

碲化锡的制备、结构、性质及红外光电探测研究进展 (特邀)

宋立媛^{1,2,3}, 唐利斌^{1,2,3*}, 郝 群^{1*}

- (1. 北京理工大学 光电学院 信息光子技术工信部重点实验室, 北京 100081;
2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223;
3. 云南省先进光电材料与器件重点实验室, 云南 昆明 650223)

摘要: IV-VI 族碲化锡化合物是直接带隙半导体材料, 在室温和大气压条件下具有稳定存在的面心立方结构。作为拓扑晶体绝缘体, 碲化锡具有高度对称的晶型结构、螺旋形的多重表面态和强健的拓扑保护特性、无带隙的拓扑表面态和窄带隙体态、室温下高的迁移率等优异性能, 在制备无能耗、宽谱(从紫外光、可见光到红外光)、超快响应的新型光电探测器领域有巨大潜力。文中从适宜应用于光电探测器件的角度出发, 对碲化锡材料的制备方法、晶体结构、性质进行了阐述, 对近年来碲化锡在红外光电探测领域的研究进展进行了总结, 展望了其在光电探测领域的发展前景, 并提出了碲化锡作为光电器件亟需深入研究的几个方面。

关键词: 碲化锡; 材料制备; 光电性质; 光电探测器

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211019

Preparation, structure and properties of tin telluride and its research progress in infrared photodetection (*Invited*)

Song Liyuan^{1,2,3}, Tang Libin^{1,2,3*}, Hao Qun^{1*}

- (1. The Laboratory of Photonics Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;
3. Yunnan Key Laboratory of Advanced Photoelectronic Materials & Devices, Kunming 650223, China)

Abstract: As IV-VI compound, tin telluride belongs to direct band gap semiconductor materials. Under the condition of room temperature and atmospheric pressure, tin telluride has a stable face-centered cubic crystal structure. Being a topological crystal insulator, tin telluride has a highly symmetrical crystal structure. Due to its helical multiple surface states and strong topological protection characteristics, tin telluride can be used to fabricate new electronic devices without energy consumption. Moreover, on account of its excellent properties such as band-gap free topological surface state and narrow band gap posture, it has great potential in the field of preparing new photodetectors with wide spectral response from ultraviolet, visible light to infrared. In addition, because of its high mobility at room temperature, tin telluride is expected to be used for high performance photoelectric detection with ultra-fast response speed. In this review, the preparation methods, crystal structures and properties of tin telluride materials were summarized from the point of view that they were suitable for photodetectors. And the research progress of tin telluride in infrared photoelectric detection in recent years was summarized. Then the development potential of tin telluride in the field of photodetectors was prospected, and

收稿日期: 2020-11-21; 修订日期: 2020-12-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFB2203404); 云南省创新团队项目 (2018HC020)

several aspects that need to be further studied as photodetectors were also put forward.

Key words: SnTe; material preparation; photoelectrical properties; photodetectors

0 引言

红外光电探测器是把入射的红外辐射转变成电信号输出的器件,其在夜视、光通讯、大气和质量检验光谱学、导弹制导和红外遥感等方面都有重要应用。想要获得高性能的红外光电探测器,选用合适的高质量探测材料至关重要。目前用于红外光电探测器的材料主要分为传统半导体材料和新型二维半导体材料。传统红外光电探测器的材料代表有碲镉汞(HgCdTe)、锑化铟(InSb)、铟镓砷(InGaAs)、II类超晶格(InAs/GaSb或InAs/InAsSb)以及量子阱(GaAs/InGaAs/AlGaAs等)。以碲镉汞为例,其具有禁带宽度可调、响应速度快、量子效率高和低功耗等优点,但它的材料均匀性难以控制、本征缺陷浓度高、生长成本高以及需低温制冷等。于是,一些新型二维材料凭借其各自的优点开始备受光电探测领域的关注,典型的有石墨烯(Graphene)、过渡金属硫化物(Transition metal sulfide)、钙钛矿(Perovskite)、黑磷(Black phosphorus)和拓扑绝缘体(Topological insulator, TI)等。石墨烯的优点是具有超宽的吸收光谱(紫外到太赫兹)、超高的电子迁移率、超快的光响应速度等;但是单层石墨烯光吸收少、载流子具有超快复合速率,导致器件光响应度较低^[1-6]。黑磷材料性能优异,迁移率在室温下可与硅媲美、带隙随厚度可调(响应波段可从紫外、可见到近红外)以及开关比高;但黑磷材料本身不稳定,大面积、高质量的薄膜很难获得^[7-9]。过渡金属硫化物以二硫化钼(MoS₂)为例,其优点是拥有高开关比、有优异的机械性能可做柔性器件、有良好的光电性能以及带隙随厚度可调;但其迁移率低、响应速度慢、响应波段只能到近红外^[10-15]。拓扑绝缘体,不同于普通概念的绝缘体和金属,其内部绝缘,而表面或界面允许电荷移动。拓扑绝缘体典型的代表材料有:第一代的HgTe/CdTe量子阱、第二代的碲化铋(Sb₂Te₃)、碲化铋(Bi₂Te₃)和硒化铋(Bi₂Se₃)等化合物。拓扑绝缘体具有无带隙的表面态和窄带隙体态以及较好的导电能力等优点,但其光吸收比很小(特别是在近红外区域),当入射光的激发能比较小时,其光电流比较弱。因此,这些新型光电探测材料虽然由

于其各自新颖特性而被大量关注和研究,但是,它们也由于自身的原因而光电探测性能受到限制。

新型拓扑晶体绝缘体(Topological crystal insulator, TCI)碲化锡铅(Pb_xSn_{1-x}Te)、硒化锡铅(Pb_xSn_{1-x}Se)和碲化锡(SnTe)属于第三代拓扑绝缘体,与受时间反演对称性保护的传统拓扑绝缘体不同,其有自己的特点:(1)拓扑表面态受晶体对称性(镜面对称)保护,高对称性晶面具有不受杂质散射的狄拉克电子态;(2)拥有多重表面态,且位于不同对称性表面上的狄拉克表面态性质不同;(3)电子性质可调,通过改变温度和组分可以打破对称性从而使拓扑表面态可调。基于以上性质,拓扑晶体绝缘体在低功耗的电子器件、自旋电子器件、红外探测器件及热电器件等领域均有很大应用潜力。而且,与同是拓扑晶体绝缘体的Pb_xSn_{1-x}(Te, Se)相比,SnTe还具有元素组成简单、化学结构稳定单一从而更易合成的特点,从而备受研究者的关注,其在热电器件(Thermoelectric device)^[16]、场效应晶体管(Field effect transistor, FET)^[17]、太阳能电池(Solar cell)的电极^[18]、光电探测器(Photodetector)^[19]、超导器件(Superconducting device)^[20]以及铁电器件(Ferroelectric device)^[21]等领域均有极大的应用价值,其中主要应用器件的结构如图1所示。

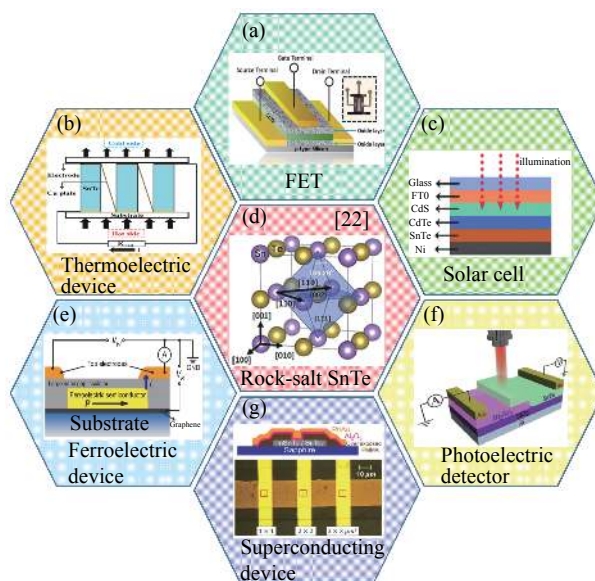


图 1 SnTe 材料的应用

Fig.1 Applications of SnTe material

1 碲化锡制备研究进展

材料制备方法的选择, 主要考虑所选方法是否工艺简单、重复性好、稳定性好, 是否适合大批量生产、高效节能, 制备的材料是否具有较高的质量从而可以满足研究和实际应用的需要等。已被报道的 SnTe

材料的不同生长方法、材料形态及其特性如表 1 所示^[23-41], SnTe 薄膜和 SnTe 纳米结构常用制备方法包括分子束外延法 (Molecular beam epitaxy, MBE)、化学气相沉积法 (Chemical vapor deposition, CVD)、物理气相沉积法 (Physical Vapor Deposition, PVD)、液相合成法、熔融退火法以及直接合金法等。

表 1 碲化锡制备方法、材料形态及其特性

Tab.1 Preparation methods, material morphology and properties of tin telluride

Preparation methods	Morphological structure	Features	Year	Ref.
MBE	SnTe-based films and superlattices	The structure parameters of the PbTe/SnTe superlattice were determined by the selected buffer layer material	1997	[23]
MBE	Si (111) substrate/ SnTe thin film	The electronic structure of the film was adjustable by changing thickness and lead doping level	2014	[24]
MBE	BaF ₂ (001) substrate/ SnTe film	By increasing the growth temperature, the film has higher mobility and lower carrier concentration	2014	[25]
MBE	Sapphire substrate/Bi ₂ Te ₃ buffer layer/SnTe film	Dirac electrons on the SnTe (111) surface was gained by transmission measurements on a high quality film grown on the Bi ₂ Te ₃ buffer layer	2014	[26]
MBE	BaF ₂ substrate/SnTe film	By optimizing the growth conditions and film thickness, the carrier concentration is reduced, which conduced to study the surface magnetic transport characteristics	2015	[27]
MBE	GaAs (111) A substrate/CdTe/ SnTe film	Single-phase very low hole concentration of SnTe (111) can be obtained by optimizing the growth temperature of SnTe and CdTe layers and the growth rate of SnTe	2016	[28]
MBE	Substrate/Bi ₂ Te ₃ buffer layer/SnTe film	An efficient photoconductive photodetector was prepared based on 10 nm TCI SnTe	2017	[29]
CVD	SnTe nanowire	The exposed surface of SnTe micro-nano structure can be adjusted by experimental parameters such as temperature	2014	[30]
CVD	SnTe nanoribbon	The controlled growth of crystal surface of SnTe nanocrystals {100} can be realized by Bi doping	2016	[31]
CVD	SnTe thin film/n-Si Nps heterojunction	A photovoltaic photodetector was prepared based on SnTe/Si Nps heterojunction	2017	[32]
PVD	SnTe thin film/n-Si heterojunction	A photovoltaic photodetector was prepared based on SnTe/Si heterojunction	2017	[33]
PVD	SnTe flake	A field effect transistor photodetector was prepared based on SnTe single crystal	2018	[34]
PVD	SnTe thin film/n-Bi ₂ Se ₃ heterojunction	A photovoltaic photodetector was prepared based on SnTe/Bi ₂ Se ₃ heterojunction	2020	[19]
Hot wall epitaxy	SnTe-based films and superlattices	The prepared EuTe/SnTe SL showed a high mobility of 2720 cm ² /(V·S) at room temperature. The Seebeck coefficients of SnTe/PbSe and SnTe/PbS SLs can be close to those of PbSe and PbS	2009	[35]
Solution-phase synthesis	SnTe quantum dot	By changing the growth temperature, concentration of reaction mixture, etc., the average diameter of SnTe NCs was adjustable within 4.5-15 nm, and the band gap correspondingly is 0.8-0.38 eV. It can be used in near-infrared photoelectric devices	2007	[36]
Solution-based synthesis	SnTe nanostructure	The shape/size controlled preparation of SnTe nanotubes, nanorods and nanowires promotes the application of colloidal infrared active nanomaterials in practical technologies	2015	[37]
Vapor-liquid- solid growth	SnTe nanoplates	SnTe nanoplate were prepared with large {100} or {111} surface areas, allowing selective study of the surface states on these surfaces. The phase transition from rock salt structure to rhombic structure was observed at low temperature	2014	[38]
Solid solution alloying	Sn _{1.03-x} Mg _x Te ingot	Adjusting the SnTe electron band structure by Mg doping, the Seebeck coefficient was improved and the thermoelectric property was optimized	2014	[39]
Microwave solvothermal method	Se/Cd co-doped SnTe octahedral particles	By using the strategy of co-doping selenium and cadmium, the energy band structure of SnTe was optimized to improve the power factor and thermoelectric optimization value	2017	[40]
Alloying	Ge doped SnTe alloy	The local structure distortion and related ferroelectric instability of SnTe were adjusted by Ge doping, and the ultra-low lattice thermal conductivity was acquired to optimize the thermoelectric performance of SnTe	2019	[41]

1.1 分子束外延法 (MBE)

高质量薄膜材料的获得对于潜在的器件应用至关重要。分子束外延是指在超高真空下,源材料经过高温蒸发产生的分子束流经衬底表面吸附、迁移、成核以及外延生长单晶薄膜的方法。由于 MBE 方法生长环境洁净、衬底温度低、制备的薄膜晶体质量好以及可精确控制掺杂浓度和膜层组分等优点,很适宜用来制备原子级超薄层或多层异质结构的光电薄膜材料。

缓冲层材料的选择对 MBE 制备高质量的薄膜至关重要。在异质外延时,由于衬底和外延薄膜材料不同,二者存在晶格失配,引入缓冲层的目的是释放薄膜中的应力、减小位错失配,缓冲层的生长直接影响到后续外延薄膜的制备质量。早在 1997 年,波兰科学院物理研究所的 J. SADOWS 等人在 BaF_2 (111) 衬底及 SnTe 、 $\text{Pb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}\text{Te}$ 和 PbTe 不同缓冲层上制备了 (50 Å SnTe)/(50 Å PbTe) 超晶格,结果发现缓冲层材料的选择在很大程度上决定了整个结构的电学参数^[23]。2014 年,清华大学的 Yan 等人^[24]利用 MBE 方法首次在 Si (111) 衬底上制备出了 SnTe 高质量薄膜,通过改变薄膜厚度和铅掺杂水平使薄膜的电子结构可调。由于 Sn 空位和 Te 取代 Sn ,非故意掺杂的 SnTe 是 p 型半导体材料,在小于 1 μm 的厚度时,薄膜往往是高度粒状和粗糙的,这会显著降低载流子迁移率,为解决该问题,很多研究之前是集中在 SnTe 薄膜的缓冲层使用和化学掺杂上,而研究者后来发现通过优化 MBE 制备 SnTe 薄膜时的工艺参数可有效降低载流子浓度和增加迁移率。2014 年,美国东北大学物理系的 B. A. Assaf 等人^[25]用 MBE 方法制备 SnTe 薄膜时发现提高生长温度不仅改善了薄膜的表面形貌和结晶质量,而且载流子浓度也随之降低,当载流子浓度为 $p=8\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 时,霍尔迁移率可达 $760\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{S})$ 。2016 年,Ryota Akiyam 等人报道了用 MBE 方法在 CdTe 上沉积 SnTe (111) 层,通过优化 SnTe 、 CdTe 层的生长温度以及 SnTe 的生长速率,获得了仅在 (111) 方向生长的 SnTe 单相,表面平整度比在 BaF_2 衬底上生长的有很大改善^[28]。2017 年,国防科技大学的 Jiang 等人^[24]报道了一种利用 MBE 方法制备晶圆规模的 SnTe 薄膜 (5 mm \times 2 mm) 的可控方法,即在生长 SnTe

膜之前,先在绝缘的钛酸锶 (STO)(111) 衬底上生长四、五层 Bi_2Te_3 薄膜 (4 nm) 以减少晶格的失配,再生长 10 nm 的 SnTe 薄膜^[29],并基于 SnTe 薄膜制备了高效光导型探测器,为优化这些器件用于宽带和灵敏的光电应用提供了指导。

MBE 制备方法非常先进,但它也有自身地一些局限性:MBE 设备昂贵、操作复杂、生长速率慢以及制备的晶圆规模的 SnTe 薄膜很难被转移到包括柔性衬底的其他衬底上,这限制了它的兼容性和实际应用,不利于实现产业化生产。

1.2 化学气相沉积法 (CVD)

化学气相沉积法是指利用含有构成薄膜元素的一种或几种气态或液态反应物(单质或化合物)的蒸气,在衬底表面上进行化学反应生成薄膜的方法。CVD 方法的特点是设备简单易操作、制备的薄膜重复性和均匀性较好、沉积温度较低以及通过改变气相组成可实现薄膜化学成份可控等。

合理设计具有明确表面的半导体纳米晶体是实现下一代光电探测器、热电和自旋电子器件的关键, SnTe 纳米晶体其表面晶面 (surface facets) 决定了它的表面状态。然而,大多数可用的 SnTe 纳米晶是由热力学稳定的 {100} 面组成的,生长具有 {111} 面的均匀纳米晶体具有挑战性。2014 年中国科学院大学的 Muhammad Safdar^[30] 等人用 CVD 方法获得了具有明显的高对称晶体表面的 SnTe 纳米线和微晶体,其微纳结构的暴露面可以通过改变 CVD 过程中的实验参数如沉积温度来调制,在不添加金催化剂的情况下,在高温沉积区域, SnTe 为具有 {100} 面的立方块,而在较低的生长温度下, SnTe 为具有 {111} 面的八面体。该研究为可控合成 SnTe 半导体微纳结构材料提供了指导。2016 年,澳大利亚昆士兰大学的 Yi-Chao Zou 等人^[31]在表面能计算的指导下,使用 CVD 制备了 Bi 掺杂 SnTe 纳米结构,其表面晶面通过 Bi 掺杂进行调制,实验结果得到了具有明显 {111} 表面的 Bi 掺杂 SnTe 纳米带,为今后发展晶面可控纳米结构提供了机会。2017 年,苏州大学的 Suhang Gu 等人利用 CVD 方法首次在硅纳米柱表面生长了 SnTe 薄膜,形成的高质量 SnTe/Si 纳米柱 (Nanopillars) 异质结光伏型光电探测器可实现从紫外到近红外的宽谱探测,响应速

度超快,探测率高^[32]。

1.3 物理气相沉积法 (PVD)

物理气相沉积是指在真空条件下进行的物理气相反应生长方法,或是在低气体放电条件下使用固体材料作为源材料,经过“蒸发或溅射”后,以物理方法实现物质从源材料沉积到衬底上的薄膜的可控原子转移过程。PVD 方法主要分为真空蒸发镀膜法、真空溅射镀膜法以及真空离子镀膜法。相比于溅射镀膜法,蒸发法具有的优点是:真空度较高、沉积速率较高以及制备的薄膜质量较高。而溅射镀膜法也有优点:通过调整工艺参数易实现膜厚可控、工艺重复性较好、制备多元合金薄膜时化学成分易控以及所沉积的薄膜对衬底的附着力较好等。

2017 年,山东师范大学的张宏斌等人在没有使用任何催化剂的情况下,采用 PVD 方法在 Si 上制备了具有 (111) 面和 (100) 面的 SnTe 薄膜,该薄膜呈现立方岩盐晶体结构且无其他相的存在,其 Sn/Te 原子比为 1:1.06,说明薄膜中存在一定数量的 Sn 空位,导致 p 型载流子的输运。衬底温度对 PVD 制备 SnTe 纳米片的形貌有很大影响,为得到适于制备光电探测器的 SnTe 纳米片,需要对生长 SnTe 的温度进行探索^[33]。2018 年,中国科技大学的张凯等人采用 PVD 法,在 Si/SiO₂ 衬底上对生长 SnTe 的温度做了探索,发现随生长温度不同,制备出的样品其形貌差异很大。生长温度低于 300 °C 时得到具有线状结构表面的 SnTe,其表面不够平整,不利于光电器件的制备;而生长温度过高为 600 °C 时得到的是紧密堆积方块状 SnTe 厚纳米片,同样不适于光电器件的制备及性能测试;而生长温度是 480 °C 时,所有 SnTe 纳米片都均匀分布在整個衬底上,表面干净平整,厚度大小均匀,可很好的满足不同尺寸光电器件的制备需求^[34]。2020 年,山东师范大学同一团队的张宏斌等人在 SiO₂ 衬底上采用一种离位两步 PVD 的生长策略在无催化剂的情况下制备了高质量的 SnTe/Bi₂Se₃ 异质结构,在垂直异质结的区域获得了干净的界面,这种新型异质结构不仅利用了拓扑绝缘体对光的有效吸收,而且为研究 p 型和 n 型拓扑表面态之间的能带耦合效应提供了理想平台^[19]。

1.4 其他方法

还有一些其他的方法比如液相合成法^[36-40]、熔融

退火法、直接合金法^[41] 等也用于制备 SnTe 薄膜及其纳米结构。但是,液相合成法制备的材料面积要么是太小以至于无法在其上进行器件制作,要么是晶体质量不好无法进行表面态的探索。而熔融退火法、直接合金法等制备的 SnTe 材料是多用于热电应用领域的探索,而未见于光电器件方面的研究。

2 碲化锡结构

SnTe 材料的性质决定了它的应用,而性质又与材料结构紧密相关。如图 2(a) 所示,SnTe 半导体材料具有三种晶型结构,分别为菱方结构的 α -SnTe^[42]、盐岩结构(面心立方结构)的 β -SnTe^[22, 43] 和斜方结构的 γ -SnTe^[42],其具体的空间群和晶格参数如表 2 所示^[44-45]。 α -SnTe 是低温相,在小于 100 K 时存在; β -SnTe 在 100 K 以上存在,而在高压条件下 (>18 kbar 的压力), β -SnTe 可沿 [111] 方向发生畸变转变为 γ -SnTe。由于具有面心立方结构的 β -SnTe 在室温和大气压下是稳定的相,因此通常用于光电探测器件的是这种结构。

SnTe 是第一个被理论预测并已被实验证实的拓扑晶体绝缘体,具有高度对称的晶体结构,拥有无带隙的拓扑表面态和窄带隙体态,且无带隙的表面态仅仅存在于那些镜面对称的表面如 (100)、(110)、(111),其螺旋形的多重表面态和强健的拓扑保护特性在制备无能耗光电器件方面可应用,图 2(b) 和 (c) 分别是 SnTe 面心立方结构的布里渊区和能带结构^[43],它在面心立方布里渊区具有特殊的镜像对称性。SnTe 是窄带隙半导体材料,在室温下其体带隙为 0.18 eV,可制备从紫外光、可见光到中红外波段的宽谱光电探测器;并且通过改变 SnTe 薄膜厚度或所受应力使带隙可调,如图 2(d) 所示^[46]。SnTe 的结构通常采用 X 射线衍射 (X-Ray diffraction, XRD)、高分辨透射电子显微镜 (High resolution transmission electron microscope, HRTEM) 以及光电子能谱 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 等手段来表征;非故意掺杂的 SnTe 由于 Sn 空位和 Te 取代 Sn 从而呈现出 P 型半导体,Sn:Te 通常小于 1,如图 2(e) XPS 谱所示^[32];图 2(f) 和 (g) 的 XRD^[32] 和 HRTEM 图^[30] 表明了 SnTe 具有 (111)、(100) 等拓扑面。

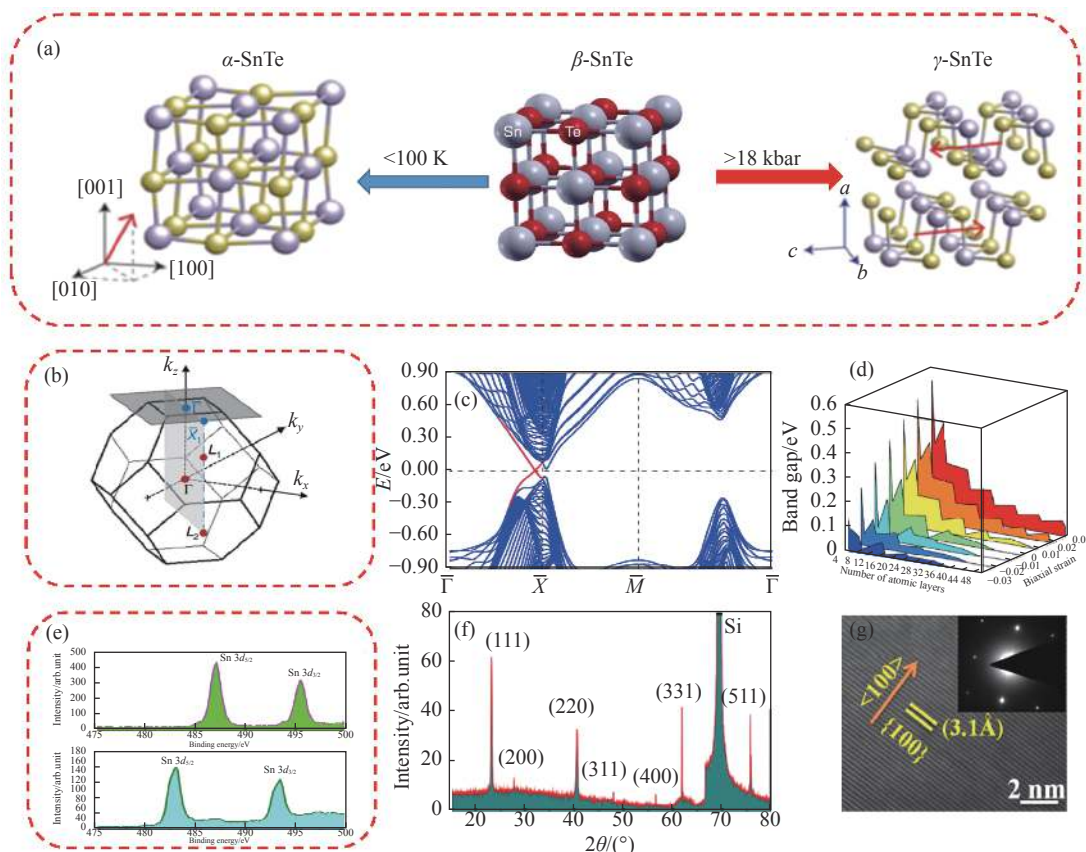


图 2 SnTe 的结构及表征: (a) 不同结构相变; (b) 面心立方结构的 SnTe 布里渊区; (c) 面心立方结构的 SnTe 能带结构; (d) 随厚度或应变可调的带隙; (e) X 射线光电子能谱; (f) X 射线衍射图谱; (g) 高分辨透射电子显微镜

Fig.2 Structure and characterization of SnTe: (a) Different phase transitions; (b) FCC Brillouin zone; (c) Band dispersion; (d) Strain- and layer-dependent band gap; (e) XPS spectra; (f) XRD pattern; (g) HRTEM image

表 2 SnTe 不同相的晶体结构

Tab.2 Crystal structure of different phases of SnTe

Phases	Crystal structures	Space groups	Lattice parameters
α -SnTe	Rhombohedral structure	R3m	$\alpha = 89.895^\circ, a = 6.325 \text{ \AA} (1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}),$
β -SnTe	Rock-salt Cubic structure	Fm3m	$\alpha = 90^\circ, a = 6.3268 \text{ \AA}$
γ -SnTe	Orthorhombic structure	Pnma	$\alpha = 90^\circ, a = 11.95 \text{ \AA}, b = 4.37 \text{ \AA}, c = 4.48 \text{ \AA}$

3 碲化锡性质

不同于只有一个表面态的拓扑绝缘体, 拓扑晶体绝缘体 SnTe 拥有多重表面态, 其 4 个拓扑表面态存在于每一个 {100}、{110} 和 {111} 表面^[47]。研究者通过调整制备方法、生长条件以及采用施加应变或外加电场等手段, 精确获得了特殊的拓扑表面态, 制备出了具有不同晶体形状 SnTe 纳米晶体 (纳米线、纳米带、纳米片等), 图 3(a) 显示了 SnTe 微晶的晶体形状从覆盖 {100} 表面的立方微晶到覆盖 {111} 表面的八

面体微晶的精确裁剪^[49]。SnTe 纳米线导电性随温度变化如图 3(b)^[30], 表明 SnTe 纳米线具有 350 meV 的热激活能, 这种巨大的热激活能可以保护 SnTe 纳米线上的拓扑表面状态不受热激发的干扰, 因此, SnTe 纳米线在实现室温拓扑表面输运效应、纳米电子和自旋器件方面具有很大的潜力。图 3(c)^[31] 是具有明显 {111} 表面的 Bi 掺杂 SnTe 纳米带的磁阻测试, 在强磁场下表现出弱的反定位效应和线性磁阻, 显示出其在自旋电子领域的巨大应用潜力。

SnTe 有很强的铁电性^[21], 使其在诸如非易失性

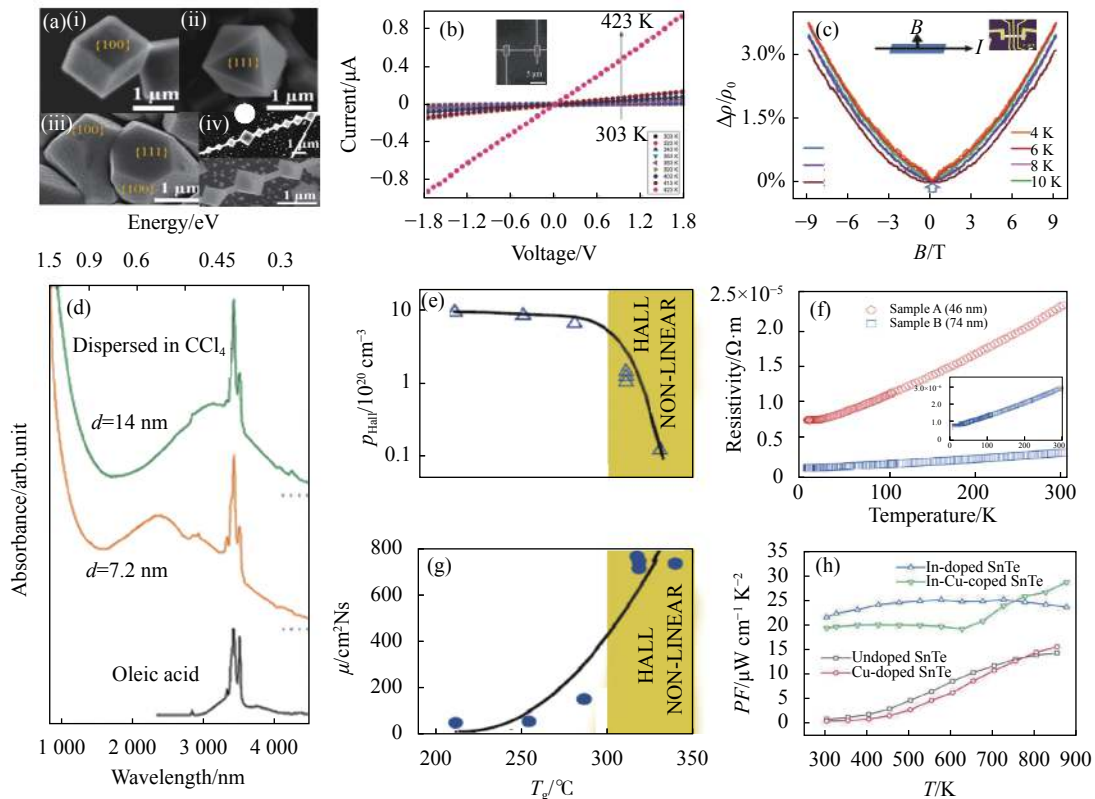


图 3 SnTe 的形貌、光学、电学及热电性质: (a) SnTe 微晶; (b) 基于 SnTe 纳米线双端器件的 I - V 曲线; (c) 磁导 $\Delta\rho/\rho_0$ - B 曲线; (d) 7.2 nm 和 14 nm 直径的 SnTe 纳米晶体的红外吸收光谱; (e) SnTe 薄膜的霍尔载流子浓度; (f) SnTe 薄膜的霍尔迁移率; (h) SnTe 热电材料的功率因数

Fig.3 Morphology, optical, electrical and thermoelectric properties of SnTe: (a) SnTe microcrystals; (b) Current-voltage curves; (c) Magneto-conductance $\Delta\rho/\rho_0$ - B curves; (d) IR absorption spectra of 7.2 nm and 14 nm SnTe NCs; (e) Hall carrier density; (f) Hall mobility; (h) Power factor

高密度存储、纳米传感器和电子工业等领域有潜在应用; SnTe 还具有超导性^[20]。

此外, SnTe 在 3~5 μm 范围内表现出高效的光探测性能, 图 3(d)^[36] 为 SnTe 纳米晶体的红外吸收光谱, 通过改变生长温度、反应混合物浓度等, SnTe 纳米晶的平均直径在 4.5~15 nm 内可调, 相应带隙为 0.8~0.38 eV, 在近红外、中红外光电探测中具有很大的应用潜力。

SnTe 具有高的载流子浓度、高的空穴迁移率和极低的电阻率, 其电学性能优异。室温下高的迁移率, 可在超快响应的新型光电探测器领域有应用潜力; SnTe 导电性好, 在太阳能电池的背电极中已有应用^[48]。并且, 通过掺杂元素的选择、生长参数的调整以及膜厚的改变等其电学性能可调。图 (e) 和 (g)^[25] 通过提高生长温度, 使空穴载流子浓度从 $1.0 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 降低了两个数量级到 $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 迁移率从 $60 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{S})$ 增加了一个数量级到 $720 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{S})$ 。SnTe 电阻率随

温度的变化规律同金属的一致, 是随温度升高电阻率增大, 如图 3(f) 所示^[27]。

SnTe 因具有与 PbTe、PbSe 有着非常相似的电子能带结构, SnTe 在室温以上是面心立方结构, 是单相, 结构稳定, 在最佳工作温度范围内 (600~920 K) SnTe 材料结构无相变, 极有潜力成为性能优异的 P 型中温热电材料。但是因为未掺杂的 SnTe 存在大量的 Sn 空位, 是 P 型半导体, 其载流子浓度高 (10^{20} ~ 10^{21} cm^{-3})、泽贝克 (Seebeck) 系数低且热导率高, 想要优化载流子浓度又比较困难, 无量纲的热电优值 (Thermoelectric figure of merit ZT, ZT 值) 小, 很难实现工业应用。目前, 大量研究都集中在通过共振掺杂、能带简并、载流子浓度优化和点缺陷工程等策略来优化其 ZT 值上, 并且取得了相当不错的进展, 图 3(h) 显示的是通过 In 和 Cu 共掺杂, 使 SnTe 热电材料的功率因数在 873 K 达到较高的值 $29 \mu\text{Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$, 从而 ZT 值达到较高的 1.55^[49]。

4 碲化锡红外光电探测研究进展

4.1 光伏型器件

SnTe 由于其无带隙的表面态和窄带隙的体态, 在制备高效、宽谱光电探测器领域具有应用。但是 SnTe 材料由于光激发载流子在通过带间和带内的声子激发散射而发生指数级的衰减, 从而经常呈现出比较弱的光响应, 所以, 考虑在 SnTe 和其他半导体材料之间构筑异质结是一种增强光生载流子在 SnTe 中的分离和传输的有效方法。

苏州大学的顾苏杭等人^[32]于 2017 年首次制备了 SnTe/Si 高质量异质结构光电探测器, 图 4(a) 是其器件结构。图 4(b) 是在暗条件和 808 nm 激光照射下器件典型的 $I-V$ 曲线, 表明该器件在光照下有明显的光响应, 特别是在负电压方向上。图 4(c) 是其器件的能带结构示意图及光电响应机理图, 由于在 SnTe/Si

界面上的内建电势的存在, 光生载流子的分离和传输得到极大的便利, 制备的器件在零偏压下, 有超快的响应速度 $8 \mu\text{s}$ 和高的探测率 8.4×10^{12} Jones, 响应率为 $0.128 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$, 并且从紫外到近红外 (254~1550 nm) 都有响应。SnTe/Si 异质结在对近红外光的强响应, 对开发低成本、高性能的通信波段近红外探测器有重要意义。但是, 该 SnTe/Si 异质结构以可探测的波长范围为代价而提高了近红外光的吸收效率, 因此在波长拓展方面还有很大的上升空间。

同年, 山东师范大学的张宏斌等人^[33]制备了器件结构如图 4(d) 所示的高质量 SnTe/Si 垂直异质结构光伏探测器, 其具有优良的二极管特性。图 4(e) 是在零偏置电压、1064 nm 光照下器件的光电流开关比, 可高达 8.0×10^6 。图 4(f) 是 SnTe/Si 光伏器件在波长范围为 300~1100 nm 的外量子效率 (EQE) 光谱, 制备的 60 nm 厚度的 SnTe 薄膜作为异质结构光电探测器中

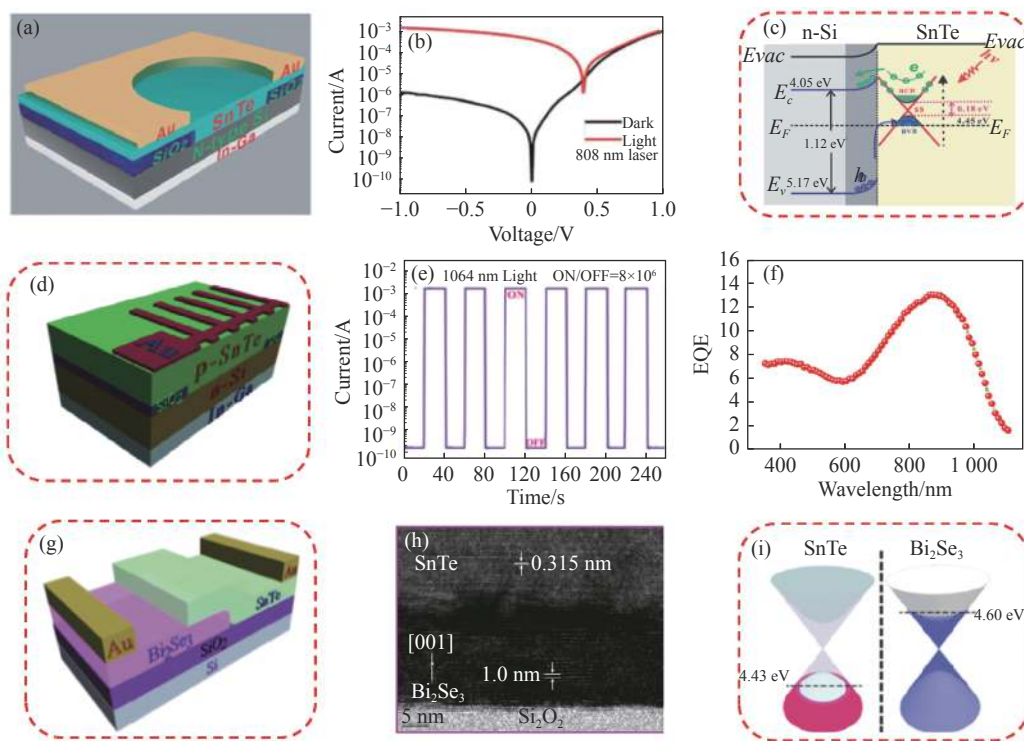


图 4 SnTe 光伏型器件及其光电特性: (a) SnTe/Si 异质结器件示意图; (b) 典型的电流-电压特性; (c) SnTe/Si 异质结构的能带图; (d) SnTe/Si 器件的截面图; (e) SnTe/Si 器件的光电流开关行为; (f) 外量子效率图; (g) SnTe/Bi₂Se₃ 异质结构示意图; (h) 异质结构横截面的 HRTEM 图像; (i) SnTe/Bi₂Se₃ 的狄拉克能带图

Fig.4 SnTe photovoltaic detector and its photoelectric properties: (a) Scheme of SnTe/Si heterostructure device; (b) Typical $I-V$ characteristics; (c) Energy band diagram; (d) Cross section diagram of SnTe/Si devices; (e) Photocurrent switching behavior of the device; (f) EQE spectrum; (g) Schematic drawing of the SnTe/Bi₂Se₃ heterostructure; (h) HRTEM image of the heterostructure cross-section; (i) Dirac band diagrams of SnTe/Bi₂Se₃

的空穴运输层,有效地促进空穴运输至电极,减少了电子空穴复合,这些优点使 SnTe/Si 光电探测器拥有高的响应率为 $2.36 \text{ A}\cdot\text{W}^{-1}$ 以及高的探测率为 1.54×10^{14} Jones,并且在近红外波长有一个大的带宽 10^4 Hz (1064、1310、1550 nm),这使得该光电探测器在新型器件应用中具有广阔前景。

2020 年,同一团队的张宏斌等人^[19]制备了高质量的 SnTe/Bi₂Se₃ 异质结光电探测器,图 4(g) 是其结构示意图。制备的异质结具有显著的二极管特性,整流比高达 700。n 型/Bi₂Se₃ 和 p 型 SnTe 的狄拉克能带图如图 4(i) 所示,利用该异质结制备了近红外光电探测器,对 1550 nm 入射光的响应超快也很稳定,其响应率可达 $145.74 \text{ m A}\cdot\text{W}^{-1}$,最大探测率为 1.15×10^{10} Jones,响应速度为 $6.90 \mu\text{s}$ 。这对低功耗、低成本的光电探测应用的研究具有重要意义,并在超快存储器件的应

用方面有巨大的潜力。图 4(h) 是异质结构横截面 HRTEM 图,表明在垂直异质结的区域获得了干净的界面,没有其他合金相的存在。

4.2 光导型器件

SnTe 材料为窄带隙半导体,其光电探测波段可至中波红外 ($3\sim 5 \mu\text{m}$),并且通过施加应变或电场可调制它的表面态,因此在红外探测中有很大的应用潜力。

2017 年,国防科技大学的 Jiang 等人基于超薄 SnTe 单晶二维薄膜材料^[29]制备了光导型探测器,图 5(a) 和 (b) 是其器件结构示意图,使用了 Bi₂Te₃ 缓冲层以减少钛酸锶 (SrTiO₃) 衬底与 SnTe 薄膜之间的晶格失配。该光导型器件从可见光到中红外范围 ($405\sim 3800 \text{ nm}$) 可实现快速、稳定的响应如图 5(c) 和 (d) 所示,其响应波段相较于基于 SnTe 薄膜的光伏型探测器^[32]得到了进一步的拓展;光电流在 2003 nm 处

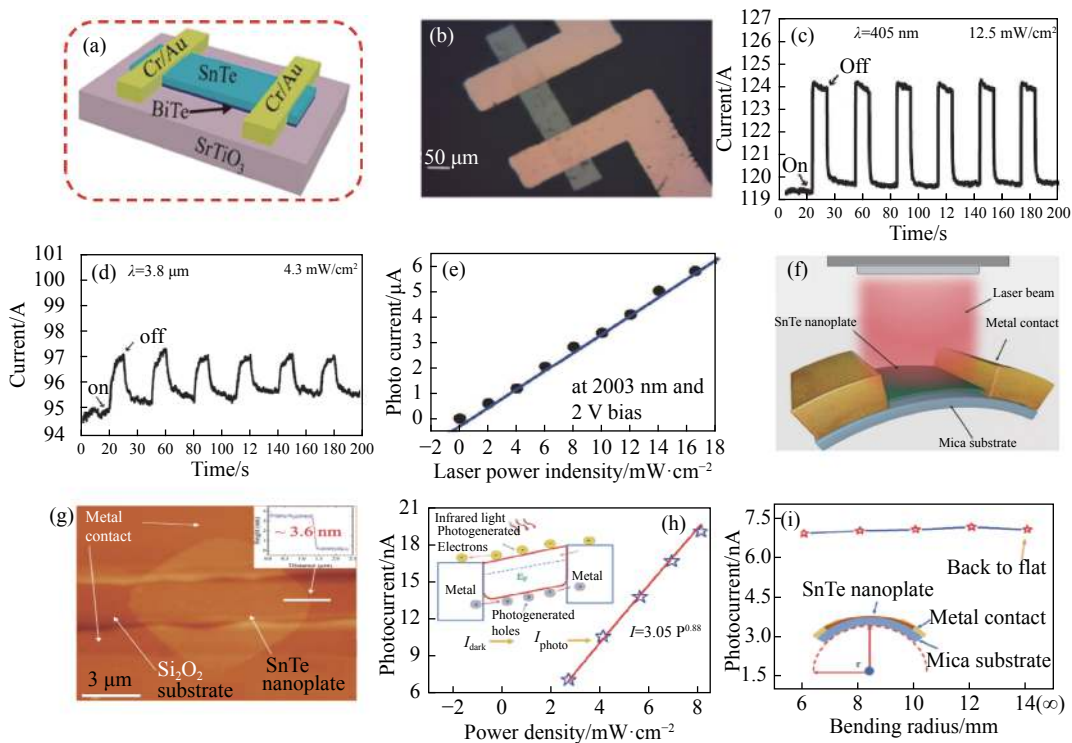


图 5 SnTe 光导型器件及其光电特性: (a) 光导型探测器的示意图; (b) 光导型探测器的光学显微镜图; (c) 在 405 nm 光照下的光响应图; (d) 3.8 μm 光照下的光响应图; (e) 光电流随激光功率强度的变化关系; (f) 柔性 SnTe 近红外单个纳米片光电探测器原理图; (g) AFM 图; (h) 在 980 nm 激光照射下光电流随激光功率强度的变化关系; (i) 不同弯曲角度的 SnTe 纳米片在 980 nm 激光照射下的光电流

Fig.5 SnTe photoconductive detector and its photoelectric properties: (a) Schematic diagram of the photodetector; (b) OM image of the detector; (c) Time-dependent photo-response with 405 nm; (d) Time-dependent photo-response with 3.8 μm ; (e) The laser power intensity dependence of the photocurrent; (f) Schematic diagram of flexible SnTe NIR single nanoplate photodetectors; (g) Representative AFM image; (h) Dependence of laser intensity on the photocurrent under the illumination of a 980 nm laser; (i) Photocurrent of SnTe nanoplate photodetectors bending with different radii under the illumination of a 980 nm laser

对激光功率强度的依赖关系如 5(e) 所示,其呈现的线性关系表明该器件具有较大的线性动态范围。这些结果表明 SnTe 薄膜材料在宽谱、高灵敏红外光电探测方面具有很大应用潜力。2020 年,西澳大学的雷文团队^[50]利用超薄 SnTe 纳米片制备了近红外波段响应的柔性探测器,图 5(f) 是其器件示意图,原子力显微镜图如图 5(g) 所示,在云母衬底上生长的 SnTe 纳米片厚度仅 3.6 nm;该器件性能优异,在室温、980 nm 激光照射下,响应率为 $698 \text{ mA}\cdot\text{W}^{-1}$,探测率为 $3.89\times 10^8 \text{ Jones}$,外部量子效率为 88.5%;图 5(h) 是在 980 nm 激光照射下,显示光电流随激光功率强度的增加而增大;制备的柔性器件在不同弯曲角度下性能稳定,如图 5(i) 所示。这些结果有助于深入理解非层状材料的范德华生长机理,也证明 SnTe 纳米片在柔性近红外探测器领域有巨大潜力。

场效应晶体管 (FET) 是通过控制输入回路的电场效应 (栅极电压 V_{GS}) 来控制输出回路电流 (漏极电

流 I_D) 的一种半导体器件。其具有输入电阻高、温度稳定性好、噪声低、功耗低、动态范围大等特点,在大规模集成电路中被广泛应用。为实现基于 SnTe 红外探测器的集成化和小型化,可制备 SnTe 场效应晶体管。

2018 年,中国科学技术大学的张凯等人^[34]基于高结晶度的 SnTe 单晶纳米片制备了器件结构如图 6(a) 所示的 FET 光电探测器,其中 p 型 Si 衬底同时也是作为背栅,图 6(b) 和 (c) 分别是该 SnTe 纳米片的扫描电镜 (Scanning electron microscope, SEM) 和原子力显微镜 (Atomic force microscope, AFM) 图。通过制作短的通道长度在中波红外 4650 nm 处获得了 $4.17 \text{ A}\cdot\text{W}^{-1}$ 的响应率,如图 6(d) 所示,且在 254~4650 nm 实现了超宽谱光电响应。首次直接在聚对苯二甲酸乙二醇酯 (Polyethylene terephthalate, PET) 衬底上制备了柔性 SnTe 光电探测器并进行了在不同弯曲角度 ($0^\circ\sim 90^\circ$) 下光电流随时间变化的曲线测试,图 6(e) 和

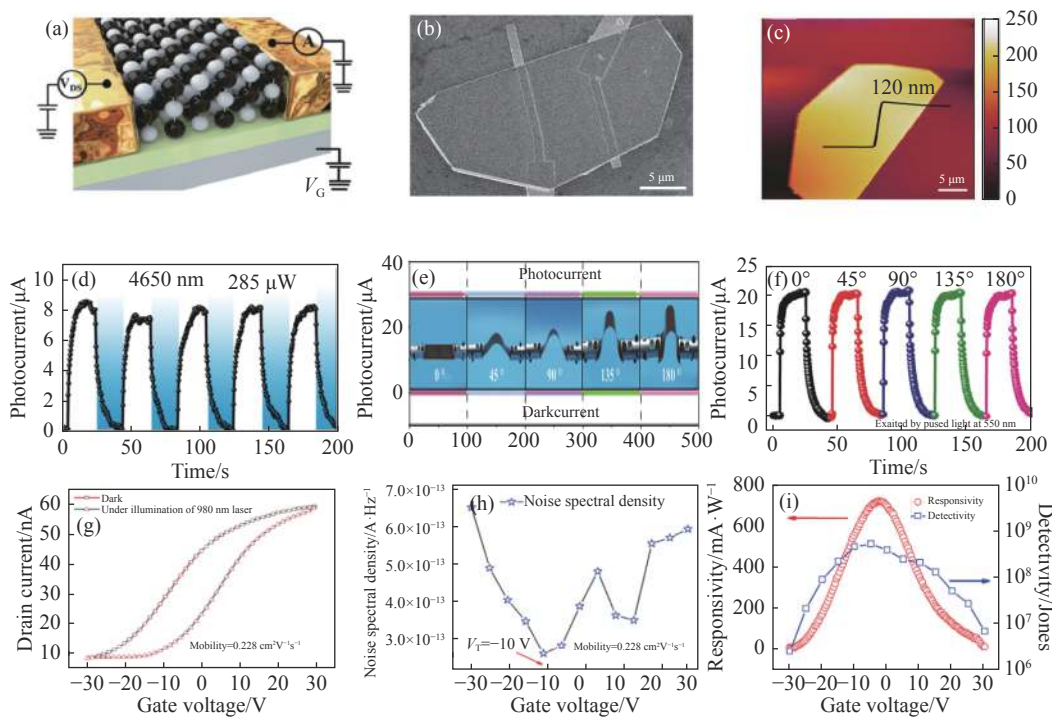


图 6 SnTe 场效应晶体管器件及其光电特性: (a) SnTe 基光电探测器原理图; (b) SnTe 纳米片的 SEM 图像; (c) SnTe 纳米片的 AFM 图像; (d) 4650nm 光照下的光响应图; (e) SnTe 基柔性光电探测器的光响应测量; (f) 柔性器件的光电流图; (g) 在暗条件和 980nm 激光照射下 SnTe 探测器的转移特征曲线; (h) 典型的噪声-栅极电压图; (i) 依赖于栅极电压的响应率和探测率

Fig.6 SnTe FET photodetector and its photoelectric properties: (a) Diagrammatic drawing of the SnTe-based photodetector; (b) SEM image; (c) AFM image; (d) Time-dependent photo-response with 4650 nm; (e) Photoreponse measurements of the SnTe-based flexible photodetectors; (f) Time-dependent photocurrent of the flexible device; (g) Transfer curves of SnTe detectors; (h) Typical noise as a function of gate voltage; (i) Gate voltage dependent responsivity and detectivity

(f) 表明其光电流保持稳定。该团队研究结果相较于其他基于 SnTe 薄膜的光伏型器件^[32]和光导型器件^[29]而言,把可探测的波长范围进一步拓展到了中波红外,实现了从紫外到中红外波段的超宽谱光电响应,器件的响应率高。为进一步研究 SnTe 纳米片的电学性能,2020 年,西澳大学的雷文团队^[50]以带有 300 nm SiO₂ 层的硅为衬底制备了 SnTe FET,图 6(g) 是分别在暗条件和 980 nm 激光(强度为 21.5 mW/cm²)照射下 SnTe FET 的转移特征曲线,显示其为 n 型通道且开关比为 5.5,计算得到的迁移率较低为 0.228 cm²/(V·S),主要是由于其超薄的厚度导致了电荷杂质的库仑散射;器件的 1/f 噪声对栅极电压 (V_g) 的依赖关系如图 6(h),这与传统半导体光电探测器不同,但与其他 2D 材料基探测器相似;图 6(i) 当栅极电压增加时(从 -30 V 到 -2.5 V),SnTe FET 的响应率得到了提高(从 2.96 m A·W⁻¹ 到 723 m A·W⁻¹),同时探测率也得到了提高(从 2.4×10⁶ 到 5.3×10⁸ Jones),表明通过改变电压可以轻易地调节 SnTe FET 近红外探测器的光响应,该器件的响应率已与近红外探测范围内目前使用的商用硅、锗光电探测器的响应率(0.5~0.85 A/W)比较接近,但探测率仍需优化。对 SnTe FET 光电探测器的这些研究结果表明,其在宽谱光电探测、柔性可穿戴器件、远程通信等领域均有应用潜力。

5 结论及展望

由 IV A 族元素 Sn 和 VIA 族元素 Te 组成的 IV-VI 族化合物 SnTe,属直接窄带隙半导体材料;其熔点为 790 °C,常温常压下是离子型晶体但有一定的共价键成分,材料稳定性好且易于制备;室温下迁移率高,并且其电学参数(迁移率和载流子浓度)可通过改变制备工艺参数或元素掺杂进行调节,可实现紫外、可见到红外波段的宽谱、快速、高效光电探测,因此,SnTe 材料在光电探测器方面有极大的应用潜力。

SnTe 目前的研究大多是集中在对其作为拓扑晶体绝缘体材料本身物理特性的研究上、对其薄膜和纳米晶体的制备研究上以及在热电应用方面采用各种策略来提高其热电优值上,而对 SnTe 在光电探测器领域中的研究相对很少,已见的研究报道得到的光电探测器件性能虽比较好,但仍有很大的提升空间。

目前 SnTe 作为光电器件仍有一些方面需进一步

深入研究。在 SnTe 薄膜制备方面,获得高质量、大面积的 SnTe 薄膜仍是巨大的挑战,而长线阵和大规模焦平面阵列等多像素探测器的制备对此是有要求的。在 SnTe 光电器件的设计方面,已做过的研究有光伏型、光导型和光电场效应管,但光伏型器件尝试选用过的异质材料较少,只有与硅结合或与拓扑绝缘体硒化铋结合的,其响应波段只达到近红外和短波红外波段,器件性能有待优化;场效应晶体管的器件结构也比较单一,可对其进行不同器件结构的设计和研究。在 SnTe 光电器件的制作方面,目前仅仅是在实验室条件下尝试制备单元器件,很少使用到标准的半导体制备工艺流程和相关设备,器件制作方法有待标准化,器件性能可望进一步提高。在 SnTe 光电器件的测试方面,测试平台受限比如光源达不到更长红外波段的要求从而没法验证它在更长波段的响应等,需进一步优化测试平台。

参考文献:

- [1] Liu C H, Chang Y C, Norris T B, et al. Graphene photodetectors with ultra-broadband and high responsivity at room temperature [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(4): 273-278.
- [2] Long M, Liu E, Wang P, et al. Broadband photovoltaic detectors based on an atomically thin heterostructure [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(4): 2254-2259.
- [3] Du S, Lu W, Ali A, et al. Photodetectors: A broadband fluorographene photodetector [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(22): 1700463.
- [4] Chen Z F, Li X M, Wang J Q, et al. Synergistic effects of plasmonics and electron trapping in graphene short-wave infrared photodetectors with ultrahigh responsivity [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(1): 430-437.
- [5] Yu X, Li Y, Hu X, et al. Narrow bandgap oxide nanoparticles coupled with graphene for high performance mid-infrared photodetection [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4299.
- [6] Kim C O, Kim S, Shin D H, et al. High photoresponsivity in an all-graphene p-n vertical junction photodetector [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3249.
- [7] Guo Q, Pospischil A, Bhuiyan M, et al. Black phosphorus mid-infrared photodetectors with high gain [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(7): 4648-4655.
- [8] Tan W C, Huang L, Ng R J, et al. A black phosphorus carbide infrared phototransistor [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(6): 1705039.
- [9] James B, Matin A, Joy C, et al. Polarization-resolved black

- phosphorus/molybdenum disulfide mid-wave infrared photodiodes with high detectivity at room temperature [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(10): 601-607.
- [10] Wen Y, Yin L, He P, et al. Integrated high-performance infrared phototransistor arrays composed of nonlayered PbS-MoS₂ heterostructures with edge contacts [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(10): 6437-6444.
- [11] Fu L, Wang F, Wu B et al. Van der waals epitaxial growth of atomic layered hfs₂ crystals for ultrasensitive near infrared phototransistors [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(32): 1700439.
- [12] Li J, Wang Z X, Wen Y, et al. High - performance near-infrared photodetector based on ultrathin Bi₂O₂Se nanosheets [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(10): 1706437.
- [13] Li A, Chen Q X, Wang P, et al. Photodetectors: Ultrahigh-sensitive broadband photodetectors based on dielectric shielded MoTe₂/Graphene/SnS₂ p-g-n junctions [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(6): 1970040.
- [14] Li N, Wen Y, Cheng R, et al. Strongly coupled van der Waals heterostructures for high-performance infrared phototransistor [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(10): 103501.
- [15] Wu E, Wu D, Jia C, et al. In-situ fabrication of 2D WS₂/Si type-II heterojunction for self-powered broadband photodetector with response up to mid-infrared [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(2): 565-572.
- [16] Wang X, Wang H, Su W, et al. Optimization of the performance of the SnTe uni-leg thermoelectric module via metallized layers [J]. *Renewable Energy*, 2018, 131(2): 606-616.
- [17] Sarswat P K, Sarkar S, Yi G, et al. Phosphorus doped SnTe type needle-like crystals: band structure modifications and electronic properties [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2017, 121(33): 18263-18273.
- [18] Tian Y S, Han L X, Ze P W. Determination of band alignment at the CdTe/SnTe heterojunction interface for CdTe thin-film solar cells [J]. *Europhysics Letters*, 2019, 127(3): 37003.
- [19] Zhang H, Song Z, Li D, et al. Near-infrared photodetection based on topological insulator P-N heterojunction of SnTe/Bi₂Se₃ [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 509(4): 145290.
- [20] Bliesener A, Feng J Y, Taskin A A, et al. Superconductivity in Sn_{1-x}In_xTe thin films grown by molecular beam epitaxy [J]. *Physical Review Materials*, 2019, 3(10): 101201.
- [21] Chang K, Liu J W, Lin H C, et al. Discovery of robust in-plane ferroelectricity in atomic-thick SnTe [J]. *Science*, 2016, 353(6296): 274-278.
- [22] Liu P, Xie Y J, Miller E, et al. Dislocation-driven SnTe surface defects during chemical vapor deposition growth [J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2019, 128(5): 351-359.
- [23] Sadowski J, Grodzicka E, Dynowska E, et al. Structural and electrical properties of low concentration SnTe layers and PbTe/SnTe heterostructures grown by MBE [J]. *Acta Physica Polonica A*, 1997, 92: 967-970.
- [24] Yan C H, Guo H, Wen J, et al. Growth of topological crystalline insulator SnTe thin films on Si (111) substrate by molecular beam epitaxy [J]. *Surface Science*, 2014, 621(3): 104-108.
- [25] Assaf B A, Katmis F, Wei P, et al. Quantum coherent transport in SnTe topological crystalline insulator thin films [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(10): 106802.
- [26] Abramof E, Ferreira S O, Rapp P H O, et al. Reciprocal space maps of PbTe/SnTe superlattices [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 84(7): 3650-3653.
- [27] Akiyama R, Fujisawa K, Yamaguchi T, et al. Two-dimensional quantum transport of multivalley (111) surface state in topological crystalline insulator SnTe thin films [J]. *Nano Research*, 2016, 9(2): 490-498.
- [28] Ishikawa R, Yamaguchi T, Ohtaki Y, et al. Thin film growth of a topological crystal insulator SnTe on the CdTe (111) surface by molecular beam epitaxy [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2016, 453: 124-129.
- [29] 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.
- [30] Safdar M, Wang Q, Mirza M, et al. Crystal shape engineering of topological crystalline insulator SnTe microcrystals and nanowires with huge thermal activation energy gap [J]. *Crystal Growth & Design*, 2014, 14(5): 2502-2509.
- [31] Zou Y C, Chen Z G, Kong F T, et al. Surface-energy engineered Bi-doped SnTe nanoribbons with weak antilocalization effect and linear magnetoresistance [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(46): 19383-19389.
- [32] Gu S, Ding K, Pan J, et al. Self-driven, broadband and ultrafast photovoltaic detectors based on topological crystalline insulator SnTe/Si heterostructures [J]. *J Mater Chem A*, 2017(5): 11171-11178.
- [33] Zhang H, Man B, Zhang Q, et al. Topological crystalline insulator SnTe/Si vertical heterostructure photodetectors for high-performance near-infrared detection [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(16): 14067-14077.
- [34] Jie Y, Wen Z Y, Zheng H P, et al. Ultra - broadband flexible photodetector based on topological crystalline insulator SnTe with high responsivity [J]. *Small*, 2018, 14(37): 1802598.
- [35] Akihiro Ishida, Tomohiro Yamada, Takuro Tsuchiya, et al. Electrical and thermoelectrical properties of SnTe-based films and superlattices [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(12):

- 122106.
- [36] Kovalenko M V, Heiss W, Shevchenko E V, et al. SnTe nanocrystals: a new example of narrow-gap semiconductor quantum dots [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2007, 38(50): 11354-11355.
- [37] Guo S J, He K, Su Dong, et al. Shape-controlled narrow-gap SnTe nanostructures: from nanocubes to nanorods and nanowires [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2016, 137(48): 15074-15077.
- [38] Brmayer Michael K, Rodolphe Clérac, Florian Weigend, et al. Ortho-chalcogenostannates as ligands: syntheses, crystal structures, electronic properties, and magnetism of novel compounds containing ternary anionic substructures $[M_4(\mu_4\text{-Se})(\text{SnSe}_4)_4]_{10}$ ($M=\text{Mn, Zn, Cd, Hg}$), $3(\text{infinity})[[\text{Hg}_4(\mu_4\text{-Se})(\text{SnSe}_4)_3]_6]$, or $1(\text{infinity})[[\text{HgSnSe}_4]_2]$ [J]. *Chemistry*, 2004, 10(20): 5147-5157.
- [39] Banik A, Shenoy U S, Anand S, et al. Mg alloying in SnTe facilitates valence band convergence and optimizes thermoelectric properties [J]. *Chemistry of Materials*, 2015, 27(2): 581-587.
- [40] Wang L, Chang S, Zheng S, et al. Thermoelectric performance of Se/Cd codoped SnTe via microwave solvothermal method [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(27): 22612-22619.
- [41] Banik A, Ghosh T, Arora R, et al. Engineering ferroelectric instability to achieve ultralow thermal conductivity and high thermoelectric performance in $\text{Sn}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}$ [J]. *Energy & Environmental Science*, 2019, 12(2): 589-595.
- [42] Kai Chang, Kaloni Thaneshwor P, Hai C L, et al. Enhanced spontaneous polarization in ultrathin SnTe films with layered antipolar structure [J]. *Advanced Materials*, 2018, 32(3): 1804428.
- [43] Hsieh T H, Lin H, Liu J, et al. Topological crystalline insulators in the SnTe material class [J]. *Nature Communications*, 2012, 3(1): 982.
- [44] Madelung O, Rössler U, Schulz M. Non-tetrahedrally Bonded Elements and Binary Compounds I[M]. Berlin: Springer, 1998.
- [45] Zhang Q, Wang H, Liu W, et al. Enhancement of thermoelectric figure-of-merit by resonant states of aluminium doping in lead selenide [J]. *Energy & Environmental Science*, 2012, 5(1): 5246-5251.
- [46] Qian X F, Fu L, Li J, et al. Topological crystalline insulator nanomembrane with strain-tunable band gap [J]. *Nano Research*, 2015, 8(3): 967-979.
- [47] Fu L. Topological crystalline insulators [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(10): 106802.1-106802.4.
- [48] Weng Z P, Ma S, Zhu H, et al. CdTe thin film solar cells with a SnTe buffer layer in back contact [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 179: 276-282.
- [49] Guo F, Cui B, Geng H, et al. Simultaneous boost of power factor and figure-of-merit in In-Cu codoped SnTe [J]. *Small*, 2019, 15(36): 1902493.
- [50] Liu J, Li X, Wang H, et al. Ultrathin high-quality SnTe nanoplates for fabricating flexible near-infrared photodetectors [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(28): 31810-31822.



第一作者简介：宋立媛，女，2003年7月于兰州大学化学化工学院应用化学专业本科毕业后，在昆明物理研究所工作至今，长期从事半导体薄膜材料的制备和表征工作。2018年9月开始攻读博士研究生学位，研究方向是光电材料。所获奖项：“有机红外及紫外半导体探测器材料的研制”获2011年中国兵器工业集团公司科技进步三等奖，排名第3；“高亮度单色绿光 OLED 微型显示器研发”获2015年度兵器行业优秀质量管理小组成果一等奖；“石墨烯基薄膜材料的调控及红外探测器研制”获2017中国兵器工业集团公司科技进步三等奖，排名第3。Email: bitslyy@163.com



通讯作者简介：唐利斌(1978-)，男，博士(后)，研究员级高级工程师(正高)，博士生导师。昆明物理研究所工作，从事光电材料与器件的研究工作，科技带头人。云南省创新团队带头人，中国兵器创新团队带头人，中国兵器领军科学家培养计划入选者，云南省技术创新人才，云岭学者，《红外技术》编委。在《ACS Nano》等国内外期刊发表161篇研究论文，论文被引用4930余次。申报专利63项，其中授权26项。指导毕业20余名博士、硕士，多名研究生获国家奖学金。Email: sscitang@163.com



通讯作者简介: 郝群,女,北京理工大学特聘教授,博士生导师。长期在新型光电成像传感技术和光电精密测试技术领域从事教学和科研工作,主要研究方向包括新型光电成像技术、仿生光电感测技术、抗振干涉测量技术及仪器等方面。主持国家自然科学基金仪器专项/重点项目、基础加强计划项目、国防基础科研重大/重点项目、国家 863 项目等多项国家级项目。研究成果获得省部级技术发明一等奖 3 项、省部级其它奖项多项;发表 SCI 论文 90 余篇,出版专著 3 部;国际会议上作特邀报告二十余次;授权国家发明专利 90 余项。获国家教育教学成果二等奖 1 项,省部级教育教学成果一等奖 2 项、二等奖 3 项。Email: qhao@bit.edu.cn

国际先进光纤激光研讨会

Advanced Fiber Laser Conference, AFL2021

<https://b2b.csoe.org.cn/meeting/AFL2021.html>

2021 年 11 月 5-7 日,成都

会议议题方向 (不限于此):

Topic 1: Fiber and fiber based device

- 激光光纤设计与制备
- 特种光纤设计、制备及表征
- 高功率光纤器件

Topic2: High power fiber laser

- 高功率连续以及脉冲光纤激光技术
- 高功率拉曼光纤激光技术
- 高功率窄线宽以及单频光纤激光技术
- 其他类型高功率光纤激光技术
- 高功率光纤激光器中的模式不稳定
- 高功率光纤激光器的光束表征与操控技术
- 高功率光纤激光器的泵浦技术

Topic3: Ultrafast fiber laser and nonlinear fiber optics

- 超快光纤激光技术
- 光纤非线性效应及动力学
- 拉曼光纤激光技术

Topic 4: Mid-infrared fiber laser and fiber SC

- 1.9~3 微米区间的中红外连续和脉冲光纤激光技术
- 3~5 微米区间的中红外连续和脉冲光纤激光技术
- 中红外波段的二维材料及其在中红外光纤激光器中的应用
- 中红外超连续谱和孤子自频移的产生技术
- 中红外玻璃光纤的设计和制备
- 新型的中红外光纤器件

Topic 5: Beam combination of fiber lasers

- 高功率光纤激光相干合成技术
- 高功率光纤激光光谱合成技术
- 其他新型高效光纤激光合成技术
- 高性能合成器件技术研究

Topic 6: Fiber laser application

- 高能光纤激光器在激光制造和材料加工中的应用
- 单频光纤激光器在传感、测量、激光雷达及激光制冷中的应用
- 光纤激光器在成像、照明和空间光通信中的应用
- 特种光纤激光的应用。

投稿网址: <https://b2b.csoe.org.cn/submission/AFL2021.html>, 第一轮截止时间 2021 年 4 月 30 日。