

〈综述与评论〉

拓扑绝缘体光电探测器研究进展

张玉平, 唐利斌

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 由于拓扑绝缘体具有优异的光学和电学特性以及特殊的能带结构, 使其在发展高性能的宽光谱光电探测器方面具有巨大的前景。然而由于拓扑绝缘体的发现较晚, 其在光电探测器领域的研究还处于初始阶段。因而存在许多亟待解决的问题, 如制备更高质量的拓扑绝缘体材料。本综述概述了拓扑绝缘体材料的发展历程, 并从材料制备和材料体系的角度阐述了基于拓扑绝缘体材料的光电探测器的研究进展, 并展望了拓扑绝缘体材料在光电探测器领域的发展前景。

关键词: 拓扑绝缘体; 光电探测器; 材料制备

中图分类号: TN204

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2020)01-0001-09

Research Progress in Photodetectors Based on Topological Insulators

ZHANG Yuping, TANG Libin

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Because of their excellent optical and electrical properties and the special band structure, topological insulators have great prospects in the development of high-performance broadband photodetectors. However, owing to the late discovery of topological insulators, research based on them, in the field of photodetectors, is still in its early stages. Therefore, there are several problems that need to be resolved, such as the preparation of topological insulator materials of a higher quality. This review summarizes the development of topological insulator materials and further delineates the research progress of photodetectors, based on topological insulator materials from the perspective of material preparations and material systems; furthermore, it details the prospects for the development of topological insulator materials in the field of photodetectors.

Key words: topological insulators, photodetectors, material preparation

0 引言

光电器件由于其独特的光学和电学性质, 在物理学、生物学、公共安全检测、局域通信、信息安全、环境监测、无损检测和国防科技等民用或军事领域都有着广阔的应用前景。然而, 器件的发展离不开材料的发展。随着科学技术的发展, 许多新的材料或新的性质被发现了, 从而不断地促进器件的发展。拓扑绝缘体就是近年来发现的一种具有许多新奇物理性质的材料, 随着对拓扑绝缘体材料相关研究的进一步深入, 不仅加深了人们对材料物理性质的理解, 也为其

在自旋电子学和量子计算机等领域的潜在应用研究提供了巨大的参考价值^[1]。拓扑绝缘体的特殊性质使其在基础研究、量子计算、热电效应和自旋电子器件领域都具有独特的应用前景。此外, 近年来发现拓扑绝缘体可以很好地应用于光电探测领域^[2]。

拓扑绝缘体可以很好地用于光电探测器, 主要是由于拓扑绝缘体材料具有以下特性: ①线性的色散关系, 在普通半导体中, 色散关系是非线性的。而对于拓扑绝缘体材料来说, 其能量与动量之间的色散关系是线性的, 就像光子的传输一样。这种特性可以使其对拓扑表面态的外部电场具有高的灵敏度, 因此该特

收稿日期: 2019-12-15; 修订日期: 2020-01-10.

作者简介: 张玉平 (1993-), 男, 硕士, 研究方向是光电材料。

通信作者: 唐利斌 (1978-), 男, 研究员级高级工程师, 博士生导师, 主要从事光电材料与器件研究。E-mail: scitang@163.com.

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFB2203404); 中国兵器创新团队项目 (2017CX024)。

性可以用于发展高灵敏度的光电探测器件；②高载流子迁移率，拓扑绝缘体具有一个受时间反演对称性保护的表面态，由于受到自旋耦合效应和时间反演限制，载流子在表面态上传输过程中具有极低的能量损耗，因而具有很高的载流子迁移率，这对于光电探测器件来说，具有很大的应用价值；③特殊的能带结构，拓扑绝缘体具有窄带隙的体态和零带隙的表面态，这个零带隙的表面态连接了体态的导带和价带，从而就像石墨烯一样，可以探测一个很宽的电磁波谱范围，非常适合于发展宽探测范围的光电探测器；④带隙可调，磁性杂质可以破坏拓扑绝缘体表面态的时间反演对称性，从而打开拓扑绝缘体表面态的带隙，通过这种磁性杂质的掺杂，可以实现对带隙的调控。因此，拓扑绝缘体材料在光电探测器领域具有很大的发展前景。

然而，现在国内外对基于拓扑绝缘体的光电探测器的研究还处于起始阶段。主要是因为拓扑绝缘体材料发现的时间较晚，并且在拓扑绝缘体提出以后，关于对拓扑绝缘体的研究大多集中在对量子反常霍尔效应的研究上，对其在光电探测器领域的研究较少。此外，发展基于拓扑绝缘体材料的光电探测器也存在许多需要解决的困难。例如，制备高质量的材料需要花费巨大的成本，这不符合低成本和高性能的器件的发展趋势；此外，在制备过程中很难避免一些本征掺杂以及其他杂质，因而制备得到的材料的载流子迁移率很难达到理论值。这些问题都是后续的研究中需要解决的问题，相信随着材料制备技术的成熟和科学技术的发展，拓扑绝缘体材料将在发展高性能的光电探测器件领域发挥着更加重要的作用^[3]。

本文综述了拓扑绝缘体材料的发展历程，进而论述了拓扑绝缘体材料在光电探测器领域的发展现状，这主要包括在光电探测器领域，拓扑绝缘体材料的制备现状，以及目前研究比较多的用于光电探测器的拓扑绝缘体材料的研究现状，揭示了拓扑绝缘体材料将在光电探测领域发挥着重要的作用。

1 拓扑绝缘体材料概述及其发展历程

拓扑绝缘体材料是近年发现的一种特殊的材料，是一种新的量子物质态，其具有许多新奇的物理特性^[3]。拓扑绝缘体完全不同于传统意义上的金属、绝缘体和半导体，传统固体材料按照其电子结构可以分为导体、半导体和绝缘体，然而拓扑绝缘体并不在这个分类中。如图 1 所示，拓扑绝缘体内部是有能隙的绝缘体，而表面则是具有受时间反演对称性保护的零带隙的金属表面态。与传统的半导体相比，当拓扑绝缘体的载流子获得的能量无法使其从体态的价带跃迁到导带时，则可以通过表面态来实现载流子的传输^[4-5]。这种拓扑物态的研究是近 10 年来凝聚态物理领域内最为重要和快速发展的前沿热点之一，其影响力已从凝聚态物理研究辐射到整个物理学，乃至化学、材料学、信息学、生物学、电子技术、半导体技术、能源技术等广阔的领域。此外，拓扑物态的出现给我们带来了丰富的拓扑物性，例如：拓扑边界态、无耗散、非定域响应和拓扑保护等，其中有些特性是在以前的凝聚态物理研究中从未遇到的。这些全新拓扑物性的出现有望彻底颠覆我们现有的电子、信息和半导体技术，从而推动整个技术体系跨越式进步。这也是近 10 年来，欧美日等强国竞相加大拓扑物态研究，力争抢占该领域制高点的原因。

拓扑绝缘体的发现要追溯到学者对霍尔效应的研究中，在 1879 年，美国物理学家霍尔发现了霍尔效应。在霍尔效应发现的 100 多年后，德国物理学家 Klitzing 等于 1980 年在极低温 (1.5 K) 和强的磁场 (18 T) 的条件下，对 MOS 反型层中的二维电子气做霍尔电阻的测量时，发现霍尔电阻的阻值随磁场的变化是非连续的，而是一些整数变化的电阻平台，这与之前的经典霍尔效应是完全不同的现象，这种现象被称之为整数量子霍尔效应，这个发现也获得了 1985 年的诺贝尔物理学奖。随后在 1982 年，美国贝尔实验室的 D. C. Tsui 等人，在使用更低的温度 (0.1 K) 和更强的磁场 (20 T) 研究霍尔效应时，发现霍尔电阻的

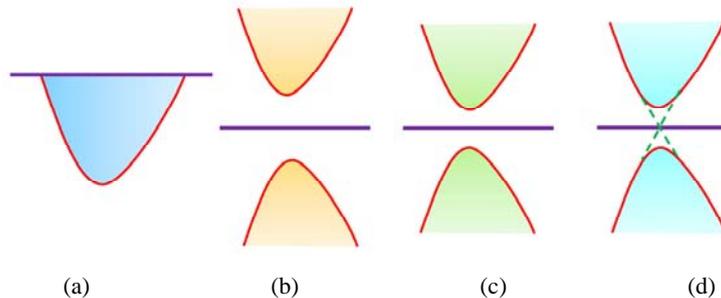


图 1 能带示意图：(a) 导体；(b) 绝缘体；(c) 半导体；(d) 拓扑绝缘体

Fig.1 Energy band diagram: (a) conductor; (b) insulator; (c) semiconductor; (d) topological insulator

平台不仅是整数变化的,也存在某些分数变化的电阻平台,后面把这种现象称为分数量子霍尔效应, D. C. Tsui 团队也因此获得了 1998 年的诺贝尔物理学奖。在接连获得几个诺贝尔物理学奖之后,凝聚态物理在科学界引起了广泛的关注,这也为拓扑绝缘体的发现奠定了基础^[3,6-7]。

在后续的探索中发现,尽管发现了量子霍尔效应,但由于强磁场和低温的特殊环境,实现量子霍尔效应的成本很高,从而限制了它的发展。因此,希望不在特定环境下也可以实现量子霍尔效应。最终,这种不需要在极低温度和强磁场环境下的量子自旋霍尔效应于 2005 年被发现,这标志着对拓扑绝缘体探索的开始。通过实验发现,拓扑绝缘体不需要特定的环境,而是由于其强大的自旋轨道耦合效应而产生自旋霍尔效应,这种自旋霍尔效应可以表现出类似于量子霍尔效应的电子态。这种量子自旋霍尔效应的发现引起了新的研究热潮,并推动了对拓扑绝缘体的研究进程。

在量子霍尔效应发现之后,对拓扑绝缘体的研究主要是围绕霍尔效应进行的。2006 年,斯坦福大学的张首晟通过理论计算,提出在 CdTe/HgTe/CdTe 量子阱中,有可能实现量子自旋霍尔效应^[8]。2007 年,德国伍尔兹堡大学的 Molenkamp 等人^[9],成功制备出了 CdTe/HgTe/CdTe 量子阱,并用实验论证了在 CdTe/HgTe/CdTe 量子阱中可以实现量子自旋霍尔效应,这也是实验论证的第一个拓扑绝缘体。2008 年,张首晟研究组预言了一种基于传统 III-V 族半导体的二维拓扑绝缘体材料^[10],就是 AlSb/InAs/GaSb/AlSb 量子阱。2009 年,中国科学院物理所的方忠等人^[11],提出在用磁性粒子掺杂硒化铋、碲化铋、碲化锑的体系中,可以实现量子反常霍尔效应。2013 年,清华大学的薛其坤团队^[12],在用分子束外延法制备的拓扑绝缘体样品中观测到了量子反常霍尔效应。随着对拓扑绝缘体霍尔效应的研究中,发现拓扑绝缘体在光电探

测领域也具有很大的应用前景^[7]。2014 年, Zang Chen 等人^[5],制备了薄的 Bi₂Se₃ 纳米片,结果表面制备的基于 Bi₂Se₃ 纳米片展现出了很好的光电性能,其响应时间为 0.7 s,响应率为 20.48 mA/W,揭示了拓扑绝缘体在光电探测器领域的巨大潜力,也为拓扑绝缘体材料在光电探测器领域的应用研究拉开了序幕。

2 拓扑绝缘体材料在光电探测器领域的研究进展

由于量子自旋霍尔效应的发现时间较晚,所以拓扑绝缘体材料的发展时间也较短。对拓扑绝缘体材料的研究主要从二维拓扑状态开始。该状态理论上是从二维材料(例如石墨烯)和二维半导体的均匀梯度得出的,最开始的获得拓扑绝缘体的方法是使材料发生体带反转。二维拓扑绝缘体主要是 Hg_{1-x}Cd_xTe,现在已被实验论证。

现在发展最为迅速的是三维拓扑绝缘体,已经发展了三代。第一代三维拓扑绝缘体是 Bi_{1-x}Sb_x 二元合金 ($x=0.07\sim 0.22$)。研究发现其比例不稳定,并且不是纯的化学相^[3]。此外, Bi_{1-x}Sb_x 的表面结构复杂,间隙狭窄。因此, Bi_{1-x}Sb_x 不适合研究和应用。随后科学家在优化三维拓扑绝缘体方面取得了更大的进步。然后出现了第二代三维拓扑绝缘体,主要包括 Bi₂Se₃, Bi₂Te₃ 和 Sb₂Te₃^[13-14]。这些拓扑绝缘体的体带隙比较窄,并且结构简单,因此非常易于制备和研究。因而它们是目前使用最为广泛的拓扑绝缘体。第三代三维拓扑绝缘体被称为拓扑晶绝缘体,其体带隙与第二代类似,只是还存在一个受镜像对称保护的边界态。如图 2 所示,现在光电探测器领域所涉及的拓扑绝缘体材料也主要是第二代三维拓扑绝缘体 Bi₂Se₃, Bi₂Te₃ 和 Sb₂Te₃, 以及第三代拓扑绝缘体 SnTe^[15]。下文将从材料的制备以及器件的研究情况阐述这些在光电探测领域研究最为广泛的几种拓扑绝缘体材料的发展现状。

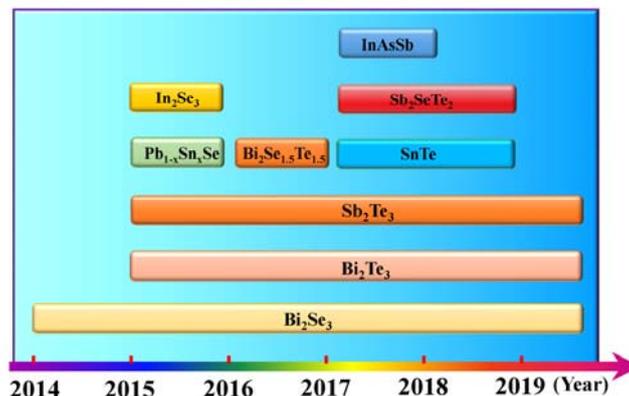


图 2 用于光电探测器的拓扑绝缘体材料

Fig.2 Topological insulator materials for photodetectors

2.1 材料制备研究进展

拓扑绝缘体具有多种制备方法,但是每种方法的优缺点不同。在实际应用中,总是选择可以制备高纯度拓扑绝缘体的低成本制备方法。此外,制备过程中的掺杂对拓扑绝缘体的性质有重要影响。目前在拓扑绝缘体的制备过程中,杂质通常是不可避免的。这些杂质对拓扑绝缘体的性质有不同的影响,例如,制备出来的 Sb_2Te_3 拓扑绝缘体通常为 p 型。另外,还可以人工控制杂质以改变拓扑绝缘体的参数,从而获得所需的性质。例如,可以通过控制掺杂元素和数量来获得 n 型和 p 型的三维拓扑绝缘体。在光电探测领域,通常对光敏材料的质量有很高的要求,同时又希望能尽可能地降低材料的制备成本,本节介绍了几种目前在光电探测器领域,已经报道出来的拓扑绝缘体的制备方法^[16]。

如表 1 所示,拓扑绝缘体材料主要通过范德华外延法 (Van der Waals epitaxial), 物理气相沉积法 (physical vapor deposition), 分子束外延 (molecular beam epitaxy)^[17], 化学气相沉积 (chemical vapor deposition) 和激光脉冲沉积法 (pulsed laser deposition)

等制备。范德华外延的原理比较简单,但是其对衬底具有选择性。分子束外延法制备的拓扑绝缘体具有很高的质量,但其衬底温度较高、易受衬底的匹配限制,且设备较昂贵。溶剂热法需要在高温高压的条件下,且对于薄膜样品来说,不易控制。化学气相沉积和物理气相沉积是种成本较低,适合实验室制备的方法。高质量的拓扑绝缘体是制备出优异性能的光电器件的关键,因而寻找一种合适的制备方法是至关重要的。在拓扑绝缘体材料的制备中,既能制备出高质量的材料又能极大地降低制备成本的方法是急缺的。

2.2 光电探测器研究进展

探测器按照探测机理可以分为热探测器和光子探测器,而光子探测器又可以分为光导型探测器和光伏型探测器。在目前报道的涉及拓扑绝缘体的光电探测器中,主要是对光伏型器件的研究,光导型的光电探测器研究较少。光伏型光电探测器的探测机理是基于光生伏特效应,当光辐射到光电探测器的光敏层时,会产生光生载流子,进而把光信号转变为可测量的电信号。而现在研究的拓扑绝缘体光电探测器,主要是基于 Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 和 Sb_2Te_3 材料,近年来也有一些基

表 1 用于光电探测器的拓扑绝缘体材料的制备技术和器件性能统计表

Table 1 Preparation technology and device performance statistics table of photodetectors based on topological insulator materials

Materials	Bandgap/eV	Preparation methods	Wavelength /nm	Device performance		Ref.
				detectivity /Jones	Responsivity /(A·W ⁻¹)	
$\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$	0.43	Van der Waals epitaxial	375-980	-	5.95(473 nm)	[18]
$\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$	0.4	Van der Waals epitaxial	375-2000	1.14×10^{12} (632 nm)	0.21(632 nm)	[19]
In_2Se_3	1.3	Van der Waals epitaxial	633	-	1650	[20]
$\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Si}$	0.3	Physical vapor deposition	300-1100	4.39×10^{12} (808 nm)	24.28(808 nm)	[21]
Bi_2Se_3	-	Solvothermal synthesis	532	-	2.048×10^{-2}	[5]
Bi_2Se_3 nanowire /Si	0.4	Vapor-liquid-solid method	380-1310	2.38×10^{12} (808 nm)	924.2(808 nm)	[22]
Graphene/ Bi_2Se_3	-	Molecular beam epitaxy	3500	1.7×10^9	1.97	[23]
$\text{Bi}_2\text{Se}_{1.5}\text{Te}_{1.5}$	-	Solvothermal synthesis	450-1550	-	-	[24]
Bi_2Se_3 nanowire	-	Mechanical exfoliation	532-1064	7.5×10^9 (1064 nm)	300(1064 nm)	[25]
$\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Si}$ nanowire	-	Wet chemical route	890	2.35×10^{13} (890 nm)	9384	[26]
Graphene/ Bi_2Te_3	-	Chemical vapor deposition	523-1550	-	35(532 nm)	[27]
$\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Si}$	0.165	Molecular beam epitaxy	1550	-	3.32×10^{-2} (1550 nm)	[28]
$\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Si}$	0.15	Pulsed laser deposition	370-1550	2.5×10^{11} (635 nm)	1(635 nm)	[29]
$\text{WS}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$	-	Pulsed laser deposition	370-1550	2.3×10^{11}	30.4	[30]
SnTe/Si	-	Physical vapor deposition	1064-1550	1.54×10^{14} (1064 nm)	2.36(1064 nm)	[31]
SnTe/Si	0.18	Chemical vapor deposition	254-1550	8.4×10^{12}	0.128	[32]
SnTe	0.25	Molecular beam epitaxy	405-3800	-	3.75(2003 nm)	[33]
Sb_2Te_3	0.26	Molecular beam epitaxy	980	1.22×10^{11}	21.7	[34]
$\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{STO}$	0.3	Molecular beam epitaxy	405-1550	8.6×10^{10} (405 nm)	4.8×10^{-3} (405 nm)	[35]
$\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{Si}$	-	Physical vapor deposition	520-980	-	1.36×10^{-3}	[36]

于 SnTe 材料的光电探测器被报道出来。因此,本节主要阐述基于这 4 种材料的光电探测器的发展现状。

2.2.1 基于 Bi₂Se₃ 材料的光电探测器

在基于拓扑绝缘体的光电探测器的研究中,三维拓扑绝缘体 Bi₂Se₃ 材料是最早进入光电探测领域的。Bi₂Se₃ 具有一个约为 0.3 eV 的窄带隙,因而被认为在发展高性能的红外和太赫兹探测器方面具有很大的前景。如图 3(a)所示^[37],Bi₂Se₃ 具有一个层状的晶体结构,沿着 c 轴的方向,由 5 原子层按照 Se-Bi-Se-Bi-Se 的顺序,周期性的堆叠而成。自从 2014 年基于 Bi₂Se₃ 纳米片的光电器件展现出了很好的光电探测性能后,Bi₂Se₃ 材料在光电探测领域有了更加广泛的研究。Biswajit Das 报道了一个 Bi₂Se₃/Si 纳米线的近红外探测器^[26],结构如图 3(b)所示,在 890 nm 的光照下,其响应率达到了 938.4 A/W,探测率达到了 2.35 × 10¹³ Jones,展现出了很高的光电探测性能。除了 Bi₂Se₃ 与 Si 纳米线的光电探测器外,也有基于 Bi₂Se₃ 纳米线的光导探测器被报道出来^[38],如图 3(c)所示,该器件在紫外到近红

外的范围内,均匀光电响应。此外,Wang 等人也报道了基于 Bi₂Se₃ 薄膜的光导探测器(图 3(d))^[37],在 1456 nm 的光照下,其响应率达到了 23.8 A/W,外量子效率达到了 2035%,虽然响应率没有 Biswajit Das 报道的器件高,但是其探测的范围更大了。基于 pn 结的光电探测器是最常见的一种,这种结构在基于拓扑绝缘体材料的光电探测器研究中也很有广泛,但目前的研究还处于初始阶段,对于 Bi₂Se₃ 材料,现在的报道主要是基于 Bi₂Se₃ 和 Si 结合的器件,器件结构如图 3(e)所示^[21],Bi₂Se₃ 和 Si 的能带结构示意图及光电响应机理如图 3(f)所示^[22],该器件在 808 nm 的光照下的响应率值为 24.28 A/W,探测率值为 4.39 × 10¹² Jones,展现出其在发展高性能的红外光电探测器件方面具有巨大的潜力。

2.2.2 基于 Bi₂Te₃ 材料的光电探测器

在对基于拓扑绝缘体材料的光电探测器的研究中,基于 Bi₂Te₃ 材料的光电探测器是近几年研究最为广泛的。Bi₂Te₃ 的晶体结构类似于 Bi₂Se₃,具有一个

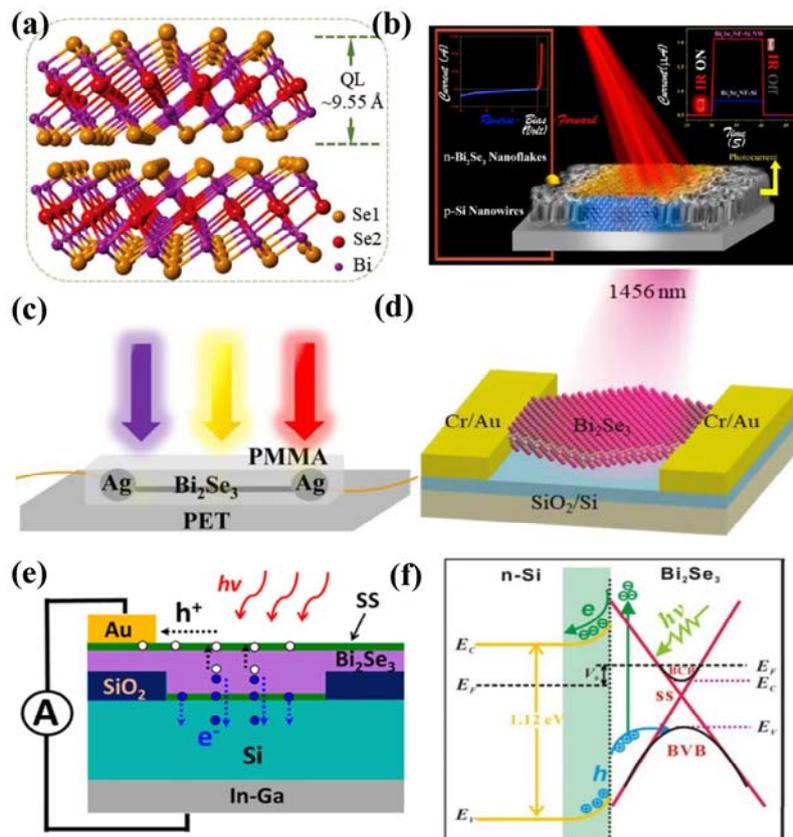


图 3 Bi₂Se₃ 材料结构及其光电探测器: (a) Bi₂Se₃ 晶体结构示意图; (b) Bi₂Se₃/Si 纳米线近红外探测器; (c) Bi₂Se₃ 纳米线光导探测器; (d) Bi₂Se₃ 薄膜光导探测器; (e) Bi₂Se₃/Si 探测器; (f) Bi₂Se₃/Si 能带示意图

Fig.3 Bi₂Se₃ material structure and photodetector based on it: (a) Schematic diagram of Bi₂Se₃ crystal structure; (b) Bi₂Se₃/Si nanowire near-infrared photodetector; (c) Bi₂Se₃ nanowire photoconductive detector; (d) Bi₂Se₃ thin film photoconductive detector; (e) Bi₂Se₃/Si photodetector; (f) Schematic diagram of the Bi₂Se₃/Si energy band

由范德华力结合的层状晶体结构，沿着 c 轴的方向，由 5 原子层按照 Te-Bi-Te-Bi-Te 的顺序，周期性的堆叠而成。 Bi_2Te_3 材料作为三维拓扑绝缘体材料的第二代材料，其化学成分稳定，较容易制备，因而可以广泛地用于光电探测器的研究。此外，经测量 Bi_2Te_3 表面的载流子迁移率高达 $\sim 5000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ，并且具有一个很窄的体带隙 (0.17 eV)，因而很适合用于发展高性能的长波长光电探测器。Qiao 等人报道了基于石墨烯和 Bi_2Te_3 的光电探测器^[27]，该器件在 532 nm, 980 nm 和 1550 nm 的光照下均有光电响应 (图 4(a))，实现了一个宽波长范围的光电探测。Liu 等人报道了一个基于 Bi_2Te_3 的光导探测器^[28]，器件结构如图 4(b)所示，该光导器件在 1064 nm 和 1550 nm 的光照下都有光电响应，但其响应率较低，仅为 $\sim \text{mA/W}$ ，这可能是由于其器件结构导致的。Sharma 等人也报道了一个基于 Bi_2Te_3 纳米线的光导型探测器 (图 4(c))^[39]，其电磁波谱响应范围为 325~1550 nm，该器件在 1550 nm 的光照下，其响应率达到了 74 A/W ，展现出了优异的光电响应特性。在 Bi_2Te_3 材料的制备过程中，由于一些不可避免的本征掺杂，制备出来的 Bi_2Te_3 材料通常为 n 型材料，因而可以与合适的 p 型材料结合，形成 pn 结。目前，最常见的是和 n 型 Si 的结合，图 4(d)就是 Wang 等人报道的 p 型 Bi_2Te_3 和 n 型 Si 结合的异质结光电探测器^[40]，展现出了很好的光电探测器性能，也揭示了通过把 p 型 Bi_2Te_3 材料和不同的 n 型半导体材料结合是发展高性能的宽光谱探测器的很好方向。图 4(e)给出了近几年报道的基于 Bi_2Te_3 的光电探测器的

电磁波谱响应范围及器件响应率，可以看出， Bi_2Te_3 材料在发展高性能宽光谱光电探测器方面具有很大的潜力^[27-30]。

2.2.3 基于 Sb_2Te_3 材料的光电探测器

Sb_2Te_3 材料并不是一种新的材料，长期以来，主要是关注其热电性质，其应用也主要是在热电制冷技术和相变存储器领域，其光学性能的研究比较少。 Sb_2Te_3 薄膜材料，是一种典型的 V-VI 族半导体材料。其晶体结构如图 5(a)所示^[34]，具有 $R\bar{3}m$ 空间点群结构。 Sb_2Te_3 的每个晶胞是由 Te-Sb-Te-Sb-Te 的顺序沿 c 轴方向堆叠而成。近几年，随着拓扑绝缘体概念的提出，其光电性能也被关注。2015 年，郑等人报道了一个基于拓扑绝缘体薄膜 (Sb_2Te_3) 的近红外光电探测器 (图 5(b))^[34]，该器件对 980 nm 的光有很好的响应，并且响应率达到 21.7 A/W ，揭示了 Sb_2Te_3 拓扑绝缘体材料在光电探测器领域的应用前景。如图 5(c)所示^[41]， Sb_2Te_3 薄膜拓扑绝缘体材料的表面态连接了价带和导带，从而可以实现一个宽的探测波段，利用这一特性，可以发展宽探测范围的光电探测器。2017 年，Huang 等人报道了一个基于 Sb_2SeTe_2 纳米片的光导型的探测器^[42]，结构如图 5(d)所示，在偏置电压为 1 V 的条件下，其响应率达到了 2293 A/W ，光电导增益达到了 5344，展现出优异的光电响应特性。同年，Sun 等人报道了一个基于 Sb_2Te_3 -STO 异质结型的光伏探测器 (图 5(e))^[35]，其光电响应范围为 $405 \sim 1550 \text{ nm}$ ，实现了宽波长范围的光电探测，揭示了其在发展宽光谱探测器的应用前景。此外，由于自旋耦合效应和时

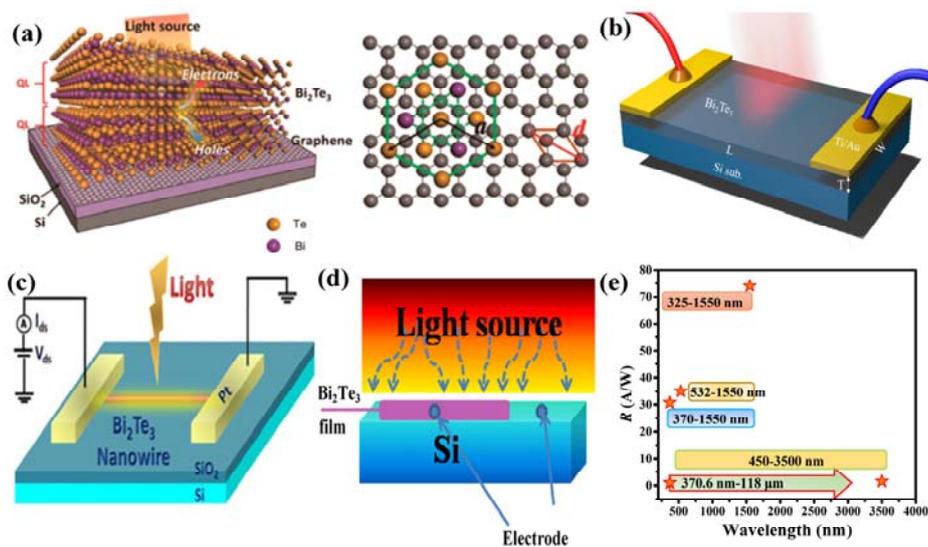


图 4 基于 Bi_2Te_3 材料的光电探测器: (a) Bi_2Te_3 /graphene 光电探测器; (b) Bi_2Te_3 薄膜光导探测器; (c) Bi_2Te_3 薄膜光导探测器; (d) Bi_2Te_3 /Si 光电探测器; (e) 基于 Bi_2Te_3 的光电探测器

Fig.4 Photodetectors based on Bi_2Te_3 material: (a) Bi_2Te_3 /graphene photodetector; (b) Bi_2Te_3 thin film photoconductive detector; (c) Bi_2Te_3 thin film photoconductive detector; (d) Bi_2Te_3 /Si photodetector; (e) Bi_2Te_3 based photodetector

间反演限制, 表面态上的载流子的能量损耗极低, 具有很高的载流子迁移率, 因而有利于发展低功耗和高响应率的器件。在光电探测器领域, 光电探测器一直朝着低功耗、宽波段、高性能、紧凑型和高集成的方向发展。因此, Sb_2Te_3 拓扑绝缘体材料在光电探测领域有着巨大的应用前景。

2.2.4 基于 SnTe 材料的光电探测器

SnTe 是一种常见的拓扑晶绝缘体材料, 其晶体结构如图 6(a)所示^[34], SnTe 中的键是强共价键, 与拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 和 Bi_2Te_3 中五倍层 (quintuple layer) 之间的范德华相互作用完全不同。与其他拓扑绝缘体材料相比, SnTe 更易于合成, 因而在发展光电探测器件方面具有很大潜力。对基于 SnTe 材料的光电探测器的研究起步较晚, 现在已经报道出来的基于 SnTe 的光电探测器也很少。2017 年, Jiang 等人通过分子束外延法制备得到了高质量的 SnTe 薄膜^[33], 并研究了基于 SnTe 薄膜的光导型光电探测器, 其结构如图 6(b)所示, 研究指出基于 SnTe 薄膜的器件在可见光到中波红外的范围 ($405\text{ nm}\sim 3.8\text{ }\mu\text{m}$) 内有稳定的光电响应, 并在 2003 nm 的光照下, 得到器件的响应率为 3.75 A/W , 这与其他拓扑绝缘体材料的光电探测器相比, 其实现了对更长波长的探测。Gu 等人也研究了拓扑晶绝缘体 SnTe 和 Si 的异质结光伏探测器^[32], 器件的探测范围为 $254\sim 1550\text{ nm}$, 其探测率达到 $8.4\times 10^{12}\text{ Jones}$, 展现出很高的光电探测性能。此外, Yang 等人报道了基于 SnTe 的场效应晶体管形式的光电探测器^[43], 其具有一个宽的探测范围 ($254\sim 2650\text{ nm}$), 在 4650 nm 的光照下, 其响应率达到了 4.17 A/W 。如

图 6(c)和(d)所示, Yang 等人还研究了场效应晶体管的通道长度对器件响应率和响应时间的影响, 这对研究基于拓扑绝缘体的高性能光电探测来说, 具有重要的意义。

2.2.5 其他光电探测器

随着对拓扑绝缘体的进一步研究, 更多的拓扑绝缘体材料被发现, 如 KHgSb , PtLuSb , HgS , HgTe 和 CaAgAs 等^[44-48], 但这些材料大多应用于量子霍尔效应方面的研究, 还未涉及光电探测领域。现阶段, 在基于拓扑绝缘体的光电探测领域, 除了基于 Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 和 SnTe 的光电探测器被研究之外, 还有一些其他拓扑绝缘体光电探测器。如基于 In_2Se_3 , $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ 和 Sb_2SeTe_2 等材料的光电探测器, 但报道的还比较少, 其研究还处于初始阶段^[49-50]。

3 结论及展望

随着光电探测器在越来越多的领域发挥着更加重要的作用, 对光电探测器的性能要求也越来越高。拓扑绝缘体具有高的载流子迁移率、优异的光学性质、特殊的能带结构等特性, 在发展高性能的光电探测器方面, 具有巨大的前景。本文综述了拓扑绝缘体材料的发展历程, 进而论述了拓扑绝缘体材料在光电探测器领域的发展现状, 这主要包括在光电探测器领域, 拓扑绝缘体材料的制备现状, 以及目前研究比较多的用于光电探测器的拓扑绝缘体材料的研究现状。随着科学技术的发展, 将会有更多基于拓扑绝缘体的光电探测器被研究, 拓扑绝缘体材料在光电探测领域将会发挥重要的作用。

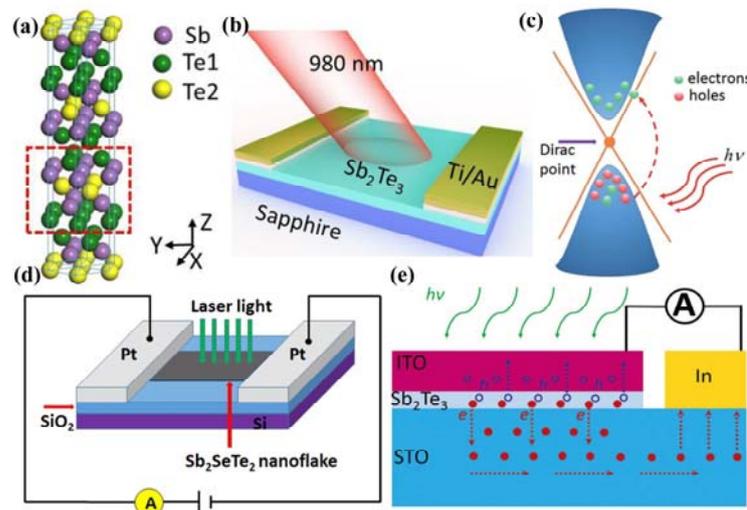


图 5 Sb_2Te_3 材料结构及其光电探测器: (a) Sb_2Te_3 晶体结构示意图; (b) Sb_2Te_3 光导探测器; (c) Sb_2Te_3 能带示意图; (d) Sb_2SeTe_2 光导探测器; (e) $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{STO}$ 光电探测器

Fig.5 Sb_2Te_3 material structure and photodetectors based on it: (a) Sb_2Te_3 crystal structure schematic; (b) Sb_2Te_3 photoconductive detector; (c) Sb_2Te_3 energy band schematic; (d) Sb_2SeTe_2 photoconductive detector; (e) $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{STO}$ photodetector

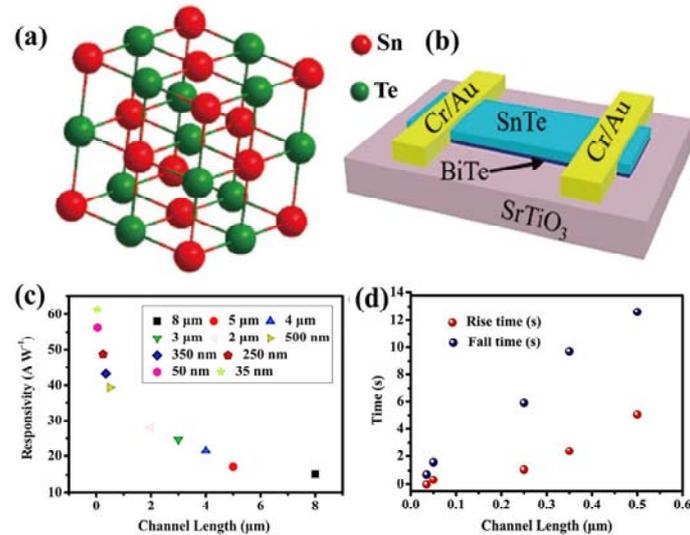


图 6 SnTe 材料结构及其光电探测器: (a) SnTe 晶体结构示意图; (b) SnTe 光导探测器; (c) 场效应晶体管器件的响应率与通道长度的关系; (d) 场效应晶体管器件的响应时间与通道长度的关系

Fig.6 SnTe material structure and photodetectors based on it: (a) Schematic diagram of SnTe crystal structure; (b) SnTe photoconductive detector; (c) Relationship between responsivity of FET device and channel length; (d) Relationship between response time of FET device and channel length

参考文献:

[1] Mciver J W, Hsieh D, Steinberg H, et al. Control over topological insulator photocurrents with light polarization[J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, **7**(2): 96-100.

[2] ZHANG X, WANG J, ZHANG S C. Topological insulators for high-performance terahertz to infrared applications[J]. *Physical Review B*, 2010, **82**(24): 245107.

[3] TIAN Wenchao, YU Wenbo, SHI Jing, et al. The property, preparation and application of topological insulators: a review[J]. *Materials*, 2017, **10**(7): 814.

[4] Junck A, Refael G, Von Oppen F. Photocurrent response of topological insulator surface states[J]. *Physical Review B*, 2013, **88**(7): 075144.

[5] ZANG C, QI X, REN L, et al. Photoresponse properties of ultrathin Bi₂Se₃ nanosheets synthesized by hydrothermal intercalation and exfoliation route[J]. *Applied Surface Science*, 2014, **316**: 341-347.

[6] 韦庞. 基于量子反常霍尔效应的器件的探索和研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.

WEI Pang. Exploration and research on micro-devices based on quantum anomalous hall effect[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.

[7] 吴杏华. 拓扑绝缘体材料的制备及其光学性能研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.

WU Xinghua. Study on the preparation and optical properties of topological insulators[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.

[8] Bernevig B A, Hughes T L, ZHANG S C. Quantum spin Hall effect and topological phase transition in HgTe quantum wells[J]. *Science*, 2006, **314**(5806): 1757-1761.

[9] Koenig M, Buhmann H, Molenkamp L W, et al. The quantum spin Hall effect: theory and experiment[J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2008, **77**(3): 1105-1125.

[10] LIU C, Hughes T L, QI X L, et al. Quantum spin Hall effect in inverted type-II semiconductors[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(23): 236601.

[11] ZHANG H J, LIU C X, QI X L, et al. Topological insulators in Bi₂Se₃, Bi₂Te₃ and Sb₂Te₃ with a single Dirac cone on the surface[J]. *Nature Physics*, 2009, **5**(6): 438-442.

[12] XUE Q K. Experimental Realization of Quantum Anomalous Hall Effect[C/OL]//*Asia Communications and Photonics Conference*. 2013, 59(1): <http://meetings.aps.org/link/BAPS.2014.MAR.D39.2>.

[13] ZHANG H B, LI H, SHAO J M, et al. High-performance Bi₂Te₃-based topological insulator film magnetic field detector[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, **5**(22): 11503-8.

[14] 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.

[15] Tanaka Y, Ren Z, Sato T, et al. Experimental realization of a topological crystalline insulator in SnTe[J]. *Nature Physics*, 2012, **8**(11): 800-803.

[16] ZENG Z, Morgan T A, FAN D, et al. Molecular beam epitaxial growth of Bi₂Te₃ and Sb₂Te₃ topological insulators on GaAs(111) substrates: a potential route to fabricate topological insulator p-n junction[J]. *AIP Advances*, 2013, **3**(7): 072112.

[17] CHEN X, MA X C, HE K, et al. Molecular beam epitaxial growth of topological insulators[J]. *Advanced Materials*, 2015, **23**(9): 1162-1165.

[18] WANG Qisheng, XU Kai, WANG Zhenxin, et al. Van der waals epitaxial ultrathin two-dimensional nonlayered semiconductor for highly efficient flexible optoelectronic devices[J]. *Nano Lett.*, 2015, **15**(2): 1183-1189.

[19] WANG Qisheng, WEN Yao, YAO Fengrui, et al. BN-enable epitaxy of Pb_{1-x}Sn_xSe nanoplates on SiO₂/Si for high-performance mid-infrared detection[J]. *Small*, 2015, **11**(40): 5388-5394.

[20] ZHENG Wenshan, XIE Tian, ZHOU Yu, et al. Patterning

- two-dimensional chalcogenide crystals of Bi_2Se_3 and In_2Se_3 and efficient photodetectors[J]. *Nat. Commun.*, 2015, **6**(1): 6972.
- [21] ZHANG H, ZHANG X, LIU C, et al. High-responsivity, high-detectivity, ultrafast topological insulator Bi_2Se_3 /silicon heterostructure broadband photodetectors[J]. *ACS Nano*, 2016, **10**(5): 5113-22.
- [22] LIU C, ZHANG H B, SUN Z, et al. Topological insulator Bi_2Se_3 nanowire/Si heterostructure photodetectors with ultrahigh responsivity and broadband response[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, **4**(24): 5648-5655.
- [23] 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.
- [24] SONG J C, YUAN J, XIA F, et al. Large-scale production of bismuth chalcogenide and graphene heterostructure and its application for flexible broadband photodetector[J]. *Adv. Mater.*, 2016, **2**(5): 1600077.
- [25] Sharma A, Bhattacharyya B, Srivastava A K, et al. High performance broadband photodetector using fabricated nanowires of bismuth selenide[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**(1): 19138.
- [26] Das B, Das N S, Sarkar S, et al. Topological insulator Bi_2Se_3 /Si-nanowire-based p-n junction diode for high-performance near-infrared photodetector[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, **9**(27): 22788-98.
- [27] QIAO H, YUAN J, XU Z, et al. Broadband photodetector based on graphene- Bi_2Te_3 heterostructure[J]. *ACS Nano*, 2015, **9**(2): 1866-1894.
- [28] LIU J, LI Y, SONG Y, et al. Bi_2Te_3 photoconductive detectors on Si[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, **110**(14): 141109.
- [29] YAO J, SHAO J, WANG Y, et al. Ultra-broadband and high response of the Bi_2Te_3 -Si heterojunction and its application as a photodetector at room temperature in harsh working environments[J]. *Nanoscale*, 2015, **7**(29): 12535-41.
- [30] YAO J, ZHENG Z, YANG G. Layered-material WS_2 /topological insulator Bi_2Te_3 heterostructure photodetector with ultrahigh responsivity in the range from 370 to 1550 nm [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, **4**(33): 7831-40.
- [31] ZHANG H, MAN B, ZHANG Q. Topological crystalline insulator SnTe/Si vertical heterostructure photodetectors for high-performance near-infrared detection[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, **9**(16): 14067-77.
- [32] GU S H, DING K, PAN J, et al. Self-driven, broadband and ultrafast photovoltaic detectors based on topological crystalline insulator SnTe/Si heterostructures[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, **5**: 11171-11178.
- [33] 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.
- [34] ZHENG K, LUO L B, ZHANG T F, et al. Optoelectronic characteristics of a near infrared light photodetector based on a topological insulator Sb_2Te_3 film[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, **3**(35): 9154-60.
- [35] SUN H, JIANG T, ZANG Y, et al. Broadband ultrafast photovoltaic detectors based on large-scale topological insulator Sb_2Te_3 /STO heterostructures[J]. *Nanoscale*, 2017, **9**(27): 9325-32.
- [36] JIANG Y, SUN Y, CHEN M, et al. Fermi-level tuning of epitaxial Sb_2Te_3 thin films on graphene by regulating intrinsic defects and substrate transfer doping[J]. *Physical Review Letters*, 2012, **108**(6): 066809.
- [37] WANG F, LI L, HUANG W, et al. Submillimeter 2D Bi_2Se_3 flakes toward high-performance infrared photodetection at optical communication wavelength[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, **28**(33): 1802707.
- [38] WANG X, DAI G, LIU B, et al. Broadband photodetectors based on topological insulator Bi_2Se_3 nanowire with enhanced performance by strain modulation effect[J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2019, **114**: 113620.
- [39] Sharma A, Srivastava A K, Senguttuvan T D, et al. Robust broad spectral photodetection(UV-NIR) and ultra-high responsivity investigated in nanosheets and nanowires of Bi_2Te_3 under harsh nano-milling conditions [J]. *Scientific reports*, 2017, **7**(1): 17911.
- [40] WANG Z, LI M, YANG L, et al. Broadband photovoltaic effect of n-type topological insulator Bi_2Te_3 films on p-type Si substrates[J]. *Nano Research*, 2016, **10**(6): 1872-9.
- [41] HUANG S M, HUANG S J, YAN Y J, et al. Highly responsive photoconductance in a Sb_2SeTe_2 topological insulator nanosheet at room temperature[J]. *RSC Advances*, 2017, **7**(62): 39057-62.
- [42] HUANG S M, HUANG S J, YAN Y J, et al. Extremely high -performance visible light photodetector in the Sb_2SeTe_2 nanoflake[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 45413.
- [43] YANG JIE, YANG Wenzhi, PENG Zhenghui, et al. Ultra-broadband flexible photodetector based on topological crystalline insulator SnTe with high responsivity[J]. *Small*, 2018, **14**(37): 1802598.
- [44] Virost F, Hayn R, Richter M, et al. -HgS): a strong 3D topological insulator with highly anisotropic surface states[J]. *Physical Review Letters*, 2011, **106**(23): 236806.
- [45] MA J, YI C, LV B, et al. Experimental evidence of hourglass fermion in the candidate nonsymmorphic topological insulator KHgSb [J]. *Science Advances*, 2017, **3**(5): e1602415.
- [46] Chandra Shekhar, Siham Ouardi, Gerhard H Fecher, et al. Electronic structure and linear magnetoresistance of the gapless topological insulator PtLuSb [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(25): 252109.
- [47] Maier L, Oostinga J B, Knott D, et al. Induced superconductivity in the three-dimensional topological insulator HgTe [J]. *Physical Review Letters*, 2012, **109**(18): 186806.
- [48] Nayak J, Kumar N, WU S C, et al. Electronic properties of topological insulator candidate CaAgAs [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2017, **30**(4): 045501.
- [49] Lawal A, Shaari A, Ahmed R, et al. Investigation of excitonic states effects on optoelectronic properties of Sb_2Se_3 , crystal for broadband photo-detector by highly accurate first-principles approach[J]. *Current Applied Physics*, 2018, **18**(5): 567-575.
- [50] Seifert P, Vaklinova K, Kern K, et al. Surface state-dominated photoconduction and THz generation in topological $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ nanowires[J]. *Nano Letters*, 2017, **17**(2): 973-979.