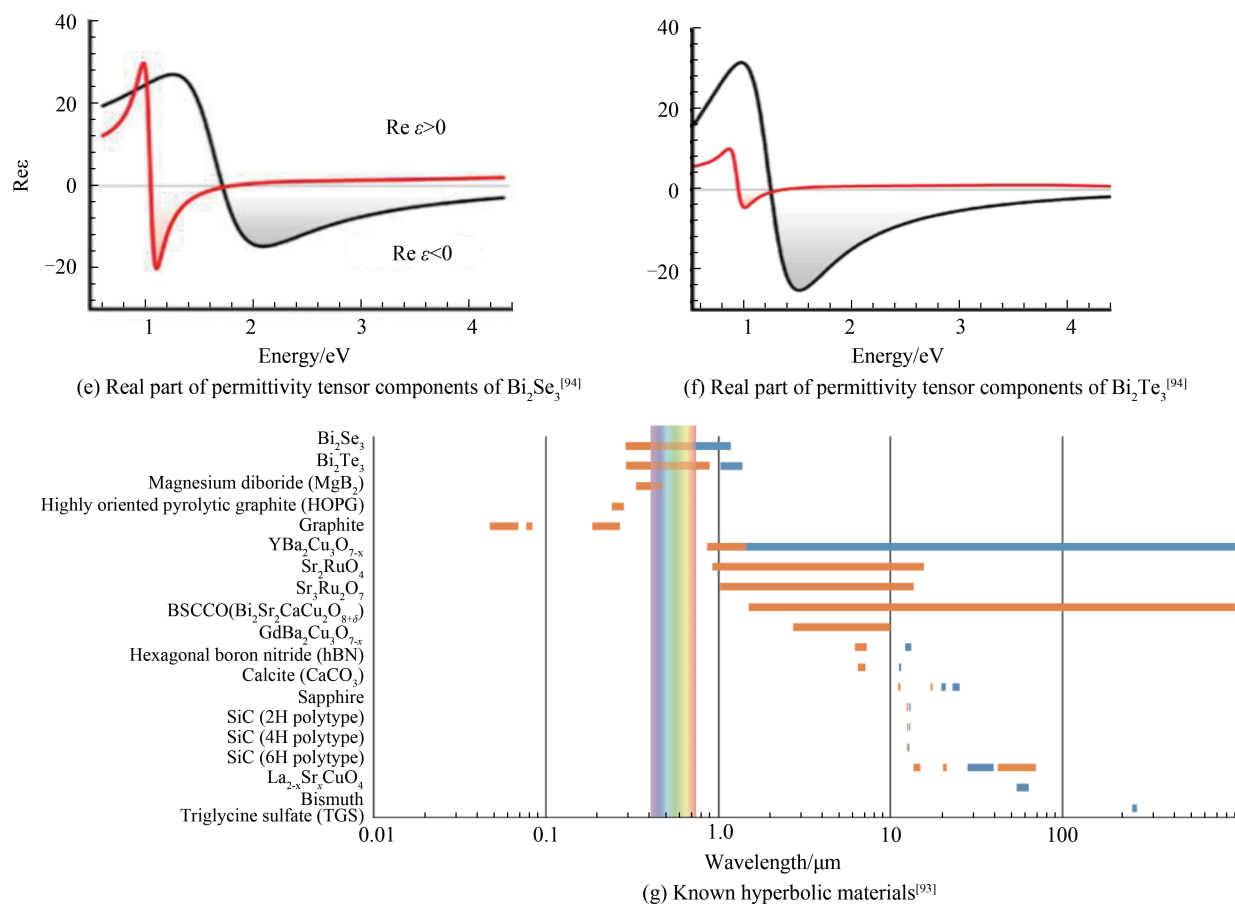


图4 TI材料的THz高次谐波产生^[87]
Fig.4 High harmonic generation in THz of TIs^[87]

2.2 光电特性

同样由于其特殊的电子能带结构, TI薄膜材料具有独特光电特性, 这主要来源于两个效应^[50, 88-89]。第一个效应是体态的光致传导效应, 在受到照射时位于价带中的电子被激发到导带, 形成电子-空穴对, 进而改变材料的导电性, 或在与其他材料形成异质结时形成光电流, 这一效应在众多材料的光电特性中占主导地位。而 TI 薄膜材料的体态能态拥有较小的能带间隙 ($\sim 0.1\text{eV}$), 这使其更加容易受到更低频率的光子的激发。这一特性使得 TI 薄膜材料拥有更加宽频(至中红外)的光电响应特性和更高的灵敏度^[50, 90], 图 5(a) 展示



图5 TI材料的光电特性和双曲性^[50, 92-94]Fig.5 Optical-electric properties and hyperbolic characteristic of TIs^[50, 92-94]

了这一效应的原理。另一个效应是其特有的类金属表面态所导致的^[89,91]。TI材料在平衡态时在其表面存在自旋电流,当受到偏振光照射时,这种平衡态将被打破,电流的形式也将被改变。这种特殊的性质导致了TI薄膜材料对不同光偏振入射的不同响应^[33]。

在2012年,MARSI M研究组利用一种新型的超快角分辨光电子能谱(Angle-Resolved Photoelectron Spectroscopy, ARPES)讨论了 Bi_2Te_3 在皮秒量级的光学响应^[6]。这种测量手段提供了表面态和体导带的瞬态载流子布居的直接实时可视化,建立了体电荷库的纳米级厚度与表面狄拉克锥中超快载流子动力学演变之间的关联。2014年,GANICHEV S D研究组利用太赫兹波段激发了用MBE方法生长在硅基上的 Bi_2Te_3 和 Sb_2Te_3 中的狄拉克费米子^[92],在室温下观察到了仅由表面态激发的光电特性(图5(b)、(c))。同一小组在2018年利用同样的材料,系统地研究了其在红外和太赫兹波段的光电流谱,并在斜入射时观察到了由入射辐射螺旋形导致的环形光电流^[95]。

2.3 各向异性和双曲材料

TI材料通常具有各向异性,例如 Bi_2Te_3 为单轴晶体,具有两个独立的介电常数,其层级结构使它的各向异性非常强,在选取适当的光入射方向时具有双折射效应,因此它在偏振的调制和检测上有所应用^[33, 73]。

对于色散关系 $a_x k_x^2 + a_y k_y^2 + a_z k_z^2 = \omega^2/c^2$,通常的材料表现出椭圆性,即 $a_x, a_y, a_z > 0$ 。当这三个参数的其中一个或两个为负数时,色散关系表现出双曲性,分别称为I型和II型双曲材料^[93-94, 96]。石墨烯在紫外波段,蓝宝石和方解石在远红外波段均表现出双曲性,除此之外还有一些人造双曲材料。双曲材料具有特殊的性质,有潜力突破衍射极限,实现超分辨率成像^[93]。和很多碲化物相似, Bi_2Te_3 在近红外具有双曲性,其作为单轴晶体具有两个独立的介电常数,当它们的实部一个大于零,另一个小于零时,材料表现为双曲性。

在2014年,ESSLINGER M研究组指出 Bi_2Te_3 等拓扑绝缘体是一种天然的双曲材料^[94],并利用椭圆偏测量观察生长的 Bi_2Se_3 晶体,以及运用有限时域数值计算的方法系统地分析了 Bi_2Te_3 和 Bi_2Se_3 作为双曲材料的

特性,指出 Bi_2Se_3 在光子能量为1.06 eV时材料的双曲性最好。图5(d)~(g)展示了包括ESSLINGER M 研究组工作在内的TI材料的双曲性。

3 TI薄膜材料在超快光子器件中的应用

TI薄膜材料的宽频强非线性及光电特性使其在超快光器件中具有非常大的应用潜力。近年来多应用于激光器、光电探测器、光调制器等超快光器件的研究工作。

3.1 激光器

在 Bi_2Te_3 等TI薄膜材料的性质中,最突出也最容易被应用的是其强三阶非线性,包括克尔效应及饱和吸收效应。其中饱和吸收效应被广泛地应用于脉冲激光器中,尤其是固体激光器及光纤激光器。另外,由于TI薄膜与石墨烯的性质较为相似,而石墨烯已被广泛地用在激光器中,TI薄膜材料在激光器中的应用也受到了较多关注。自从以 Bi_2Te_3 为代表的拓扑绝缘体被发现具有饱和吸收特性,对其在激光器中应用的研究已较为丰富^[97-118]。

3.1.1 固体激光器

世界上第一台激光器为固体激光器,固体激光器在前沿光物理研究中占有十分重要的地位。在连续激光的基础上,对连续固体激光谐振腔的性质进行调制可以获得飞秒尺度的超短脉冲激光或峰值光强高出连续光数个数量级的脉冲激光。常见的方式有调Q(Q-Switching)和锁模(Mode-Locking)两种^[119]。实现调Q和锁模有多种方式,最常用的被动锁模、被动调Q方法需利用合适的饱和吸收体。

锁模激光器是通过调制激光谐振腔的损耗,使谐振腔中各个纵模的相位保持一定关系,使得输出光相干叠加,从而实现超短脉冲的激光器。利用饱和吸收体被动地调节谐振腔的损耗是一种常用的方法,这是因为饱和吸收体通常拥有较短的恢复时间,可以将脉冲的时间长度显著缩短^[119]。对于薄膜饱和吸收材料,一种常见的方法是将其直接沉积到谐振腔的反射镜上,形成饱和吸收镜(Saturable Absorption Mirror, SAM)^[3]。而文献中利用TI薄膜材料实现锁模激光器的工作相对较少,其原因之一可能是实验上缺乏调控锁模激光器色散的组件。

相比之下,利用TI薄膜材料搭建调Q激光的实验报道比较丰富。与锁模激光器易获得较短脉冲激光不同,利用调Q激光器通常可以获得脉冲相对较长,但光强较高的激光脉冲。当谐振腔的增益小于损耗时,激光不能起振,来自泵浦光的能量被收集到谐振腔中逐渐积累。当谐振腔中能量较高时,若突然将谐振腔的损耗降低,激光便会起振,形成一个光强高出连续工作时光强数个量级的巨脉冲^[119]。在谐振腔中加入饱和吸收体同样可以作为一种被动调Q的方法,根据饱和吸收体的特性,在谐振腔中光强逐渐升高并超过某一值时,材料的饱和吸收导致透过率迅速上升,谐振腔损耗下降,激光起振并形成脉冲。TI薄膜材料因其饱和吸收特性可以被用于调Q激光的实现。表1总结了近年发表的将TI薄膜材料用于调Q固体激光器的研究。2013年,ZHANG Huaijin 研究组利用化学方法制备的 Bi_2Se_3 饱和吸收体实现了调Q脉冲Nd:GdVO₄固体激光^[116],最短脉冲为666 ns,最大输出功率达到了32 mW,如图6(d)~(f)所示。

需要注意的是,将TI薄膜材料用于固体激光有一定限制,因为薄膜材料的光热效应容易产生热量积累,导致器件损坏。这可能是将这一类材料用于固体激光器的最大限制因素^[3]。

表1 近年发表的TI薄膜材料调Q固体激光器研究(时间顺序)

Table 1 Recently reported Q-Switching solid-state lasers based on TI thin film (chronological order)

Material	Method	Gain medium	Central wavelength/nm	Repetitive frequency/kHz	Pulse length /ns	Pulse energy/nJ	Ref.	Year
Bi_2Se_3	SAM	Nd:GdVO ₄	1063	547	666	58.5	[116]	2013
Bi_2Se_3	SAM	Nd:YVO ₄	1066.6	135	0.25	0.56	[109]	2015
Bi_2Se_3	SAM	Nd:LiYF ₄	1313	161.3	0.433	1.23	[5]	2015
Bi_2Se_3	SAM	Tm:LuAG	2027	118	0.62	18.4	[103]	2017
Bi_2Te_3 /Graphene	SAM	Tm:YAP	1980	108	238	21.7 μJ	[19]	2017
Bi_2Te_3	SAM	Yb:LuPO ₄	1014.5	1670	34	3	[97]	2018
Bi_2Te_3	SAM	Tm:LuAG	2021.7	145.5	233	/	[98]	2018

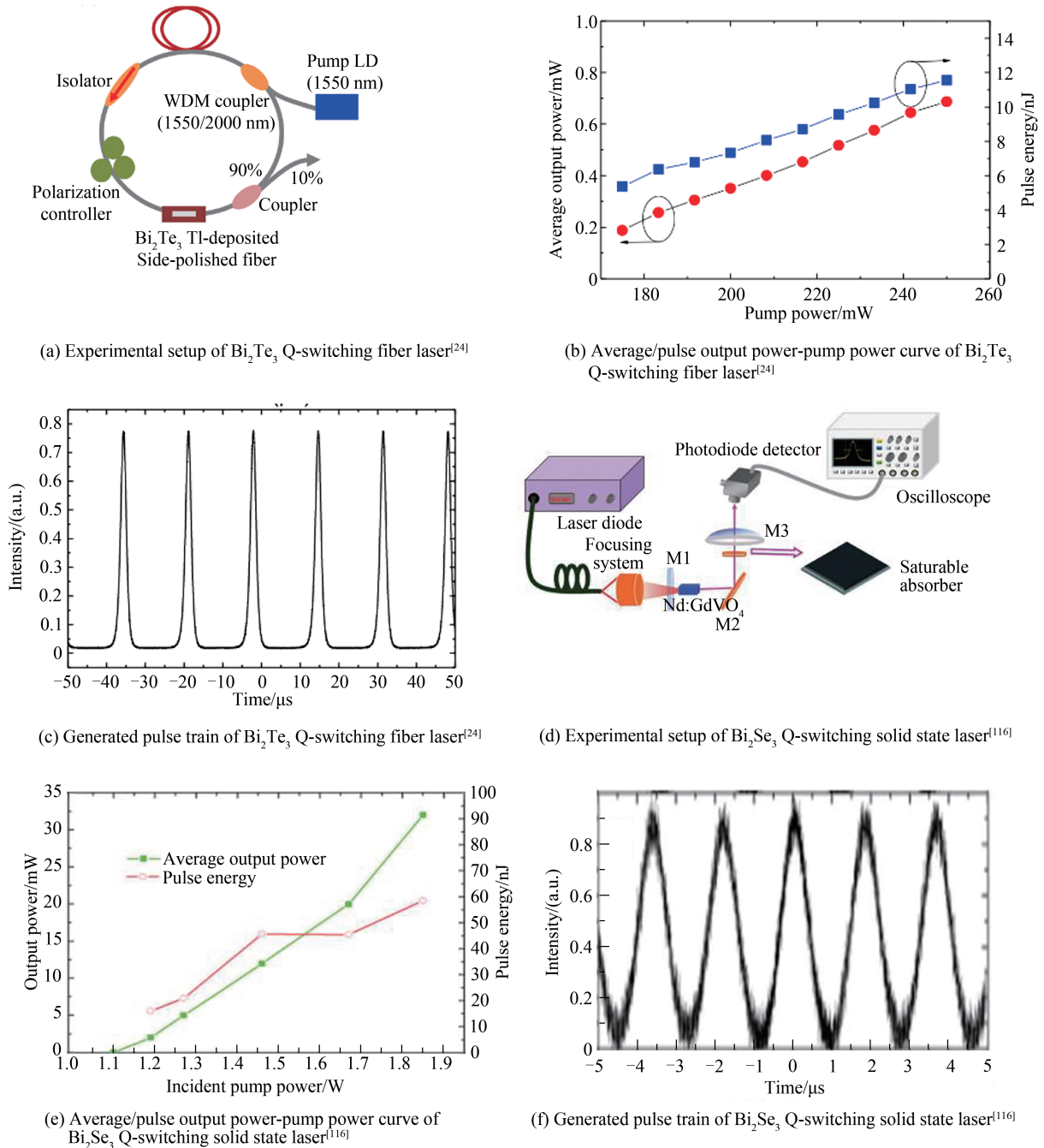


图6 基于TI材料的调Q脉冲激光器原理和实验图^[24,116]
 Fig.6 Principle and experiments of Q-switching pulse laser based on TI^[24,116]

3.1.2 光纤激光器

光纤激光器是另一种激光器,在通讯、传感器等领域有重要应用。与固体激光器不同,它使用掺有稀土元素的光纤作为增益介质。光纤激光器通常拥有较高的效率和较好的光束质量,在近年得到了充分的研究和广泛的应用^[3]。同样, Bi_2Te_3 等饱和和吸收材料可被用于锁模和调Q以产生激光脉冲。

将TI薄膜材料集成到光纤激光器中有较多种方法,可以将其置于有机物基底上,夹在两个光纤连接器之间形成三明治(Sandwiched)结构。类似地,也可以将其夹在光纤连接器和反射镜之间制成饱和和吸收镜,这种方法较为容易,也能较好地对抗机械损伤^[3]。但是因为有机物的热稳定性较差,在激光能量较高时可能在耦合处产生机械形变,从而影响激光器的性能。实际上,已经有研究证实可以将薄膜材料直接沉积在光纤的末端,可以避免有机物基底带来的影响。此外也有研究指出将材料置于锥形光纤(Tapered Fiber)的细

端或者侧边抛磨光纤(Side-Polished fiber)的平面上也是可行的,除此之外,将材料填入光子晶体光纤中的创新方法也在探索中^[3]。

最早被作为饱和吸收体用于锁模激光器的是石墨烯材料^[120]。因为TI薄膜材料的性质与石墨烯相似,近年来也有很多将其用于锁模激光的尝试。与石墨烯不同, TI薄膜材料拥有非零的带隙,使得它有很大的调制深度,对锁模激光器性能的提升有很大帮助^[82]。表2列出了近年来发表的TI薄膜材料锁模光纤激光器的部分相关研究。

表2 近年发表的部分TI薄膜材料锁模光纤激光器研究(时间顺序)
Table 2 Part of recently reported mode-locking fiber lasers based on TI thin film (chronological order)

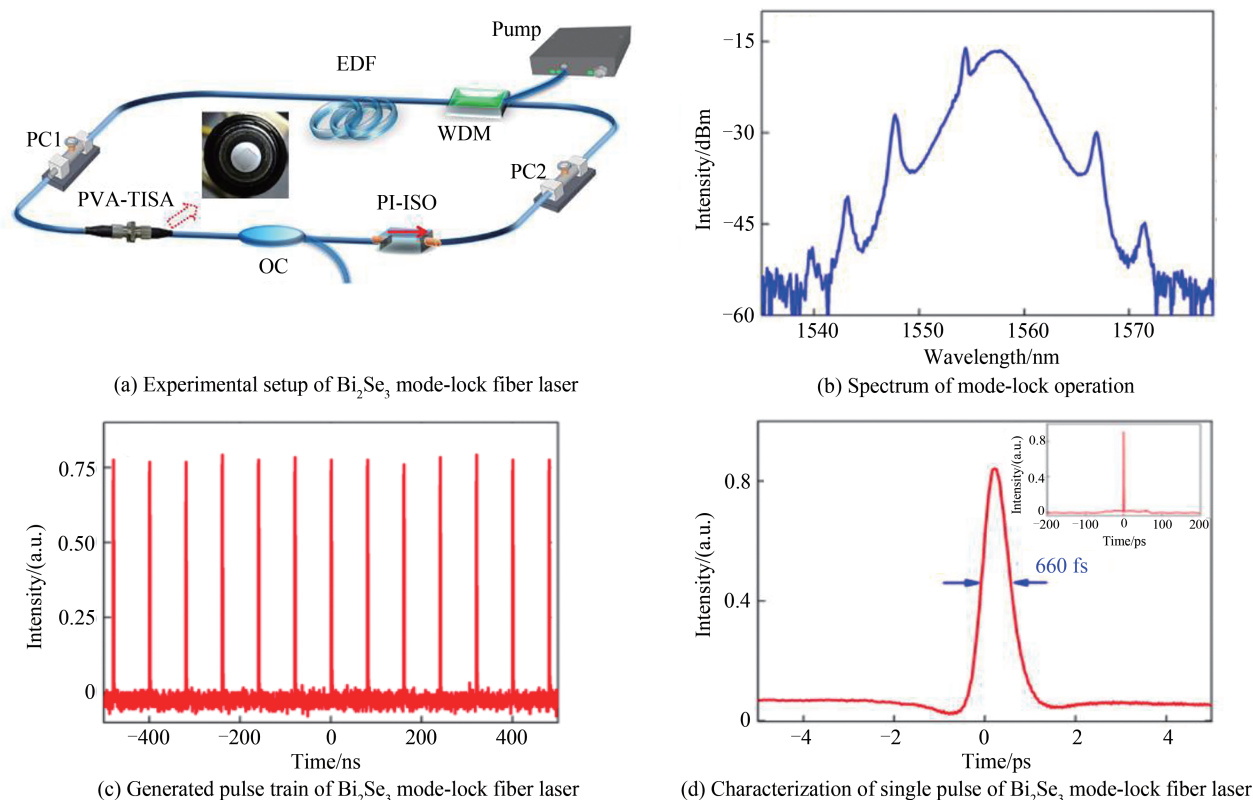
Material	Method	Gain medium	Central wavelength /nm	Repetitive frequency/MHz	Pulse length/ps	Pulse energy/nJ	Output power/mW	Ref.	Year
Bi ₂ Se ₃	SAM	EDF	1 557~1 565	1.21	1.57	/	/	[118]	2012
Bi ₂ Te ₃	Microfiber	EDF	1 558.5	2.04 GHz	2.49	/	5.02	[29]	2013
Bi ₂ Se ₃	Sandwiched	YDF	1 031.7	44.6	47	0.756	/	[115]	2014
Bi ₂ Se ₃	Sandwiched	EDF	1 557.5	12.5	0.66	/	1.8	[121]	2014
Bi ₂ Se ₃	Sandwiched	EDF	1 561.6/1 562.1	3.54	13.6 ns	2.824	/	[111]	2015
Bi ₂ Te ₃	Sandwiched	EDF	1 548~1 570	10.71	4.5	2.8	/	[107]	2015
Bi ₂ Te ₃	Microfiber	EDF	1 564.1	2.95 GHz	0.92	/	45.3	[106]	2015
Sb ₂ Te ₃	D-shaped fiber	EDF	1 568.8	33.07	0.195	/	9	[113]	2015
Sb ₂ Te ₃	D-shaped fiber	YDF	1 036.7	19.28	5.3	/	4	[105]	2016
Sb ₂ Te ₃	D-shaped fiber	YDF	1 065.3	19.28	5.9	0.81	/	[105]	2016
Bi ₂ Se ₃	Sandwiched	YDF	1 040	16	380	1.06	17.1	[100]	2018
Bi ₂ Se ₃	Microfiber	EDF	1 560.88	3.125 GHz	1.754	4.5 pJ	6.4	[102]	2018
Bi ₂ Te ₃	D-shaped fiber	TDF	1 935	27.9	0.795	0.72	/	[99]	2018

对TI薄膜材料锁模激光器的研究,很大程度上促进了对脉冲激光调制研究和薄膜材料在超快光领域的应用。这些新型的锁模激光器带来了更强的脉冲能量、更高的脉冲重复频率和对中红外波段的关注。对于调Q光纤激光器, TI薄膜材料作为饱和吸收体同样受到了关注,利用TI薄膜材料制成调Q光纤激光器使其上述几种性能得到了提高。表3列出了近年发表的TI薄膜材料调Q光纤激光器的研究进展。2014年, LUO Zhichao 研究组利用 Bi₂Se₃ 实现了中心波长为 1 557.5 nm 的锁模激光,脉冲时间约 660 fs^[121](图7)。LEE Junsu 研究组在 2015 年利用机械剥离法制备了厚数十微米的 Bi₂Te₃ 薄膜,并将其用于调Q脉冲光纤激光器,获得了长度为 1.71 μs,重复率数十赫兹的 1 890 nm 激光脉冲,其最大输出能量为 11.54 mJ^[24],如图 6(a)~(c)。2018 年,同一研究组利用 Bi₂Se₃ 在 2 μm 波段实现了长度小于 1 ps 的锁模激光^[18]。

表3 近年发表的TI薄膜材料调Q光纤激光器研究(时间顺序)
Table 3 Recently reported Q-Switching fiber lasers based on TI thin film (chronological order)

Material	Method	Gain medium	Central wavelength /nm	Repetitive frequency/kHz	Pulse length/μs	Pulse energy/nJ	Ref.	Year
Bi ₂ Se ₃	Sandwiched	YDF	1 060	8.3~29.1	1.95	17.9	[30]	2013
Bi ₂ Te ₃	Sandwiched	EDF	1 510~1 589	2.15~12.8	13~49	1 525	[117]	2013
Bi ₂ Se ₃	Sandwiched	EDF	1 530	6.2~40.1	4.9	39.8	[68]	2014
Bi ₂ Se ₃	Sandwiched	EDF	1 565	459~940	1.9~7.76	23.8	[25]	2014
Bi ₂ Se ₃	SAM	Ho-ZBLAN	2 979.9	46~81.96	1.37~4.83	3.99	[122]	2015
Bi ₂ Te ₃	Sandwiched	EDF	1 550	31.54~49.4	3.7~5.2	125	[104]	2016
Bi ₂ Se ₃	Sandwiched	EDF	1 550.5	63.2~68.9	1.49~2.54	0.797	[101]	2018

以上两个小节综述了TI薄膜材料作为饱和吸收体在固体激光器及光纤激光器中应用的研究进展。实际上,在锁模激光器中克尔效应也会对激光产生很大的影响,例如空间上的克尔透镜聚焦现象和时间上由

图7 基于TI饱和吸收体的锁模脉冲激光原理和实验^[121]Fig.7 Principle and experiments of mode-lock pulse laser based on TI saturable absorber^[121]

自相位调制引发的啁啾和自陡效应等。以TI薄膜材料为饱和吸收体的激光有潜力成为研究光学非线性的新平台^[3],目前这一方向已经引起了很多研究者的兴趣。

将TI薄膜等材料用于脉冲激光器的优势比较明显:它具有很强的非线性,相对易于制备,在结构上紧凑。不过值得注意的是,目前来看这一材料也有其劣势:容易损坏以及难以精确控制。在大功率激光中,类似材料抵抗损坏的能力不强,而且目前对这种薄膜材料光学性质的控制缺乏精确调制的方法,实验上的可重复性也较差。

3.2 片上全光开关/路由

利用TI薄膜材料的宽频强非线性特性,可以设计不同的片上光器件。全光开关是一种基本的片上全光器件,可以通过一束控制光来调控另一束信号光的通断^[43]。常见的全光开关以材料的三阶非线性为基础,通过控制光改变材料折射率,再配合微环谐振腔或其他片上微纳结构来实现对信号光通断的控制。TI薄膜材料因其强三阶非线性和相变特性很适于用作全光开关的设计^[42-43, 47]。

第2节中已经指出,TI薄膜材料拥有很大的克尔折射率 n_2 ,在与其它材料形成异质结时这一特性将会进一步增强。利用光强导致的折射率变化可以设计超快全光克尔开关,应用于片上光信号处理。其次,由TI薄膜材料的饱和吸收特性可以通过交叉吸收调制(Cross-Absorption Modulation, XAM)^[43]实现对另一束光的控制,这种方法具有较大的调制深度,利用这种方法也可以实现全光开关。另外,由于 Bi_2Te_3 材料可以在晶体和非晶体之间发生可逆转化,其在两种状态下具有不同的光学性质,这一效应也可被用于全光开关的设计。

2020年, HU Xiaoyong 研究组通过在光学微腔上覆盖 Bi_2Te_3 材料,调控谐振腔的谐振频率,实现了片上全光开关和路由^[42]。研究者利用PLD法结合聚焦离子束刻蚀方法制备了部分覆盖 Bi_2Te_3 材料的微环谐振腔,并指出其在不同输入光强下 Bi_2Te_3 材料的非线性会导致谐振频率的移动。研究者利用这一效应实现了对某一波长光的全光开关调控,并进一步实现了与光强和波长相关的全光路由(图8(a)、(b))。这一实验上的成功说明了将TI薄膜材料应用于片上全光器件中可行且具有发展潜力。

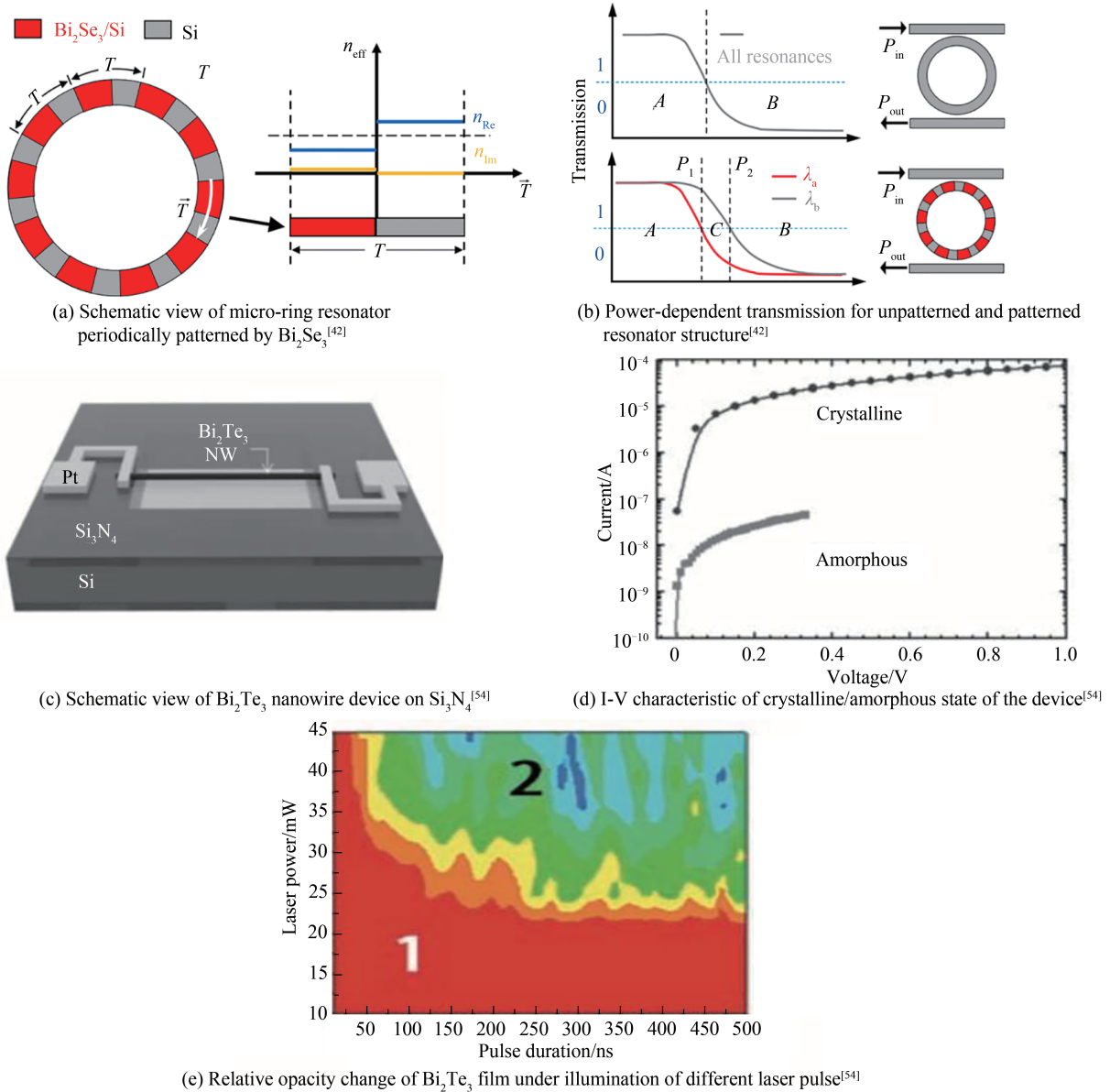


图8 基于TI材料的相变存储器 and 光开关/路由器^[42,54]

Fig.8 Phase-change memory and optical switch/router based on TIs^[42,54]

3.3 存储器

Bi_2Te_3 等材料在温度变化、外加电场或激光照射下会发生可逆的晶体-非晶体相变转化^[53-54]。这一类材料在这两种状态中有不同的反射率。通常情况下材料在晶态下对光的吸收比非晶态要强,被吸收的光根据因其引起的温度变化的不同导致材料晶化或非晶化。利用材料的这一特点可以设计非易失性的存储器,可能在将来用于片上光回路甚至用于全光芯片。通常相变存储使用Ge-Te-Bi等材料实现,有研究表明 Bi_2Te_3 同样具有相变存储的潜力^[54]。

在2011年,YOO K H小组利用不同功率和宽度的激光脉冲,在电沉积法制备的 Bi_2Te_3 纳米线中实现了光调控的相变存储^[54]。实验指出,使用毫瓦级百纳秒长度的激光脉冲可以使 Bi_2Te_3 非晶化,引起显著的反射率变化,作为“写入”操作,使用更大的脉冲可以使材料重新晶化,作为“擦除”操作。另外,电脉冲同样可以在短时间内完成“写入”和“擦除”操作,或者通过电阻测量读取存储器状态。将 Bi_2Te_3 材料用作相变存储器有潜力用于将来的全光回路中,如图8(c)~(e)所示。之后很多研究组也进行了TI材料作为相变存储器的研究,不过大部分研究限于电驱动存储器,光学存储器研究目前还较少。

3.4 光学调制器

克尔效应及饱和吸收效应除了可用于激光器中的脉冲产生,也可在激光器外对光束的相位、光强、偏振

等特性进行调控,同样可以利用的还有材料的光热特性^[45-47]。利用饱和吸收特性,可以通过一束控制光改变材料的透过率,使信号光的光强得到调制。这一方式已经被广泛地应用于石墨烯材料光调制器的研究中。由于Bi₂Te₃等TI材料与石墨烯的相似性,利用TI材料实现类似的调制是可行的。调制的方式主要有利用克尔效应、利用热光调控或者通过饱和吸收效应交叉调制。

在2015年,ZHANG Han小组利用TI材料包裹的微纤维(TI-Coated Microfiber,TCM)通过材料对泵浦光的克尔效应实现了对信号光的交叉调控^[47](图9(a)~(c))。在实验中通过提供不同功率的泵浦光成功地

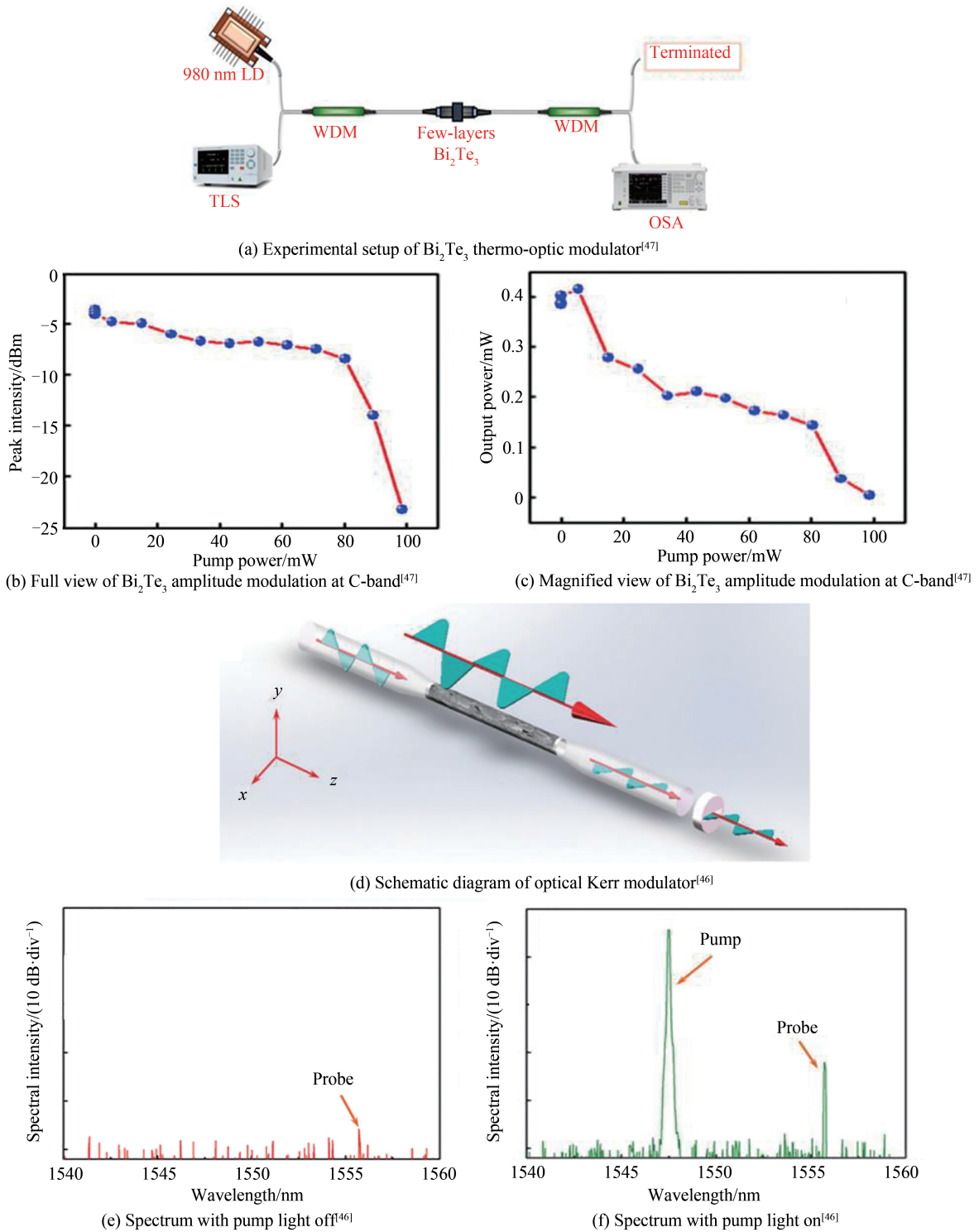


图9 基于TI材料的全光调制器^[46,47]
Fig.9 Optical modulators based on TIs^[46,47]

调整了信号光的偏振状态(State of Polarization, SoP),进而通过偏振片实现了对光强的调制。在2020年,AHMAD H研究组将用机械剥离法制备的 Bi_2Te_3 纳米片夹在光纤中,利用热光效应在C-波段实现了对信号光脉冲的交叉调控^[46](图9(d)~(f))。研究者指出,较长时间的光照射会使 Bi_2Te_3 的温度升高,引起材料层间结构的变化并引入新的能带间隙,进而导致材料吸收的增强。因此,这种方法虽然调控深度较高,但响应时间较慢,不太适用于一些超快光学的应用场景^[45]。

3.5 光电探测器

TI薄膜材料的导带和价带之间存在一个较窄的能隙。当其受到光照射时,会激发一些价电子到导带中,导致电导率发生改变^[50,89]。当TI薄膜和其他材料形成异质结时,由于材料性质的不同会在受到光照射时产生光电流。这两种效应成为了将TI材料用作光电探测器的基础^[32]。实际上,将这类材料用作光电探测器的论文和有报道的实验的数量^[32-41]仅次于激光器的相关研究。由于光-电效应在物理原理上普遍速度较慢,TI薄膜异质结光电探测器的响应速度,和前述各种应用中的时间相比较为缓慢,最快也在微秒量级^[123]。

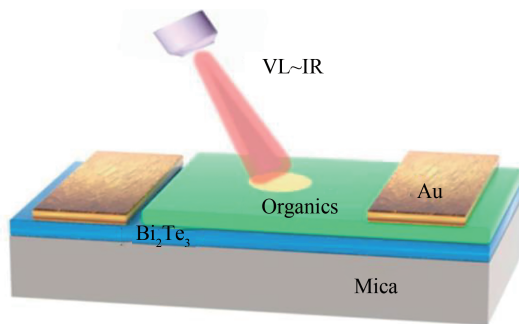
近年来在可见光波段光电探测器的发展较为迅速,但是在红外和宽频光电探测器上仍存在挑战^[32]。相比传统的半导体材料, Bi_2Te_3 拥有较小的能隙,这使得它在波长较长的波段有更大的潜力。对TI薄膜作为光电探测器的研究同样由对石墨烯的研究延伸而来,但是相比石墨烯的零能隙,TI薄膜对光的吸收更强。TI薄膜材料在光电探测中展现出了出色的宽频响应和相对较快的响应速度,应用前景十分广阔。表4列出了近年发表的基于TI薄膜材料的光电探测器研究进展,其中EQE是指外量子效率(External Quantum Efficiency, EQE), $\tau_{\text{on}}/\tau_{\text{off}}$ 分别为起始弛豫时间和衰减弛豫时间。

表4 近年发表的基于TI薄膜的光电探测器研究(时间顺序)

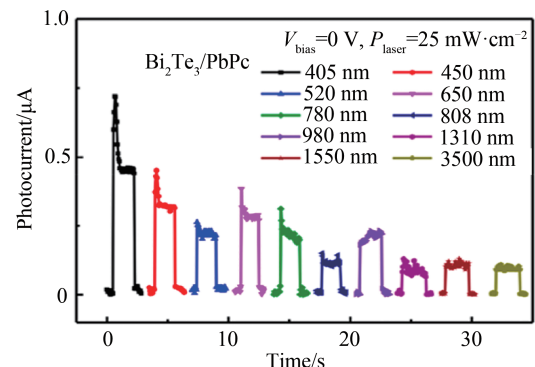
Table 4 Recently reported photodetectors based on TI thin film (chronological order)

Material	Response/($\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$)	EQE/%	Wavelength/nm	$\tau_{\text{on}}/\tau_{\text{off}}/\text{ms}$	Ref.	Year
Bi_2Te_3 (TF)/Si	1	/	370~118 000	100/100	[124]	2015
Bi_2Te_3 (C)/Graphene	35	8 400	532~1 550	/	[39]	2015
Bi_2Se_3 (TF)/Si	24.28	/	808	2.5/5.5 μs	[123]	2016
Bi_2Te_3 (TF)/Si	0.033 2	7.4	1 064~1 550	/	[125]	2017
Bi_2Te_3 (C)/SnSe/ Bi_2Te_3 (C)	5.5	1 833	370~808	40/60	[126]	2017
Bi_2Te_3 (TF)/Pentacene	14.89	2 840	450~3 500	1.89/2.47	[127]	2019
Bi_2Te_3 (TF)/CuPc	23.54	4 503	405~3 500	1.42/1.98	[33]	2019
Bi_2Te_3 (TF)/WSe ₂	20.5	/	375-1 550	0.18/0.21	[128]	2019

在2015年,LI Shaojuan研究组利用在硅和二氧化硅基底上制备的石墨烯与 Bi_2Te_3 异质结获得了比仅由石墨烯制成的光电探测器更加宽频、更灵敏、更强的光电响应^[39]。2016年,JIE Jiansheng研究组制备了一个 Bi_2Se_3 探测器,在808 nm实现了微秒级的响应^[123]。2019年,WANG Jun研究组利用在云母基底上制备的 Bi_2Te_3 -有机物异质结实现了宽频光探测^[33,128]。在对 Bi_2Te_3 -pentacene异质结光电探测器的研究中,研究者在450~3 500 nm的波长范围内观测到了光电流响应,最快响应时间达到了1.89 ms。同一研究组在另一项类似的研究中发现,由于TI薄膜非各向同性,其与有机物的异质结中存在对不同偏振方向不同的吸收率和光电流强度^[33],这使得TI薄膜异质结光电探测器可能具有分辨不同偏振光的潜力。图10展示了这一研究组的工作。同样,



(a) Structure diagram of Bi_2Te_3 /organics thin film heterojunction photodetectors



(b) Photocurrent of different wavelength light under zero bias voltage

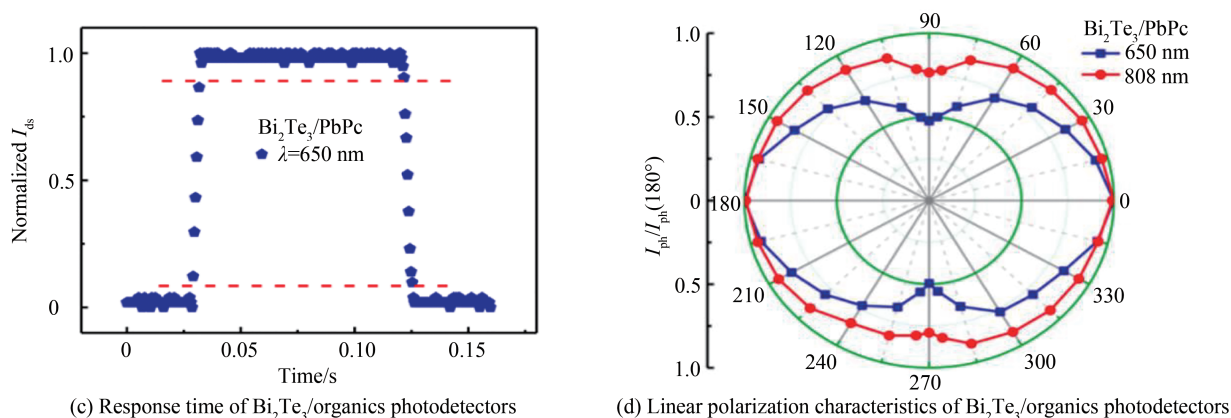


图 10 基于 TI 材料的光电探测器^[33]
Fig.10 Photodetectors based on TIs^[33]

LI Dong 研究组在 2019 年提出了一个 $\text{WSe}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 异质结光电探测器, 将响应时间加快到了 0.18/0.21 ms, 并在加有偏置电压的情况下实现了较高的响应^[35]。这些工作将进一步促进这类材料在光电探测上的应用。

3.6 其他

TI 薄膜材料拥有丰富的光热、光电及光学特性, 使得它有很大的应用潜能。除了 3.1-3.5 节所述的各种应用以外, 宽频光电响应和光热特性还可能被用于光伏领域; 其双曲特性有潜力用于突破衍射极限, 实现超分辨率成像; 其非线性光学特性也可能被应用于片上光学计算或类脑计算, 例如在全光学神经网络中充当非线性激活函数^[129]。另外, 在 2019 年, WU Xiaojun 研究组系统地研究了由飞秒激光脉冲泵浦的太赫兹辐射^[16], 也有潜力在将来得到进一步应用。

4 结论

以 Bi_2Te_3 为代表的新兴拓扑绝缘体薄膜材料因其独特的晶体结构和能带特性, 很强的宽频非线性光学特性及光电响应, 在超快激光及光器件中有很大的应用潜力。本文对此类材料在超快光器件中的应用进行了综述, 从 TI 薄膜材料的制备和性质出发, 讨论了包括调 Q 和锁模激光器、全光开关、相变存储器和光电探测器等器件, 总结了目前已被探索的 TI 薄膜材料在超快光器件中的应用进展。

同时, 也总结了一些前沿的发展方向: 1) 脉冲激光器: 更短、更强的激光脉冲是超快光学的基础和前沿, 对 TI 薄膜材料的应用研究最多的方向就是利用其宽频强非线性的独特优势, 将其用作调 Q 或锁模激光的饱和吸收体。2) 光学调制: 利用 TI 薄膜材料实现光调制器的研究仍在受到持续的关注, 借助其各向异性和非线性, 有潜力在激光器之外同样实现对光强、偏振等光信号特性的调制, 在光信号处理、光通信等领域中有重要的应用。3) 片上光子器件和全光计算芯片: 同样由于其强非线性, 再配合微环谐振腔及其他片上微纳结构, 利用克尔效应或饱和吸收效应可以实现光开关、光路由等功能, 利用其相变特性可实现数据的存储, 这些都为更复杂的片上光子器件甚至全光计算芯片提供了基础。另外, TI 材料也可能为类脑光计算提供非线性激活层, 以促进这一领域的发展, 目前研究者对 TI 材料在这一领域的关注还不太充分, TI 材料仍然具有很大的潜力待发掘。

在对已经出现的 TI 薄膜材料在超快光学器件中的应用综述以及对前沿发展方向总结之后, 本文认为, TI 薄膜材料最有前景的应用方向之一是微纳光子器件。传统技术已经能够覆盖大部分超快光学研究的需求, 其对材料尺度没有太高的要求。而当对器件提出体积更小的要求时, 需要材料拥有更独特的性质, 这正是 TI 材料所具有的特点, 因此在这一方向具有极大的发展潜力。

另外, 值得注意的是, 虽然 TI 薄膜材料超快光器件中的应用具有独特的优势, 与传统的超快光学技术相比, TI 材料拥有更强、更宽频的非线性, 可将其应用在对材料尺度有限制的情况下获得更好性能的应用场景。但本文认为, 目前薄膜 TI 材料仍不能完全取代传统的超快光学器件, 因为在目前的制备工艺中, 它的热稳定性和机械稳定性仍较差, 并且制备出的样品性质不太稳定, 可重复性也较差。这是目前薄膜 TI 材料面

临的最大挑战。希望随着加工工艺和技术的发展完善能进一步增大其应用潜力。

鉴于其独特的能带结构、丰富的制备手段以及其光学非线性特性,基于 Bi_2Te_3 等新型 TI 薄膜材料对在快速发展的超快光学及应用领域的推动具有至关重要的意义。

参考文献

- [1] GONG Qihuang, ZHAO Wei. Ultrafast science to capture ultrafast motions[J]. *Ultrafast Science*, 2021, 2021: 9765859.
- [2] QI X L, ZHANG S C. Topological insulators and superconductors[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2011, 83(4): 1057-1110.
- [3] LI S, WANG C, YIN Y, et al. Novel layered 2D materials for ultrafast photonics[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(7): 1743-1786.
- [4] ABAJO G, JAVIER F. Special issue “2D materials for nanophotonics”[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(12): 2959-2961.
- [5] XU B, WANG Y, PENG J, et al. Topological insulator Bi_2Se_3 based Q-switched Nd:LiYF₄ nanosecond laser at 1313 nm[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7674-7680.
- [6] HAJLAOUI M, PAPALAZAROU E, MAUCHAIN J, et al. Ultrafast surface carrier dynamics in the topological insulator Bi_2Te_3 [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(7): 3532-3536.
- [7] LANG M, HE L, XIU F, et al. Revelation of topological surface states in Bi_2Se_3 thin films by in situ al passivation[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(1): 295-302.
- [8] WANG G, ZHU X G, SUN Y Y, et al. Topological insulator thin films of Bi_2Te_3 with controlled electronic structure[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(26): 2929-2932.
- [9] XIU F, HE L, WANG Y, et al. Manipulating surface states in topological insulator nanoribbons [J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(4): 216-221.
- [10] ZHANG H, LIU C X, QI X L, et al. Topological insulators in Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 and Sb_2Te_3 with a single dirac cone on the surface[J]. *Nature Physics*, 2009, 5(6): 438-442.
- [11] DAI L, HUANG Z, HUANG Q, et al. Carbon nanotube mode-locked fiber lasers: Recent progress and perspectives[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(2): 749-775.
- [12] WANG J, WANG X, LEI J, et al. Recent advances in mode-locked fiber lasers based on two-dimensional materials[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(8): 2315-2340.
- [13] LIU W, LIU M, LIU X, et al. Recent advances of 2D materials in nonlinear photonics and fiber lasers[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(8): 1901631.
- [14] FU B, SUN J, WANG G, et al. Solution-processed two-dimensional materials for ultrafast fiber lasers [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(8): 2169-2189.
- [15] CHRISTOPHER J, TALEB M, MAITY A, et al. Electron-driven photon sources for correlative electron-photon spectroscopy with electron microscopes[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(15): 4381-4406.
- [16] FANG Z, WANG H, WU X, et al. Nonlinear terahertz emission in the three-dimensional topological insulator Bi_2Te_3 by terahertz emission spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(19): 191102.
- [17] LI Z, ZHANG Y, CHENG C, et al. 6.5 GHz Q-switched mode-locked waveguide lasers based on two-dimensional materials as saturable absorbers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11321-11330.
- [18] JHON Y I, LEE J, JHON Y M, et al. Topological insulators for mode-locking of 2- μm fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 1102208.
- [19] YOU Z, SUN Y, SUN D, et al. High performance of a passively Q-switched mid-infrared laser with Bi_2Te_3 /graphene composite SA[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 871-874.
- [20] SALEEM U, PERMATASARI F A, ISKANDAR F, et al. Surface plasmon enhanced nitrogen-doped graphene quantum dot emission by single bismuth telluride nanoplates[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(17): 1700176.
- [21] KOO J, LEE J, LEE J H. Integrated fiber-optic device based on a combination of a piezoelectric transducer and a bulk-structured Bi_2Te_3 topological insulator for Q-switched mode-locking of a fiber laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(11): 2175-2182.
- [22] WU D, CAI Z, ZHONG Y, et al. 635-nm visible Pr^{3+} -doped ZBLAN fiber lasers Q-switched by topological insulators SAs[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(22): 2379-2382.
- [23] LIN Y H, LIN S F, CHI Y C, et al. Using n- and p-type Bi_2Te_3 topological insulator nanoparticles to enable controlled femtosecond mode-locking of fiber lasers[J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(4): 481-490.
- [24] LEE J, JUNG M, KOO J, et al. Passively Q-switched 1.89- μm fiber laser using a bulk-structured Bi_2Te_3 topological insulator[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(1): 31-36.
- [25] YU Z, SONG Y, TIAN J, et al. High-repetition-rate Q-switched fiber laser with high quality topological insulator Bi_2Se_3 film[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11508-11515.
- [26] LEE J, KOO J, JHON Y M, et al. A femtosecond pulse erbium fiber laser incorporating a saturable absorber based on

- bulk-structured Bi_2Te_3 topological insulator[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 6165-6173.
- [27] JUNG M, LEE J, KOO J, et al. A femtosecond pulse fiber laser at 1935 nm using a bulk-structured Bi_2Te_3 topological insulator[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7865-7874.
- [28] CHEN S, CHEN Y, WU M, et al. Stable Q-switched erbium-doped fiber laser based on topological insulator covered microfiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(10): 987-990.
- [29] LUO Z C, LIU M, LIU H, et al. 2 GHz passively harmonic mode-locked fiber laser by a microfiber-based topological insulator saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(24): 5212-5215.
- [30] LUO Z, HUANG Y, WENG J, et al. 1.06 μm Q-switched ytterbium-doped fiber laser using few-layer topological insulator Bi_2Se_3 as a saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29516-29522.
- [31] ZHAO C, ZHANG H, QI X, et al. Ultra-short pulse generation by a topological insulator based saturable absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(21): 211106.
- [32] LORENZI B, TSURIMAKI Y, KOBAYASHI A, et al. Self-powered broadband photo-detection and persistent energy generation with junction-free strained Bi_2Te_3 thin films[J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 27644-27656.
- [33] YANG M, WANG J, ZHAO Y, et al. Polarimetric three-dimensional topological insulators/organics thin film heterojunction photodetectors[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(9): 10810-10817.
- [34] WANG Y, NIU Y, CHEN M, et al. Ultrabroadband, sensitive, and fast photodetection with needle-like EuBiSe_3 single crystal[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(4): 895-903.
- [35] LIU H, ZHU X, SUN X, et al. Self-powered broad-band photodetectors based on vertically stacked $\text{WSe}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$ p-n heterojunctions[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(11): 13573-13580.
- [36] YAO J, YANG G. Flexible and high-performance all-2D photodetector for wearable devices[J]. *Small*, 2018, 14(21): 1704524.
- [37] TIAN W, LIU D, CAO F, et al. Hybrid nanostructures for photodetectors[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(4): 1600468.
- [38] KIM J, PARK S, JANG H, et al. Highly sensitive, gate-tunable, room-temperature mid-infrared photodetection based on graphene - Bi_2Se_3 heterostructure[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(3): 482-488.
- [39] QIAO H, YUAN J, XU Z, et al. Broadband photodetectors based on graphene - Bi_2Te_3 heterostructure[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(2): 1886-1894.
- [40] CHEN Z, CHENG Z, WANG J, et al. High responsivity, broadband, and fast graphene/silicon photodetector in photoconductor mode[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(9): 1207-1214.
- [41] LUO CW, CHEN H J, TU C M, et al. THz generation and detection on dirac fermions in topological insulators[J]. *Advanced Optical Materials*, 2013, 1(11): 804-808.
- [42] WANG F, NIU X, HU X, et al. All-optical mode-selective router based on broken anti-pt symmetry [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(4): 044050.
- [43] CHAI Z, HU X, WANG F, et al. Ultrafast all-optical switching[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(7): 1600665.
- [44] YAN P, LIN R, RUAN S, et al. A practical topological insulator saturable absorber for mode-locked fiber laser[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 8690.
- [45] CHEN H, WANG C, OUYANG H, et al. All-optical modulation with 2D layered materials: status and prospects[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(8): 2107-2124.
- [46] AHMAD H, YUSOFF N, SAN LIM H, et al. Temporal and amplitude modulation at c-band region using Bi_2Te_3 -based optical modulator[J]. *Journal of Modern Optics*, 2020, 67(7): 638-646.
- [47] CHEN S, MIAO L, CHEN X, et al. Few-layer topological insulator for all-optical signal processing using the nonlinear kerr effect[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(12): 1769-1778.
- [48] JURCZYSZYN M, SIKORA M, CHROBAK M, et al. Studies of surface states in Bi_2Se_3 induced by the BiSe substitution in the crystal subsurface structure[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 528: 146978.
- [49] HUANG B L, KAVIANY M. Ab initio and molecular dynamics predictions for electron and phonon transport in bismuth telluride[J]. *Physical Review B*, 2008, 77(12): 125209.
- [50] LAWAL A, SHAARI A, AHMED R, et al. First-principles investigations of electron-hole inclusion effects on optoelectronic properties of Bi_2Te_3 , a topological insulator for broadband photodetector[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2017, 520: 69-75.
- [51] CHENG Y, COJOCARU-MIRÉDIN O, KEUTGEN J, et al. Understanding the structure and properties of sesqui-chalcogenides (i. E., V_2VI_3 or Pn_2Ch_3 (Pn=Pnictogen, Ch=Chalcogen) compounds) from a bonding perspective [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(43): 1904316.
- [52] ZHAO M, ZHANG J, GAO N, et al. Actively tunable visible surface plasmons in Bi_2Te_3 and their energy-harvesting applications[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(16): 3138-3144.
- [53] WANG Q, SAFDAR M, WANG Z, et al. Low-dimensional Te-based nanostructures[J]. *Advanced Materials*, 2013,

- 25(28): 3915-3921.
- [54] HAN N, KIM S I, YANG J D, et al. Phase-change memory in Bi₂Te₃ nanowires [J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(16): 1871-1875.
- [55] FANG T, LI X, HU C, et al. Complex band structures and lattice dynamics of Bi₂Te₃-based compounds and solid solutions[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(28): 1900677.
- [56] SHI H, PARKER D, DU M H, et al. Connecting thermoelectric performance and topological-insulator behavior: Bi₂Te₃ and Bi₂Te₂Se from first principles[J]. *Physical Review Applied*, 2015, 3(1): 014004.
- [57] GUO Y, LIU Z, PENG H. A roadmap for controlled production of topological insulator nanostructures and thin films[J]. *Small*, 2015, 11(27): 3290-3305.
- [58] ZHANG H, YIMAM D T, DE GRAAF S, et al. Strain relaxation in “2D/2D and 2D/3D systems”: Highly textured mica/Bi₂Te₃, Sb₂Te₃/Bi₂Te₃, and Bi₂Te₃/geTe heterostructures[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(2): 2869-2879.
- [59] AHMED A, HAN S. Fabrication, micro-structure characteristics and transport properties of co-evaporated thin films of Bi₂Te₃ on aln coated stainless steel foils[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 4041.
- [60] DUN C, HEWITT CA, LI Q, et al. Self-assembled heterostructures: selective growth of metallic nanoparticles on V2-VI3 nanoplates[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(38): 1702968.
- [61] PERANIO N, WINKLER M, DÜRRSCHNABEL M, et al. Assessing antisite defect and impurity concentrations in Bi₂Te₃ based thin films by high-accuracy chemical analysis[J]. *Advanced functional materials*, 2013, 23(39): 4969-4976.
- [62] MI J L, LOCK N, SUN T, et al. Biomolecule-assisted hydrothermal synthesis and self-assembly of Bi₂Te₃ nanostring-cluster hierarchical structure[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(5): 2523-2530.
- [63] MA Y, JOHANSSON A, AHLBERG E, et al. A mechanistic study of electrodeposition of bismuth telluride on stainless steel substrates[J]. *Electrochimica Acta*, 2010, 55(15): 4610-4617.
- [64] SCHEELE M, OESCHLER N, MEIER K, et al. Synthesis and thermoelectric characterization of Bi₂Te₃ nanoparticles[J]. *Advanced Functional Materials*, 2009, 19(21): 3476-3483.
- [65] CHEN Y L, ANALYTIS J G, CHU J H, et al. Experimental realization of a three-dimensional topological insulator, Bi₂Te₃[J]. *Science*, 2009, 325(5937): 178-181.
- [66] GOYAL V, TEWELDEBRHAN D, BALANDIN AA. Mechanically-exfoliated stacks of thin films of Bi₂Te₃ topological insulators with enhanced thermoelectric performance[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(13): 133117.
- [67] DING Z, BUX S K, KING D J, et al. Lithium intercalation and exfoliation of layered bismuth selenide and bismuth telluride [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2009, 19(17): 2588-2592.
- [68] SUN L, LIN Z, PENG J, et al. Preparation of few-layer bismuth selenide by liquid-phase-exfoliation and its optical absorption properties[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4794.
- [69] LIU J L, WANG H, LI X, et al. High performance visible photodetectors based on thin two-dimensional Bi₂Te₃ nanoplates[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 798: 656-664.
- [70] BENDT G, ZASTROW S, NIELSCH K, et al. Deposition of topological insulator Sb₂Te₃ films by an MOCVD process[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, 2(22): 8215-8222.
- [71] JIANG T, ZANG Y, SUN H, et al. Broadband high-responsivity photodetectors based on large-scale topological crystalline insulator snte ultrathin film grown by molecular beam epitaxy[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(5): 1600727.
- [72] MAKALA R S, JAGANNADHAM K, SALES B C. Pulsed laser deposition of Bi₂Te₃-based thermoelectric thin films[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(6): 3907-3918.
- [73] KONG D, DANG W, CHA J J, et al. Few-layer nanoplates of Bi₂Se₃ and Bi₂Te₃ with highly tunable chemical potential[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(6): 2245-2250.
- [74] LI H, CAO J, ZHENG W, et al. Controlled synthesis of topological insulator nanoplate arrays on mica[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2012, 134(14): 6132-6135.
- [75] WANG W, WANG W, POUDEL B, et al. High-yield synthesis of single-crystalline antimony telluride hexagonal nanoplates using a solvothermal approach[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2005, 127(40): 13792-13793.
- [76] ZHUANG A, LI J J, WANG Y C, et al. Screw-dislocation-driven bidirectional spiral growth of Bi₂Se₃ nanoplates[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, 53(25): 6425-6429.
- [77] CHEN X, MA X C, HE K, et al. Molecular beam epitaxial growth of topological insulators[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(9): 1162-1165.
- [78] JIANG G, YI J, MIAO L, et al. Bismuth telluride nanocrystal: Broadband nonlinear response and its application in ultrafast photonics[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 2355.
- [79] MIAO L, YI J, WANG Q, et al. Broadband third order nonlinear optical responses of bismuth telluride nanosheets[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(7): 2244-2251.
- [80] CHEN S, ZHAO C, LI Y, et al. Broadband optical and microwave nonlinear response in topological insulator[J]. *Optical*

- Materials Express, 2014, 4(4): 587-596.
- [81] HSIEH D, MAHMOOD F, MCIVER JW, et al. Selective probing of photoinduced charge and spin dynamics in the bulk and surface of a topological insulator[J]. Physical Review Letters, 2011, 107(7): 077401.
- [82] LU S, ZHAO C, ZOU Y, et al. Third order nonlinear optical property of Bi₂Se₃[J]. Optics Express, 2013, 21(2): 2072-2082.
- [83] SHI B, MIAO L, WANG Q, et al. Broadband ultrafast spatial self-phase modulation for topological insulator Bi₂Te₃ dispersions[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(15): 151101.
- [84] LU L, TANG X, CAO R, et al. Broadband nonlinear optical response in few-layer antimonene and antimonene quantum dots: A promising optical kerr media with enhanced stability[J]. Advanced Optical Materials, 2017, 5(17): 1700301.
- [85] HORIUCHI N. Nonlinear opportunities[J]. Nature Photonics, 2015, 9(12): 784-784.
- [86] YIN M, LI H P, TANG S H, et al. Determination of nonlinear absorption and refraction by single z-scan method[J]. Applied Physics B, 2000, 70(4): 587-591.
- [87] SCHMID C P, WEIGL L, GRÖSSING P, et al. Tunable non-integer high-harmonic generation in a topological insulator[J]. Nature, 2021, 593(7859): 385-390.
- [88] PARK D, JEONG K, MAENG I, et al. Ultrafast photo-response by surface state-mediated optical transitions in topological insulator Bi₂Te₃ nanowire[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(19): 1900621.
- [89] ZHENG K, LUO L B, ZHANG T F, et al. Optoelectronic characteristics of a near infrared light photodetector based on a topological insulator Sb₂Te₃ film[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2015, 3(35): 9154-9160.
- [90] MAUSER K W, KIM S, MITROVIC S, et al. Resonant thermoelectric nanophotonics[J]. Nature Nanotechnology, 2017, 12(8): 770-775.
- [91] BESBAS J, BANERJEE K, SON J, et al. Helicity-dependent photovoltaic effect in Bi₂Se₃ under normal incident light[J]. Advanced Optical Materials, 2016, 4(10): 1642-1650.
- [92] OLBRICH P, GOLUB L E, HERRMANN T, et al. Room-temperature high-frequency transport of dirac fermions in epitaxially grown Sb₂Te₃- and Bi₂Te₃-based topological insulators[J]. Physical Review Letters, 2014, 113(9): 096601.
- [93] NARIMANOV E E, KILDISHEV A V. Naturally hyperbolic[J]. Nature Photonics, 2015, 9(4): 214-216.
- [94] ESSLINGER M, VOGELGESANG R, TALEBI N, et al. Tetradymites as natural hyperbolic materials for the near-infrared to visible[J]. ACS Photonics, 2014, 1(12): 1285-1289.
- [95] PLANK H, PERNUL J, GEBERT S, et al. Infrared/terahertz spectra of the photogalvanic effect in (Bi, Sb)Te based three-dimensional topological insulators[J]. Physical Review Materials, 2018, 2(2): 024202.
- [96] HUO P, ZHANG S, LIANG Y, et al. Hyperbolic metamaterials and metasurfaces: Fundamentals and applications[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(14): 1801616.
- [97] YANG J, TIAN K, LI Y, et al. Few-layer Bi₂Te₃: an effective 2D saturable absorber for passive Q-switching of compact solid-state lasers in the 1- μ m region[J]. Optics Express, 2018, 26(17): 21379-21389.
- [98] QIAO J, ZHAO S, YANG K, et al. High-quality 2- μ m Q-switched pulsed solid-state lasers using spin-coating-coreduction approach synthesized Bi₂Te₃ topological insulators[J]. Photonics Research, 2018, 6(4): 314-320.
- [99] PAWLISZEWSKA M, MARTYNKIEN T, PRZEWŁOKA A, et al. Dispersion-managed Ho-doped fiber laser mode-locked with a graphene saturable absorber[J]. Optics Letters, 2018, 43(1): 38-41.
- [100] LIN J H, HUANG G H, OU C H, et al. Q-switched pulse and mode-locked pulse generation from a Yb³⁺-doped fiber laser based on Bi₂Se₃[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(3): 1-10.
- [101] LI W, ZOU J, HUANG Y, et al. 212-KHz-linewidth, transform-limited pulses from a single-frequency Q-switched fiber laser based on a few-layer Bi₂Se₃ saturable absorber[J]. Photonics Research, 2018, 6(10): C29-C35.
- [102] JIN L, MA X, ZHANG H, et al. 3 GHz passively harmonic mode-locked Er-doped fiber laser by evanescent field-based nano-sheets topological insulator[J]. Optics Express, 2018, 26(24): 31244-31252.
- [103] LIU X, YANG K, ZHAO S, et al. High-power passively Q-switched 2.0 μ m all-solid-state laser based on a Bi₂Te₃ saturable absorber[J]. Photonics Research, 2017, 5(5): 461-466.
- [104] YAN K, LIN J, ZHOU Y, et al. Bi₂Te₃ based passively Q-switched fiber laser with cylindrical vector beam emission[J]. Applied Optics, 2016, 55(11): 3026-3029.
- [105] KOWALCZYK M, BOGUSŁAWSKI J, ZYBAŁA R, et al. Sb₂Te₃-deposited d-shaped fiber as a saturable absorber for mode-locked Yb-doped fiber lasers[J]. Optical Materials Express, 2016, 6(7): 2273-2282.
- [106] YAN P, LIN R, RUAN S, et al. A 2.95 GHz, femtosecond passive harmonic mode-locked fiber laser based on evanescent field interaction with topological insulator film[J]. Optics Express, 2015, 23(1): 154-164.
- [107] WANG Q, CHEN Y, MIAO L, et al. Wide spectral and wavelength-tunable dissipative soliton fiber laser with topological insulator nano-sheets self-assembly films sandwiched by pmma polymer[J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7681-7693.
- [108] MAO D, JIANG B, GAN X, et al. Soliton fiber laser mode locked with two types of film-based Bi₂Te₃ saturable

- absorbers[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(2): A43-A46
- [109] JIA F, CHEN H, LIU P, et al. Nanosecond-pulsed, dual-wavelength passively Q-switched c-cut Nd:YVO₄ laser using a few-layer Bi₂Se₃ saturable absorber[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(1): 369-374.
- [110] GUO B, YAO Y, YANG Y F, et al. Topological insulator: Bi₂Se₃/polyvinyl alcohol film-assisted multi-wavelength ultrafast erbium-doped fiber laser[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(6): 063108.
- [111] GUO B, YAO Y, YANG Y F, et al. Dual-wavelength rectangular pulse erbium-doped fiber laser based on topological insulator saturable absorber[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(3): 94-99.
- [112] BOGUSŁAWSKI J, SOBON G, ZYBALA R, et al. Dissipative soliton generation in Er-doped fiber laser mode-locked by Sb₂Te₃ topological insulator[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(12): 2786-2789.
- [113] BOGUSŁAWSKI J, SOBON G, ZYBALA R, et al. Investigation on pulse shaping in fiber laser hybrid mode-locked by Sb₂Te₃ saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 29014-29023.
- [114] YAN P, LIN R, CHEN H, et al. Topological insulator solution filled in photonic crystal fiber for passive mode-locked fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 27(3): 264-267.
- [115] DOU Z, SONG Y, TIAN J, et al. Mode-locked ytterbium-doped fiber laser based on topological insulator: Bi₂Se₃[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24055-24061.
- [116] YU H, ZHANG H, WANG Y, et al. Topological insulator as an optical modulator for pulsed solid-state lasers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(6): L77-L83.
- [117] CHEN Y, ZHAO C, CHEN S, et al. Large energy, wavelength widely tunable, topological insulator Q-switched erbium-doped fiber laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 20(5): 315-322.
- [118] ZHAO C, ZOU Y, CHEN Y, et al. Wavelength-tunable picosecond soliton fiber laser with topological insulator: Bi₂Se₃ as a mode locker[J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27888-27895.
- [119] SILFVAST W T, KNOVEL. *Laser fundamentals*[M]. Cambridge City: Cambridge University Press, 2004.
- [120] SUN Z, HASAN T, TORRISI F, et al. Graphene mode-locked ultrafast laser[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(2): 803-810.
- [121] LIU H, ZHENG X W, LIU M, et al. Femtosecond pulse generation from a topological insulator mode-locked fiber laser[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6868-6873.
- [122] LI J, LUO H, WANG L, et al. 3- μ m mid-infrared pulse generation using topological insulator as the saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3659-3662.
- [123] ZHANG H, ZHANG X, LIU C, et al. High-responsivity, high-detectivity, ultrafast topological insulator Bi₂Se₃/silicon heterostructure broadband photodetectors[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(5): 5113-5122.
- [124] YAO J, SHAO J, WANG Y, et al. Ultra-broadband and high response of the Bi₂Te₃-Si heterojunction and its application as a photodetector at room temperature in harsh working environments[J]. *Nanoscale*, 2015, 7(29): 12535-12541.
- [125] LIU J, LI Y, SONG Y, et al. Bi₂Te₃ photoconductive detectors on si[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(14): 141109.
- [126] YAO J, ZHENG Z, YANG G. All-layered 2D optoelectronics: a high-performance UV-vis-NIR broadband SnSe photodetector with Bi₂Te₃ topological insulator electrodes[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(33): 1701823.
- [127] YANG M, WANG J, ZHAO Y, et al. Three-dimensional topological insulator Bi₂Te₃/organic thin film heterojunction photodetector with fast and wideband response from 450 to 3500 nanometers[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(1): 755-763.
- [128] SHIVANANJU B N, BAO X, YU W, et al. Graphene heterostructure integrated optical fiber bragg grating for light motion tracking and ultrabroadband photodetection from 400 nm to 10.768 μ m[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(19): 1807274.
- [129] SHEN Y, HARRIS N C, SKIRLO S, et al. Deep learning with coherent nanophotonic circuits[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(7): 441-446.