

## 低维半导体偏振光探测器研究进展

魏钟鸣 夏建白

### Recent progress in polarization-sensitive photodetectors based on low-dimensional semiconductors

Wei Zhong-Ming Xia Jian-Bai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 163201 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20191002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191002>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 低维铁电材料研究进展

Research progress of low-dimensional ferroelectric materials

物理学报. 2018, 67(15): 157701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180483>

#### 低维超导的实验进展

Recent experimental progress in low-dimensional superconductors

物理学报. 2015, 64(21): 217405 <https://doi.org/10.7498/aps.64.217405>

#### 超宽禁带半导体 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及深紫外透明电极、日盲探测器的研究进展

Ultra-wide bandgap semiconductor of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and its research progress of deep ultraviolet transparent electrode and solar-blind photodetector

物理学报. 2019, 68(7): 078501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181845>

#### 二维多丝室探测器读出方法的优化

Readout method for two-dimensional multi-wire proportional chamber

物理学报. 2017, 66(7): 072901 <https://doi.org/10.7498/aps.66.072901>

#### 具有变革性特征的红外光电探测器

Recent progress on advanced infrared photodetectors

物理学报. 2019, 68(12): 120701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190281>

#### 低维原子/分子晶体材料的可控生长、物性调控和原理性应用

Construction, physical properties and applications of low-dimensional atomic/molecular crystals

物理学报. 2018, 67(12): 126801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180846>

## 专题：纪念黄昆先生诞辰百年

**编者按** 2019 年是世界著名物理学家、中国固体和半导体物理学奠基人之一，黄昆先生诞辰 100 周年。黄昆先生不仅在固体物理领域取得了卓越的成就，而且更重要的是，他花费了大量的精力为我国培养了大批半导体科技人才。

1956 年 3 月，我国集中了全国 600 多位科学家，制定了 12 年科学技术发展规划，提出了“发展计算技术、半导体技术、无线电电子学、自动学和远距离操纵技术的紧急措施方案”。同年暑假，我国创办了第一个五校联合半导体专业，黄昆先生任半导体教研室主任，谢希德先生任副主任，从此开启了我国自主培养半导体科技人才的新纪元。经过了 60 多年的发展，我国半导体学科，包括半导体材料、物理和器件等方面都取得了巨大的进步。为纪念黄昆先生，2019 年 9 月 1—3 日，中国科学院半导体研究所、北京大学、中国物理学会和九三学社在北京西郊宾馆联合举办“纪念黄昆先生诞辰 100 周年暨半导体学科发展研讨会”，本刊特邀请部分与会专家撰写了半导体材料、物理和器件等领域的研究论文和综述文章，组成专题。本专题包括 1 篇研究论文和 10 篇综述文章，分别来自中国科学院上海微系统研究所、长春光机所、半导体研究所、物理研究所和浙江大学、电子科技大学、南昌大学、东北师范大学、香港大学等单位的科研团队，介绍了国内外半导体学科相关领域的最新进展和发展方向，希望本专题的出版可以为我国半导体学科的学术交流和未来发展做一些贡献，并以此来纪念黄昆先生百年诞辰。

## 低维半导体偏振光探测器研究进展\*

魏钟鸣<sup>†</sup> 夏建白

(中国科学院半导体研究所, 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

(2019 年 6 月 29 日收到; 2019 年 8 月 12 日收到修改稿)

偏振光探测在遥感成像、环境监测、医疗检测和军事设备等领域都具有很好的应用价值，目前已经有一系列偏振探测和成像产品。随着信息器件进一步小型化、集成化，基于新型低维材料的偏振光探测器可以直接利用材料本征的各向异性对偏振光进行感知，在未来偏振光探测领域有很好的应用前景。很多二维/一维半导体材料，例如：黑磷， $\text{ReS}_2$ ， $\text{GaTe}$ ， $\text{GeSe}$ ， $\text{GeAs}$  及  $\text{ZrS}_3$  等，都具有较强的本征面内各向异性，可以用于高性能偏振光探测器。基于此类低维半导体材料设计的不同结构类型的偏振光探测器已经覆盖了紫外、可见以及红外等多个波段。本文总结了近年来相关领域的研究进展和我们课题组的一些工作。

**关键词：**光探测器，偏振，低维半导体，二维材料**PACS：**32.10.Dk, 32.30.Jc, 42.25.Ja, 85.60.Dw**DOI：**10.7498/aps.68.20191002

## 1 引言

光波包含了强度、频率、相位及偏振的信息，一般对光的强度和频率信息利用较多。偏振也是一种非常重要的光学信息，对于自然界中的任何物体，光在经过反射和透射之后，都会包含物体自身特性所决定的偏振光谱信息。基于偏振光的探测器

在遥感成像<sup>[1]</sup>、环境监测、医疗检测<sup>[2]</sup>和军事设备<sup>[3]</sup>等方面都有很好的应用前景。从 20 世纪 70 年代开始，偏振光探测器技术已经开始不断地发展和改进，先后经历了旋转偏振片型、分振幅型、液晶调制/声光可调滤波型、分波前/分孔径型、通道调制型及微纳器件型等多种类型的演变和改进<sup>[4]</sup>。目前，光电探测器都向着小型化、模块化的高度集成器件方向发展。要实现高度集成化的偏振光探测器，其

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61622406)。

<sup>†</sup> 通信作者。E-mail: [zmwei@semi.ac.cn](mailto:zmwei@semi.ac.cn)

中一个方法是利用有偏振效应的光学介质覆盖在光强探测器的表面, 对入射光的偏振状态先进行选择. 利用等离子激元微腔的偏振选择和量子阱及量子级联探测器的光跃迁选择, 可以实现具有较高消光比的偏振光探测器<sup>[5,6]</sup>. 超材料结构也可以用来对入射光进行偏振状态的选择, 一种双开口的金属谐振环阵列结构已经被验证只能允许特定偏振方向的光透过<sup>[7]</sup>, 将这种结构集成在光强探测器上就可以实现对偏振光的探测. 另一个更加直接地实现高度集成偏振光探测器的方法是使用本身就具有偏振光敏感性的半导体材料作为探测器的工作介质. 低维半导体材料在结构上具有明显的各向异性, 特别适合作为偏振光探测器的工作介质, 其中二维材料又是一类很具代表性的低维半导体材料.

自 2004 年发现石墨烯以来, 以石墨烯为代表的二维材料就成为一个热门的研究方向<sup>[8]</sup>. 二维材料具有层状的原子结构, 在层内原子通过共价键紧密结合在一起, 而层与层之间是通过较弱的范德瓦尔斯力连接. 这一特殊的原子结构很容易制备获得原子级厚度的材料<sup>[9]</sup>. 二维材料的结构特征使其在超薄器件、超高集成度器件、柔性和可穿戴设备等领域都有非常好的应用前景. 近十年, 大量的研究工作致力于二维材料在各种场景中的应用开发, 其中一系列性能优异的二维半导体光电探测器被报道<sup>[10–15]</sup>, 也有通过异质结的构建来大幅提升其光电性能的<sup>[16–21]</sup>. 很多综述文章对基于低维材料的光电器件进行了全面系统地总结介绍<sup>[22–26]</sup>, 本文着重介绍其在偏振光电探测器上的应用.

很多低维材料都具有层内的各向异性<sup>[27,28]</sup>, 例如黑磷, 黑砷,  $\text{ReS}_2$ ,  $\text{ReSe}_2$ ,  $\text{GaTe}$ ,  $\text{SnSe}$ ,  $\text{GeAs}$ ,  $\text{ZrTe}_3$ ,  $\text{MoO}_3$  和  $\text{TaIrTe}_4$  等. 理论上来说, 具有层内结构各向异性的二维材料都拥有对偏振光的敏感性, 可以用于偏振光探测器. 低维半导体材料除了结构带来的各向异性, 其本身的优异光电性能保证了其在偏振光探测器上的应用前景. 目前, 基于低维半导体材料的偏振光探测器受到越来越多学者的关注, 本文对近年来这一领域内最新的研究成果和进展进行归纳总结.

## 2 各向异性特征

在介绍低维半导体偏振探测器的应用前, 我们先对低维半导体本征的一些各向异性特征进行简

短的介绍, 主要包括: 拉曼光谱学、光致发光谱、光学吸收和电输运. 偏振拉曼测试是低维各向异性材料的重要表征手段, 而且可以保护材料的结构不会在测试中被破坏. 结合实验的偏振拉曼测试和理论计算的拉曼光谱特征可以很容易判断材料的晶格取向, 而不必做一些具有破坏性的测试来获取晶格取向. 同时偏振拉曼光谱反映了材料晶体结构的各向异性, 对偏振光探测器的设计有重要的指导作用. 偏振光致发光谱反映了材料的各向异性的光学特征, 也是低维材料重要的各向异性特征. 利用材料的本征各向异性来设计偏振光探测器的性能往往由材料的各向异性光吸收特征所决定, 材料对不同方向偏振光的吸收能力和基于其设计偏振光探测器的各向异性探测特征有很高的契合度, 如果对某个方向的偏振光有很强的吸收其响应的光电流也会很大. 各向异性的低维半导体材料在不同方向电子的有效质量不同, 导致其电学输运特征也具有方向依赖性. 一般利用环绕一周的多个电极对来测试材料的各向异性电学输运. 在设计偏振光探测器时, 选择合适的沿晶体结构的电极方向有利于获得更强的光电响应强度和更大的偏振开关比. 对于晶体结构相似各向异性低维半导体材料往往拥有类似各向异性特征, 比如在相同的晶向拥有最高的光吸收系数或者载流子迁移率. 表 1 对下文将出现各种低维半导体材料的各向异性光电性能进行了总结. 接下来我们将拥有相似晶体结构的各向异性低维半导体材料归在一起进行详细的偏振光探测介绍.

## 3 偏振光探测

### 3.1 黑磷

石墨烯作为最典型的二维材料拥有非常高的迁移率<sup>[48]</sup>, 然而石墨烯的零带隙能带结构限制了它作为器件核心输运层的应用前景. 2014 年, 张远波课题组<sup>[49]</sup>发现了另外一种具有超高迁移率而且拥有本征带隙能带结构的二维半导体黑磷. 黑磷在室温下载流子迁移率高达  $1000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 单层情况下在第一布里渊区  $\Gamma$  点拥有大小约 2 eV 的直接带隙, 对于体材料其直接带隙转移到  $Z$  点为 0.3 eV 左右<sup>[49]</sup>. 如图 1(a) 所示, 黑磷的层内一个原子通过共价键和最近邻的三个磷原子连结在一起, 形成褶皱的蜂窝状结构. 图 1(b) 是黑磷的偏振拉

表 1 低维半导体材料的各向异性光电性能  
Table 1. Anisotropic optoelectronic properties of low-dimensional semiconductors.

	禁带宽度/eV	载流子迁移率/cm <sup>2</sup> ·V <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>	光响应强度	二向色性比值	参考文献
黑磷	0.3 (体材料) 1.5 (单层)	1000 (空穴, <i>x</i> )600 (空穴, <i>y</i> )	14.2 mA/W	8.7 (1550 nm)	[29]
黑砷	0.3 (体材料)1— 1.5 (单层)	376.7 (电子, zigzag)1.5 (电子, armchair) 60.7 (空穴, zigzag)10606 (空穴, armchair)			[14,30]
锑烯	1.3—1.7			100 (3.2 eV)	[31]
ReS <sub>2</sub>	1.4 (体材料)	23.1 (电子, DS-chains方向)14.8 (电子, 垂直 DS-chains方向)	10 <sup>3</sup> A·W <sup>-1</sup> (532 nm)	~ 4	[32,33]
ReSe <sub>2</sub>	1.17—1.2	10	1.5 mA·W <sup>-1</sup> (633 nm)	2 (633 nm)	[34]
MoTe <sub>2</sub>	外尔半金属		110 mA·W <sup>-1</sup> (1064 nm)		[10]
WTe <sub>2</sub>	外尔半金属			4.9 (514.5 nm)	[35]
GaTe	1.7	0.2 (空穴)	10 <sup>4</sup> A·W <sup>-1</sup> (532 nm)		[36]
TlSe	0.73		1.48 A·W <sup>-1</sup> (633 nm)	2.56 (633 nm)	[37]
SnS	1.3	20 (zigzag) $\mu_{\text{zigzag}}/\mu_{\text{armchair}} \approx 1.7$	365 A·W <sup>-1</sup> (808 nm)	1.49 (808 nm)	[38,39]
GeSe	1.34 (体材料) 1.7 (单层)		4.25 A·W <sup>-1</sup>	2.16 (808 nm)	[40]
GeS <sub>2</sub>	>3			2.1 (325 nm)	[41]
GeSe <sub>2</sub>	2.74			3.4 (450 nm)	[42]
GeAs	0.83 (体材料) 2.07 (单层)			4.4 (808 nm)	[43]
GeP	0.51 (体材料) 1.68 (单层)	电导率比值: 1.52	3.11—0.43 A·W <sup>-1</sup>	1.83 (532 nm)	[44]
GeAs <sub>2</sub>	0.98 (体材料) 1.62 (单层)	2.5 (空穴, <i>a</i> )1.3 (空穴, <i>b</i> )		2	[45]
ZrS <sub>3</sub>	1.79 (体材料)		230 m A·W <sup>-1</sup> (520 nm)	2.55 (520 nm)	[46]
TiS <sub>3</sub>	1.13		2500 A·W <sup>-1</sup> (808 nm)	4	[47]
$\alpha$ -MoO <sub>3</sub>	2.7	0.06—0.09 (电子, <i>b</i> )0.03—0.04 (电子, <i>c</i> )	67.9 A·W <sup>-1</sup>	5 (254 nm)	[12]

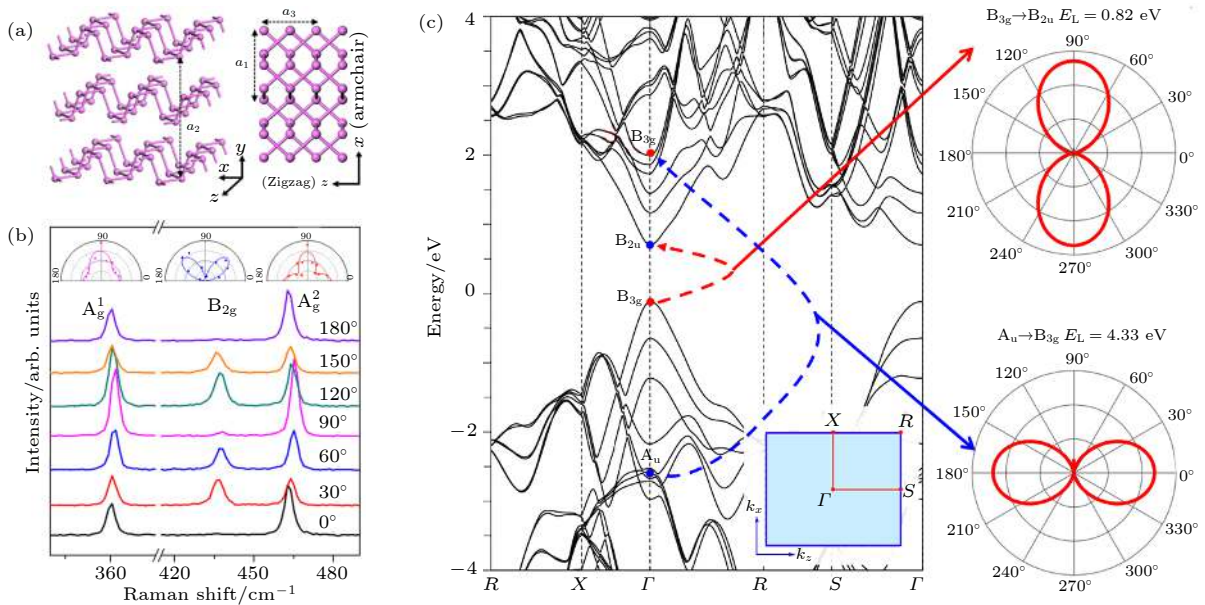


图 1 黑磷的特性<sup>[50]</sup> (a) 原子结构; (b) 典型的偏振拉曼光谱; (c) 三层黑磷的能带结构和理论计算的各向异性吸收

Fig. 1. Characteristics of black-phosphorus<sup>[50]</sup>(Reproduced with permission, Copyright 2016, American Chemical Society): (a) Atomic structure; (b) typical polarized Raman spectra; (c) band structure of trilayer black-phosphorus and theoretical polarized absorption.

曼光谱<sup>[50]</sup>. 由于黑磷的低对称晶体结构, 其对不同偏振方向的光的吸收能力也有差异. 图 1(c) 给出

了理论计算的三层厚度黑磷的能带结构和 B<sub>3g</sub>—B<sub>2u</sub> 及 A<sub>u</sub>—B<sub>3g</sub> 这两个跃迁的各向异性光吸



收<sup>[50]</sup>, 其中  $B_{3g}-B_{2u}$  的跃迁对应 0.82 eV,  $A_u-B_{3g}$  的跃迁对应 4.33 eV. 前一个跃迁对扶手方向的偏振光有最大的吸收, 而后一个是对锯齿方向的偏振光有最大的吸收. 另外, 黑磷对光的各向异性吸收性能也受到其厚度的影响.

2014 年, Hong 等<sup>[51]</sup> 人在首次对利用黑磷作为工作材料的场效应晶体管进行了光电流测试, 该黑磷晶体管对光的响应主要集中在黑磷和金属电极接触的地方, 表现出了对 785 nm 激光较好的偏振响应. 随后, Wang 等<sup>[52]</sup> 开发了一种具有圆形电极的黑磷偏振光电器件(图 2(a)), 利用圆形的电极消除电极形状对光的偏振影响, 从而获取黑磷本征的偏振响应性能. 黑磷对很宽波长范围内的光都有响应, 图 2(b) 是黑磷对 400—1700 nm 波长范围内扶手和锯齿方向的偏振光电流曲线, 扶手方向的偏振光电流响应在整个波长范围内都要强于锯齿方向, 这和前面文献中介绍的黑磷对光的各向异性吸收吻合. 黑磷的各向异性光电响应就是源自于黑磷的二向色性, 即对不同偏振方向的光吸收能力不同. 此外, 利用场效应晶体管的栅极进行调控可以有效地增强器件偏振光探测的能力<sup>[52]</sup>. 由于不存在晶格失配的问题, 二维材料很容易用来搭建异质结器件. 利用黑磷和其他二维材料组成的异质结同样可以用来进行偏振光探测, 其中黑磷起到光栅的作用, 提供整个器件偏振探测的能力,  $WSe_2$  作为沟道材料将光电流输送至源漏电极<sup>[53]</sup>. 图 2(c) 展示了另外一种结构的黑磷/ $MoS_2$  异质结偏振光探

测器, 该探测器的偏振光电流开态和关态差距接近一个数量级<sup>[54]</sup>. 等离子激元对器件光学性能的增强有很好的辅助作用, Prabhu 等<sup>[29]</sup> 利用特殊设计的等离子激元结构增强了黑磷偏振光探测器的性能, 如图 2(d) 所示, 使其拥有了在扶手和锯齿方向高达 8.7 的光电流比值.

### 3.2 黑砷、黑砷磷及锑稀

黑砷拥有和黑磷相同类型的晶体结构<sup>[14]</sup>, 也具有较好的各向异性. 对比其他各向异性二维材料, 黑砷具有更突出的电学各向异性特征. 其各向异性电导和载流子迁移率在扶手方向具有最高值, 在锯齿方向具有最小值, 其比值分别为 6.4 和 28<sup>[30]</sup>. 黑砷作为黑磷的孪生材料, 两者可以组成任意比例的合金材料  $black-As_xP_{1-x}$ <sup>[55,56]</sup>. 黑砷磷合金同样是各向异性的材料, 通过对组分的调控可以改变合金的能带结构及带隙, 其带隙能够实现 0.269—0.326 eV 范围内的调控<sup>[55]</sup>, 选择合适的组分比例就能得到适用于不同波段的偏振光探测器. 对于  $black-As_{0.91}P_{0.09}$  其具有最高的比探测率达到  $6 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ , 比商业的中红外探测器还要高一个数量级<sup>[55]</sup>.

黑磷和黑砷在空气中不稳定, 容易受到空气中的氧气和水分影响而变质<sup>[14,57]</sup>, 这种不稳定性限制了黑磷和黑砷在实际应用中的表现. 锑稀是一种稳定的单元素二维材料, 可以在大气环境下甚至浸没在水中保存数月<sup>[58,59]</sup>. 锑稀晶体的原子分布在两个

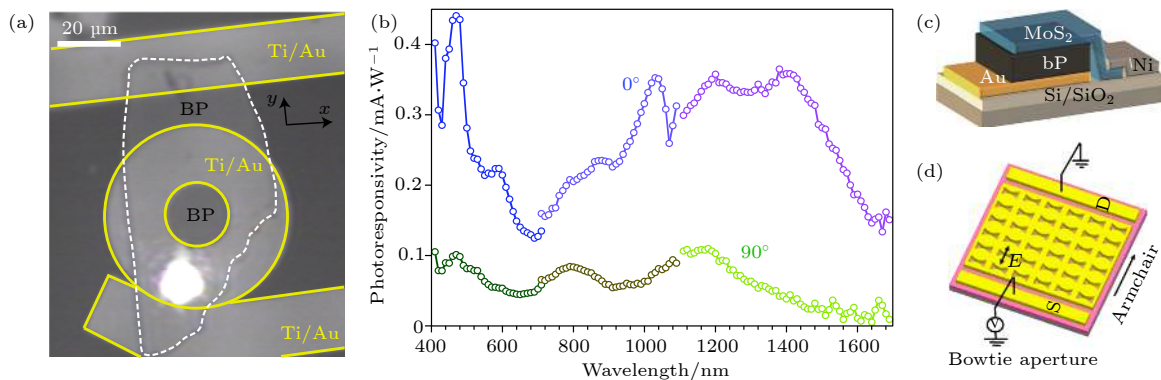


图 2 (a) 圆形电极的偏振光探测器的显微镜照片<sup>[52]</sup>; (b) 沿扶手和锯齿方向 400—1700 nm 波长范围内黑磷的偏振光电流响应<sup>[52]</sup>; (c) 黑磷/ $MoS_2$  异质结偏振光探测器<sup>[54]</sup>; (d) 等离子激元修饰的黑磷偏振光探测器<sup>[29]</sup>

Fig. 2. (a) Optical image of the polarized-light detector with the circular electrode, (b) polarized photoresponse along armchair and zigzag orientations under 400–1700 nm illumination of black-phosphorus (reproduced with permission<sup>[52]</sup>, Copyright 2015, Springer Nature); (c) polarized-light detector based on the black-phosphorus/ $MoS_2$  heterojunction (reproduced with permission<sup>[54]</sup>, Copyright 2018, Springer Nature); (d) polarized-light detector enhanced by the plasmonic structure (reproduced with permission<sup>[29]</sup>, Copyright 2018, American Chemical Society).

原子层组成蜂窝状的晶体结构. Chu 等<sup>[31]</sup>研究了铈稀对偏振光的探测能力, 铈稀对 3.0—3.4 eV 的光子表现出较强的光电响应, 同时也有较强的各向异性. 能带结构中  $\Gamma$  点的电子跃迁在铈稀的光电响应中起重要作用. 基于铈稀的偏振光探测器对锯齿方向的光电流要比扶手方向高一个数量级<sup>[31]</sup>.

### 3.3 过渡金属二硫属化合物

过渡金属二硫属化合物 (TMDs) 典型的晶体结构是由两层硫族原子 ( $X$ ) 包裹一层过渡族金属原子 ( $M$ ) 组成的  $X$ - $M$ - $X$  三明治结构. TMDs 中的  $\text{MoS}_2$  由于其天然有带隙的能带结构而受到研究者的关注<sup>[60]</sup>, 带隙的存在极大地方便了光电子器件的设计, 随后大量的研究工作开始聚焦于这一类二维材料<sup>[61–65]</sup>. TMDs 中的  $\text{ReS}_2$ ,  $\text{ReSe}_2$ ,  $\text{MoTe}_2$  和  $\text{WTe}_2$  具有低对称性的晶体结构, 是优异的各向异性材料<sup>[66]</sup>. 单层的  $\text{ReS}_2$ <sup>[32,67]</sup>,  $\text{ReSe}_2$ <sup>[68,69]</sup> 和  $\text{MoTe}_2$ <sup>[70]</sup> 都拥有扭曲的 1T 相 (1T') 的  $X$ - $M$ - $X$  的原子排列方式, 如图 3(a) 所示.  $\text{WTe}_2$  呈现为 Td 相的晶体结构<sup>[71]</sup>, 其晶体结构如图 3(b) 所示. 在这几个各向异性 TMDs 中  $\text{ReS}_2$  和  $\text{ReSe}_2$  是半导体<sup>[72]</sup>, 而  $\text{MoTe}_2$  和  $\text{WTe}_2$  是 II 型的 Weyl 半金属<sup>[73–75]</sup>.

Liu 等<sup>[33]</sup>利用  $\text{ReS}_2$  实现了对偏振光的探测, 图 4(a) 是偏振光电测试的示意图. 当偏振光的偏振方向与 Re 原子链平行时, 有最大的光吸收和光

电流, 垂直此反向时有最小值, 如图 4(b) 所示.  $\text{ReS}_2$  拥有很高的外量子效率, 然而其光响应速度却很慢.  $\text{ReSe}_2$  也拥有出色的各向异性<sup>[72]</sup>, 其体材料原子层平面内对 1.17—1.2 eV 的光子表现出各向异性的偏振光吸收特性<sup>[76]</sup>. Zhang 等<sup>[34]</sup>利用化学气相沉积 (CVD) 生长的  $\text{ReSe}_2$  纳米片制备的场效应晶体管研究了其各向异性光电性能. 通过调控栅极电压, 可以增强  $\text{ReSe}_2$  对光的响应强度.  $\text{ReSe}_2$  也是对沿 Re 链方向的偏振光有最强的光电响应, 对垂直此方向的响应最弱. 栅极电压的引入可以增强平行时的光响应强度, 同时对垂直方向偏振光的光响应变化不大, 最终提高了  $\text{ReSe}_2$  的偏振光探测性能.  $\text{ReS}_2$  和  $\text{ReSe}_2$  具有相似的晶体结构, 两者可以形成  $\text{ReS}_{2x}\text{Se}_{2(1-x)}$  合金<sup>[77]</sup>, 其能带带隙可以在 1.31—1.62 eV 之间调控<sup>[78]</sup>.  $\text{ReS}_2$  是 n 型半导体,  $\text{ReSe}_2$  是 p 型半导体, 利用水平的  $\text{ReS}_2/\text{ReSe}_2$  异质结可以形成具有整流效应的 pn 结, 同时也可以作为偏振光探测器<sup>[79]</sup>. 图 4(c) 是  $\text{ReS}_2/\text{ReSe}_2$  pn 结的各向异性光电流曲线. 如图 4(d) 所示,  $\text{WTe}_2$  作为光电探测器也具有一定的偏振光探测能力<sup>[35]</sup>.

### 3.4 III 族硫属化合物

$\text{GaTe}$ <sup>[80]</sup>,  $\text{TlS}$ <sup>[81]</sup> 和  $\text{TlSe}$ <sup>[37]</sup> 是具有各向异性的 III 族硫属化合物.  $\text{GaTe}$  拥有大约 1.7 eV 的直接带隙和超高 ( $10^4 \text{ A}\cdot\text{W}^{-1}$ ) 超快 (6 ms) 的光响应<sup>[36,82]</sup>. 如图 5(a) 所示,  $\text{GaTe}$  的晶体结构和  $\text{GeAs}$  相似,  $\text{GaTe}$  的体材料拥有对称性较低的  $C_{2h}^3(C 2/m)$  对称. 各向异性的  $\text{GaTe}$  很有希望用于偏振光探测器<sup>[80]</sup>.  $\text{TlSe}$  晶体拥有低对称的四方原子结构, 图 5(b) 展示了  $\text{TlSe}$  沿  $z$  轴的扫描透射电子显微镜 (STEM) 图像. 图 5(c) 是基于  $\text{TlSe}$  的偏振光探测器在 633 nm 红光下的光电流随入射光偏振角度的变化, 光电流在锯齿方向具有最大值, 扶手方向具有最小值, 二向色比约为 2.65<sup>[37]</sup>.

### 3.5 IV 族硫属化合物

IV 族硫属化合物普遍具有较强的各向异性. 各向异性的 IV 族硫属化合物主要包括两类:  $\text{MX}$  和  $\text{GeX}_2$  ( $M$  为金属原子 Ge 或者 Sn,  $X$  为硫族原子 S 或者 Se). 如图 6(a) 所示,  $\text{MX}$  具有类似黑磷的褶皱蜂窝状晶体结构, 金属原子和硫族原子交叠排列在一起<sup>[83]</sup>.  $\text{MX}$  晶体对比黑磷稳定性要更好一些, 而且它们都是良好的光电材料. 其中  $\text{SnSe}$  还

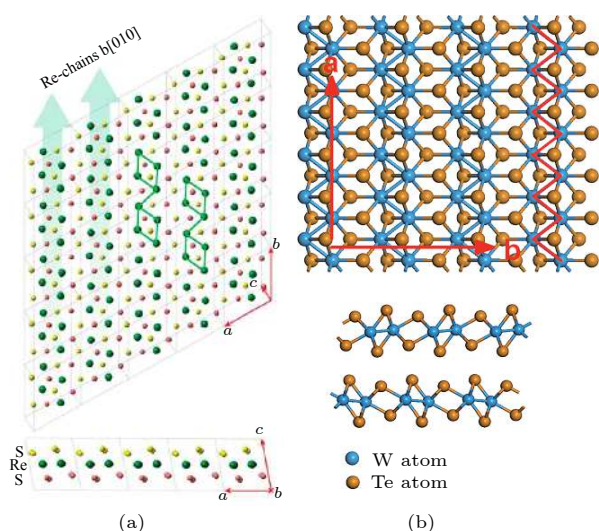


图 3 原子结构 (a)  $\text{ReS}_2$ <sup>[32]</sup>; (b)  $\text{WTe}_2$ <sup>[71]</sup>

Fig. 3. Crystal structures: (a)  $\text{ReS}_2$  (reproduced with permission<sup>[32]</sup>, Copyright 2015, American Chemical Society); (b)  $\text{WTe}_2$  (reproduced with permission<sup>[71]</sup>, Copyright 2016, RSC Publishing).

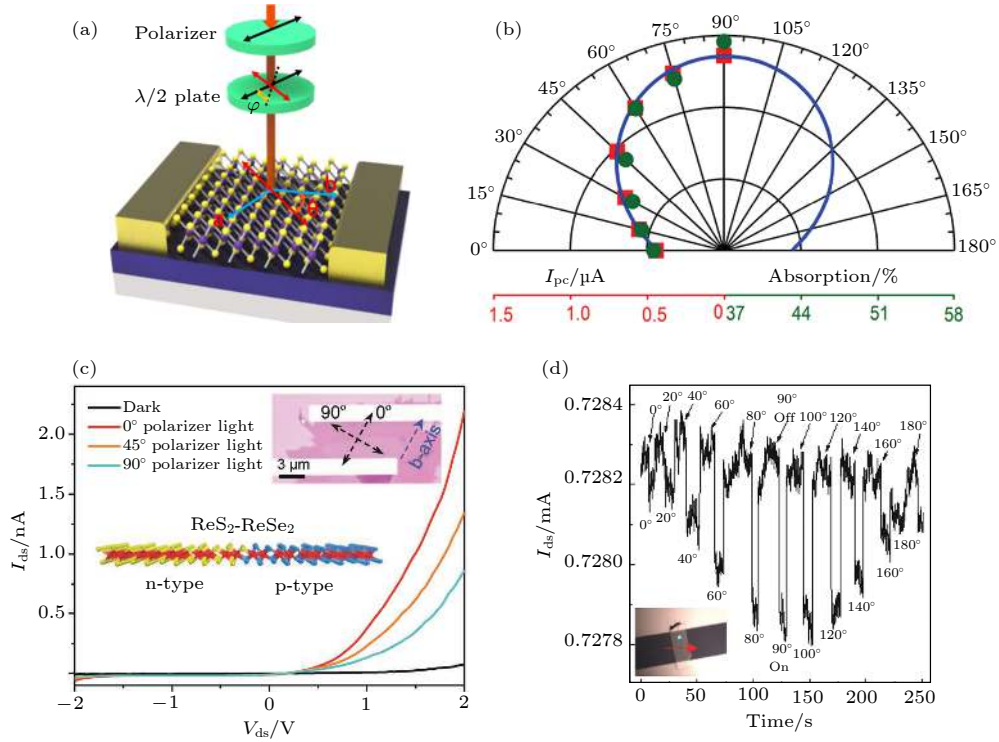


图 4 (a) 偏振光电测试示意图<sup>[34]</sup>; (b) 极坐标下 ReS<sub>2</sub> 的偏振光吸收和光电流<sup>[33]</sup>; (c) ReS<sub>2</sub>/ReSe<sub>2</sub> 异质结偏振光响应<sup>[79]</sup>; (d) WTe<sub>2</sub> 偏振光探测性能<sup>[35]</sup>

Fig. 4. (a) Schematic of polarized photoelectric test(reproduced with permission<sup>[34]</sup>, Copyright 2016, American Chemical Society); (b) photocurrent and absorption of ReS<sub>2</sub> in the polar coordinates(Reproduced with permission<sup>[33]</sup>, Copyright 2016, John Wiley and Sons); (c) polarized photoresponse of ReS<sub>2</sub>/ReSe<sub>2</sub> heterojunction(reproduced with permission<sup>[79]</sup>, Copyright 2018, John Wiley and Sons); (d) polarized photoresponse of WTe<sub>2</sub>(reproduced with permission<sup>[35]</sup>, Copyright 2018, John Wiley and Sons).

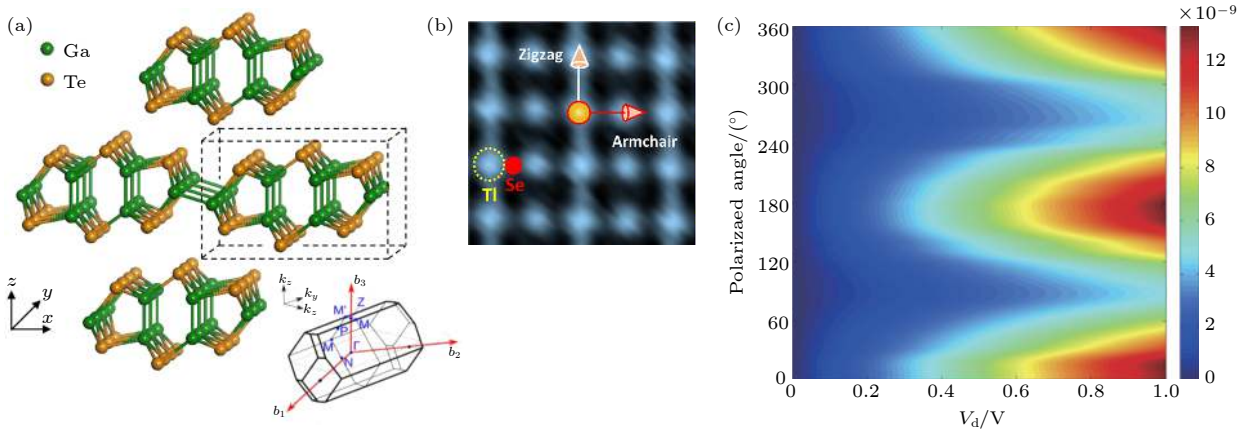


图 5 (a) GaTe 的晶体结构<sup>[80]</sup>; (b) TlSe 的 STEM 图像<sup>[37]</sup>; (c) 基于 TlSe 的偏振光探测器的角分辨光电流<sup>[37]</sup>

Fig. 5. (a) Crystal structure of GaTe(reproduced with permission<sup>[80]</sup>, Copyright 2016, American Chemical Society); (b) STEM image of TlSe and (c) photocurrent of the polarized photodetector based on TlSe (reproduced with permission<sup>[37]</sup>, Copyright 2018, American Chemical Society).

具有出色的热电性能<sup>[84,85]</sup>. GeS<sub>2</sub> 和 GeSe<sub>2</sub> 具有相似的各向异性的晶体结构, 图 6(b) 展示的是 GeS<sub>2</sub> 的原子结构示意图. GeS<sub>2</sub> 和 GeSe<sub>2</sub> 都是宽带隙的半导体, 他们的带隙分别为 3.71 eV<sup>[41]</sup> 和 2.7 eV<sup>[86]</sup>.

GeSe 是一种优秀的偏振探测材料<sup>[40,87]</sup>. 本课

题组对 GeSe 的偏振光吸收和光探测进行了全面的研究<sup>[40]</sup>, 拥有最高为 2.16 偏振光探测的二向色性比值, 在第 4 部分有详细介绍. SnS 具有各向异性的电输运特征, 其在锯齿方向的载流子迁移率是扶手方向的 1.7 倍<sup>[39]</sup>. 在 808 nm 的光照下对比沿



扶手方向的电流,沿锯齿方向的电流具有更快的响应速度<sup>[38]</sup>,图6(c)展示了两种情况下的光响应时间.由于GeS<sub>2</sub>拥有宽带隙的能带结构,其可以在紫外波段的偏振光探测.实验表明,GeS<sub>2</sub>在紫外区域偏振光探测的二向色性比值为2.1<sup>[41]</sup>.GeSe<sub>2</sub>偏振光探测器拥有这一类材料中最高偏振光电流二向色性比值(3.4)<sup>[42]</sup>,图6(d)是其在450 nm线偏振光照射下光电流随入射光偏振角度变化的极坐标图.

### 3.6 IV-V族化合物

IV-V族化合物是一族具有IV族元素和V族元素的整合优势材料,例如其化合物具有良好的稳定性,高的迁移率,可调的带隙和高的面内各向异性.其中,GeAs,GeP,SiP和GeAs<sub>2</sub>是IV-V族化

合物中具有代表性的材料.GeAs,GeP和SiP具有相似的晶体结构如图7(a)所示<sup>[88]</sup>,它们均属于C2/m空间群中的低对称性的单斜晶体.GeAs<sub>2</sub>的晶体结构如图7(b)所示<sup>[45]</sup>.从晶体结构上来看它们都具有很强的各向异性.

IV-V族化合物的单层的厚度为0.7—0.9 nm.为了研究其结构的面内各向异性,GeAs<sup>[43,89]</sup>,GeP<sup>[44]</sup>,SiP<sup>[90]</sup>和GeAs<sub>2</sub><sup>[45]</sup>的偏振拉曼光谱已有详细的报道,它们的偏振拉曼光谱反映了其都具有各向异性的晶体特征.而且这类面内各向异性强的化合物的拉曼特征峰位很多,每个特征峰强度都随激发光偏振角度的变化而变化.GaAs具有极强的光敏感性,其独特的偏振吸收光谱在一个特定波长不同方向的吸收强度会发生反转,其二向色性比值高达4.4,本课题组对其进行了详尽的研究,具体内

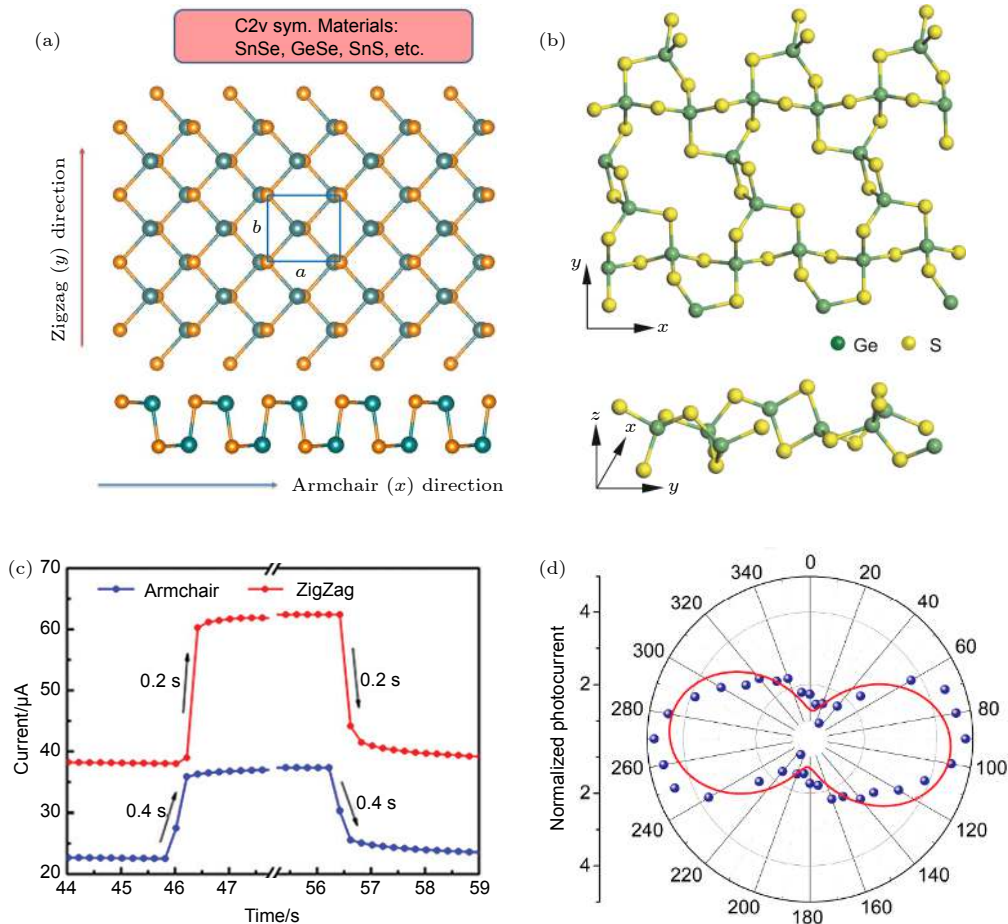


图6 (a) MX晶体的原子结构<sup>[83]</sup>; (b) GeS<sub>2</sub>晶体的原子结构<sup>[41]</sup>; (c) SnS沿不同方向的光电流响应速度<sup>[38]</sup>; (d) GeSe<sub>2</sub>对450 nm偏振光响应<sup>[42]</sup>

Fig. 6. (a) Crystal structure of MX (reproduced with permission<sup>[83]</sup>, Copyright 2015, AIP Publishing); (b) crystal structure of GeS<sub>2</sub>(reproduced with permission<sup>[41]</sup>, Copyright 2019, John Wiley and Sons); (c) response times of SnS along different directions(reproduced with permission<sup>[38]</sup>, Copyright 2017, Royal Society of Chemistry); (d) polarized photocurrent of GeSe<sub>2</sub> under the 450 nm illumination(reproduced with permission<sup>[42]</sup>, Copyright 2018, American Chemical Society).



容在第 4 部分<sup>[43]</sup>. 基于 GeP 薄片的光电探测器已被制备出, 分别测量  $X$  轴和  $Y$  轴的光响应电流可得知, GeP 晶体的光响应各向异性比率为 1.83<sup>[44]</sup>. GeAs<sub>2</sub> 可以实现二向色性比为 2 左右的偏振光探测器<sup>[45]</sup>.

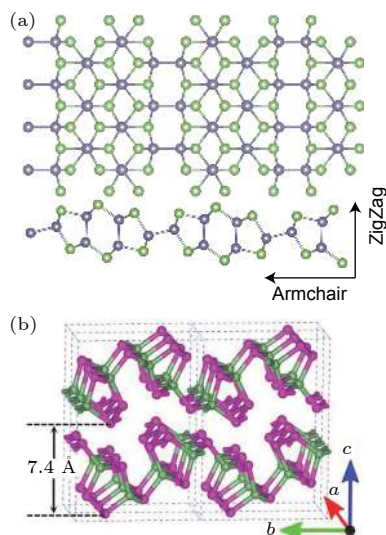


图 7 (a) GeAs, SiAs, GeP 和 SiP 的晶体结构; (b) GeAs<sub>2</sub> 的晶体结构<sup>[45]</sup>

Fig. 7. (a) Crystal structures of GeAs, SiAs, GeP, and SiP; (b) crystal structures of GeAs<sub>2</sub> (reproduced with permission<sup>[45]</sup>, Copyright 2018, John Wiley and Sons).

### 3.7 准一维材料

在 2001 年研究者们就已经注意到了一些传统半导体的纳米线结构所表现出来的光学各向异性. 如 Fan 等<sup>[91]</sup> 制备了基于单根 ZnO 纳米线的偏振光探测器, Wang 等<sup>[92]</sup> 制备了基于 InP 纳米线的偏振光探测器. 准一维材料一直以来都是纳米科学领域里活跃的热点之一<sup>[93]</sup>. 近年来, 具有各向异性晶体结构的准一维材料也受到学者的较多关注, 比如: 四方晶系的 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub><sup>[94]</sup>, 单斜晶系的 ZrS<sub>3</sub> 和 TiS<sub>3</sub><sup>[46,47,95]</sup>, 六方晶系的 BaTiS<sub>3</sub><sup>[96]</sup>, 正交晶系的 Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub><sup>[97,98]</sup> 以及 KP<sub>15</sub><sup>[99]</sup> 等.

准一维 ZrS<sub>3</sub> 和 TiS<sub>3</sub> 纳米带可以用于偏振光的探测<sup>[46,47]</sup>. 图 8(a) 和图 8(b) 分别展示了具有代表性的 ZrS<sub>3</sub> 的光学图像和晶体结构示意图. ZrS<sub>3</sub> 纳米带在 488 nm 波长处具有最强的各向异性, 450 nm 激光照射下具有 1.73 的二向色性比值<sup>[46]</sup>. TiS<sub>3</sub> 纳米带透射光谱表现出非常强烈的偏振光角度依赖关系<sup>[95]</sup>. 这些光学上的各向异性都使得材料在偏振光探测中具有一定优势. 在这类准一维材

料偏振光探测器中, TiS<sub>3</sub> 纳米带/Si 异质结的偏振光探测器件表现出非常高的二向色比值 (3.5)<sup>[95]</sup>. 在未来的偏振光探测领域, 可基于准一维的 TiS<sub>3</sub> 纳米带设计不同种类的偏振光探测器来使得探测性能达到最佳. Niu 等<sup>[96]</sup> 系统研究了准一维 BaTiS<sub>3</sub> 的光学各向异性, BaTiS<sub>3</sub> 晶体对 200 nm 到 16 μm 的波长范围内都具有各向异性. KP<sub>15</sub> 是一种稳定的各向异性材料, 其晶体结构是由钾原子连接的反平行五边形管状磷原子组成, 如图 8(c) 所示. KP<sub>15</sub> 容易剥离成纳米带的形状, 也是一种准一维的二维材料, 其偏振拉曼光谱的各个振动模式都受到激发光偏振方向的影响<sup>[99]</sup>.

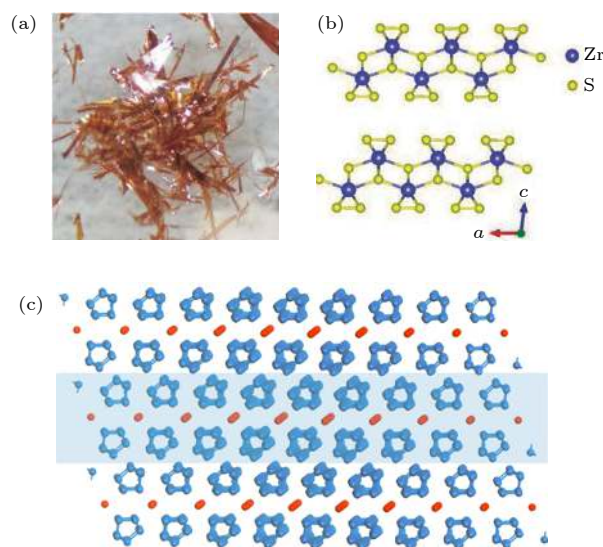


图 8 (a) ZrS<sub>3</sub> 的光学图像<sup>[46]</sup>; (b) ZrS<sub>3</sub> 的晶体结构<sup>[46]</sup>; (c) KP<sub>15</sub> 原子结构示意图<sup>[99]</sup>

Fig. 8. (a) Optical image of ZrS<sub>3</sub> and (b) crystal structure of ZrS<sub>3</sub> (reproduced with permission<sup>[46]</sup>, Copyright 2019, John Wiley and Sons); (c) crystal structure of KP<sub>15</sub> (reproduced with permission<sup>[99]</sup>, Copyright 2018, American Chemical Society).

### 3.8 其他

除了上面介绍的各向异性二维材料外, 还有一些比较独特的各向异性二维材料. α-MoO<sub>3</sub> 纳米片拥有各向异性的晶格结构. α-MoO<sub>3</sub> 的能带带隙约 2.7 eV, 其在 254 nm 的紫外光照射下的光电流沿  $b$  轴方向比  $c$  轴方向要高 5 倍<sup>[12]</sup>. II 型 Weyl 半金属三元化合物 TaIrTe<sub>4</sub> 也具有各向异性的光电性质<sup>[100,101]</sup>. 狄拉克半金属 ZrTe<sub>5</sub> 在低温下其沿  $a$  轴的空穴霍尔迁移率约为 3000 cm<sup>2</sup>·V<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>, 沿  $c$  轴的约为 1500 cm<sup>2</sup>·V<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup><sup>[102]</sup>. 除了本征的各向异性

之外, 应力调控也能向晶体结构中引入各向异性.  $\text{MoS}_2$  是面内对称的晶体结构, 通过施加应力可以改变其晶格原子的排列从而使其具有各向异性<sup>[103]</sup>.

#### 4 本课题组的相关工作

我们课题组围绕“新型低维半导体的物理性质和光电器件”这个主题进行了长期的探索, 以功能化信息器件的应用需求为牵引, 针对低维半导体从理论和实验两个方面进行了长期深入的研究, 相关工作取得了一系列进展<sup>[12–15,40,43,46,47,104–122]</sup>. 我们的主要工作包括: 通过精准可控的磁性元素掺杂, 制备了具备铁磁性的二维半导体<sup>[15,109,111]</sup>; 采用转移堆叠<sup>[107,113,118,119]</sup>或者直接气相沉积生长<sup>[110,112]</sup>等方法, 高效地获得高质量的低维半导体异质结, 有效地提高光电器件的性能. 最近几年, 我们还针对低维半导体的偏振光探测器, 获得了一系列具有不同带隙的面内各向异性低维半导体, 实现了从紫外到近红外区偏振光的高效探测<sup>[12,14,40,43,46,47,122]</sup>, 并能够获得高分辨率的成像, 为广谱高效的光探测集成设备打下良好基础.

在具有面内各向异性的新型低维半导体材料体系探索方面, 我们研究了一种新型二维元素半导体黑砷 (B-As). 黑砷 (B-As) 具有和黑磷相似的晶体结构和更强的面内各向异性, 理论上已经有预测其是微纳电子器件领域的一种新的候选材料. 然而, 迄今为止, 黑砷晶体的实验报道还非常少. 我们通过利用黑砷的天然矿, 首次成功制备出单层和少层黑砷场效应晶体管, 并系统研究了电场调控下载流子输运特性<sup>[14]</sup>. 发现二维 B-As 具备比其他二维材料更明显的各向异性, 其晶体管器件具备较大的电流开关比以及相对较高的载流子迁移率. 发现其性能与材料厚度有直接关系, 当样品厚度约为 5.7 nm 时所得载流子迁移率最高, 可达  $59 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 当样品厚度约为 4.6 nm 时所得开关电流比最高, 可达  $> 10^5$ . 单层黑砷的迁移率可达  $51 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 开关比为  $10^5$ . 载流子迁移率的温度依赖性研究表明载流子迁移率的峰值出现于 230 K 处, 低于 230 K 时, 载流子主要受限于杂质散射的影响, 而晶格散射在高温下占主导地位. 此外, B-As 晶体也表现出良好的环境稳定性, 少层黑砷晶体管器件在空气中暴露一个月后仍能正常工作. 因此, 黑砷在新型微纳电子器件包括偏振光探测器件等方面都具有良

好的应用前景.

在偏振光探测器件研究方面, 我们课题组通过发展不同带隙的面内各向异性低维半导体, 实现了从紫外-可见-近红外区的高效偏振探测.

在紫外光区, 成功获得超过 100  $\mu\text{m}$  尺寸大面积宽带隙 ( $> 2.7 \text{ eV}$ ) 的二维氧化物  $\text{MoO}_3$ , 实现对日盲区 254 nm 紫外光实现有效的各向异性探测, 光响应率高达 67.9 A/W<sup>[12]</sup>. 最近, 我们发现二维单层的  $\text{GeSe}_2$  具有高达 2.96 eV 的宽带隙, 其器件可以获得对 266 nm 日盲区紫外光的高效探测, 光响应率达 200 mA/W, 并实现了对紫外偏振光的有效探测<sup>[122]</sup>.

在可见光区, 采用带隙 1—2 eV 的高度各向异性的二维硫族化合物  $\text{GeSe}$  和  $\text{ZrS}_3$  实现了对红、黄、蓝三原色光谱范围内的有效偏振探测<sup>[40,46]</sup>. 图 9(a) 是  $\text{GeSe}$  的偏振吸收光谱, 可以看到在 400—950 nm 的波长范围内对不同偏振方向的光有不一样的吸收强度, 其吸收系数比值在 532 nm 时为 1.09, 638 nm 时为 1.26, 808 nm 时有最大值 3.02, 三个波长下偏振光探测的二向色性比值分别为 1.09, 1.44 和 2.16.  $\text{ZrS}_3$  属于准一维的各向异性光电材料, 图 9(b) 中展示了随着偏振光方向与  $\text{ZrS}_3$  纳米带 (b) 轴夹角由  $0^\circ$  到  $180^\circ$  变化时的吸收光谱图, 在 488 nm 波长处的光吸收各向异性特征最明显. 如图 9(c), 分别为 450 nm 激光和 532 nm 激光照射下的光电流等高线图, 其在 450 nm 激光照射下具有 1.73 的二向色比值.

在红外光区, 我们发现二维  $\text{GeSe}$  和  $\text{GeAs}$  都具备很好的面内各向异性. 制备成偏振光探测器后,  $\text{GeSe}$  最佳的各向异性的光响应在短波近红外 808 nm 处<sup>[40]</sup>, 图 10(a) 展示了基于  $\text{GeSe}$  偏振光探测器在 808 nm 光照下的偏振光电流特性,  $\text{GeSe}$  可以适用于近红外的偏振光探测器. 围绕另一种新型的二维半导体  $\text{GeAs}$ , 实现了在可见光区和近红外区优异的偏振吸收与探测性能, 并且发现了在可见光区和红外光区的特殊光学翻转特性, 具有较高的二向色性比<sup>[43]</sup>. 图 10(b) 为  $\text{GeAs}$  材料的偏振光吸收光谱图, 其吸收波长为 400—1370 nm. 在偏振吸收光谱中, 830 nm 的线偏振光的最大各向异性吸收比率为 1.42, 最强光吸收方向在 623 nm 波长时发生了反转, 反转角度为  $80^\circ$ . 图 10(c) 为  $\text{GeAs}$  在 520 nm 和 830 nm 线偏振光不同偏振角度照射下的光响应电流的极坐标图. 在 830 nm 波

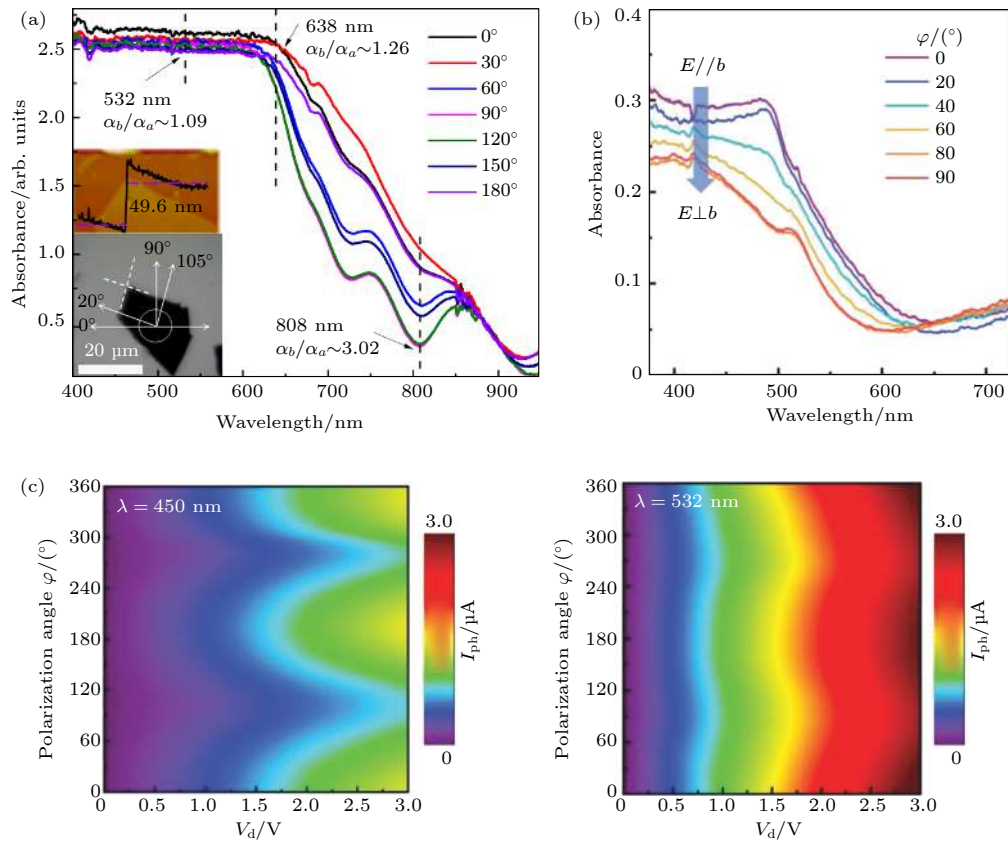


图 9 (a) GeSe 的偏振光吸收谱<sup>[40]</sup>; (b) 不同方向的偏振光下准一维 ZrS<sub>3</sub> 纳米带的吸收光谱<sup>[46]</sup>; (c) 准一维 ZrS<sub>3</sub> 纳米带在 450 nm 和 532 nm 的激光下的偏振光电流<sup>[46]</sup>

Fig. 9. (a) Polarization-resolved absorption spectra of GeSe(reproduced with permission<sup>[40]</sup>, Copyright 2017, American Chemical Society); (b) absorption spectra of ZrS<sub>3</sub> nanoribbon under polarized light in different directions and (c) polarized photocurrent of ZrS<sub>3</sub> nanoribbon under 450 nm and 532 nm laser illumination(reproduced with permission<sup>[46]</sup>, Copyright 2019, John Wiley and Sons).

长的偏振光激发下, 其二向色性高达 4.4. 光响应极坐标图仍可以明确地观察到材料的最强响应极轴反转现象. 角度依赖的空间分辨光响应分布图如图 10(d) 所示, 该 GeAs 偏振光探测器的光响应主要基于材料于金属电极之间形成的肖特基势垒, 这是典型的肖特基光电二极管, GeAs 的贡献带来了其偏振光探测的能力.

在相关领域的研究基础上, 最近我们也对具有面内各向异性二维材料的光学特性和电学输运特性进行了一些总结, 希望能够对低维半导体材料和光探测器的未来发展提供参考<sup>[23,28]</sup>.

## 5 总结及展望

利用材料本征各向异性进行偏振光探测器的设计有利于实现高度集成化的器件、简化设计和降低生产成本, 一系列具有晶体结构各向异性的二维材料有希望用于未来的偏振光探测器. 本文介绍了以黑磷、黑砷、黑砷磷、锑稀、过渡金属二硫属化合

物、Ⅲ族硫属化合物、Ⅳ族硫属化合物、Ⅳ—Ⅴ族化合物及准一维材料为代表的总共七大类各向异性低维材料. 基于这些材料设计的偏振光探测器覆盖了从红外、可见到紫外光的各个波段. 同时通过将偏振光探测器设计成场效应晶体管、异质结或者 pn 结等特定结构可以有效抑制噪声、提高光响应强度和偏振探测能力. 然而基于这类低维半导体材料的偏振光探测器还有很多缺陷有待完善. 目前为止这类偏振光探测器的二向色比值最高在 10 左右, 这样的性能不能满足实际应用的需求. 其次, 二维材料的制备工艺还不能满足大规模工业生产, 其晶体的结晶度、缺陷的抑制及配套的加工工艺还不够理想. 接下来的研究应该把解决这两个问题放在首要位置. 可以通过表面修饰、应力工程或设计合适的器件结构等手段来提高低维半导体偏振光探测器的性能. 同时要进一步完善二维材料的生长工艺和开发新的更适合二维材料的微纳加工工艺, 以及拓展器件的成像功能. 同时, 开发与现用半导



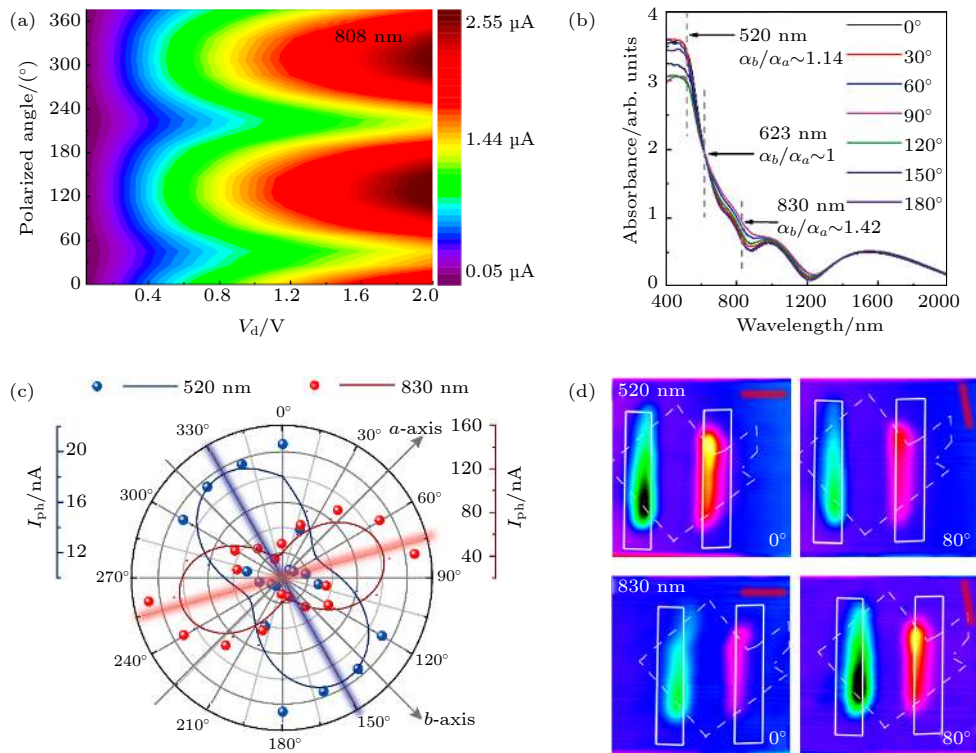


图 10 (a) GeSe 对 808 nm 光照的偏振光电流<sup>[40]</sup>; (b) GeAs 偏振光吸收光谱图<sup>[43]</sup>; (c) GeAs 在 520 nm 和 830 nm 偏振光照射下的光响应极坐标图<sup>[43]</sup>; (d) GeAs 30 mV 栅压下角度依赖的空间分辨光响应分布图<sup>[43]</sup>

Fig. 10. (a) Polarized photocurrent of GeSe under the 808 nm laser illumination (reproduced with permission<sup>[40]</sup>, Copyright 2017, American Chemical Society); (b) polarization-resolved absorption spectra of GeAs, (c) polarization-sensitive photocurrents plotted with the linear-polarization laser of 520 and 830 nm of GeAs in the polar coordinates, and (d) polarization-dependent photocurrent mapping of GeAs device under 30 mV gate voltage and the linear-polarization laser (reproduced with permission<sup>[43]</sup>, Copyright 2018, American Chemical Society).

体材料兼容的器件和工艺也尤为重要。预期通过一段时间的发展, 基于新型低维半导体材料的偏振光探测器及其阵列可以为现有偏振探测和成像技术的进行一定的补充, 并实现未来的实用化。

## 参考文献

- [1] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, Shaw J A 2006 *Appl. Opt.* **45** 5453
- [2] Doradla P, Alavi K, Joseph C S, Giles R H 2013 *J. Biomed. Opt.* **18** 090504
- [3] Duan J, Fu Q, Mo C, Zhu Y, Liu D 2013 *ISPD 2013—Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging* Beijing, China, August 21, 2013 p890813
- [4] Li J, Chen W, Xu W, Lu Y 2017 *Infrared Polarization Imaging Technology and Application* (Vol. 1) (Beijing: Science Press) p2 (in Chinese) [李军伟, 陈伟力, 徐文斌, 谿祎 2017 红外偏振成像技术与应用(北京: 科学出版社) 第2页]
- [5] Li L, Xiong D, Wen J, Li N, Zhu Z 2016 *Infrared Phys. Technol.* **79** 45
- [6] Li Q, Li Z, Li N, Chen X, Chen P, Shen X, Lu W 2014 *Sci. Rep.* **4** 6332
- [7] Sun R, Min L, Huang L 2014 *Asia Communications and Photonics Conference 2014* Shanghai, China, November 11, 2014 pATH3A.34
- [8] Bhimanapati G R, Lin Z, Meunier V, Jung Y, Cha J, Das S, Xiao D, Son Y, Strano M S, Cooper V R, Liang L, Louie S G, Ringe E, Zhou W, Kim S S, Naik R R, Sumpster B G, Terrones H, Xia F, Wang Y, Zhu J, Akinwande D, Alem N, Schuller J A, Schaak R E, Terrones M, Robinson J A 2015 *ACS Nano* **9** 11509
- [9] Cui Y, Li B, Li J, Wei Z 2018 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **61** 016801
- [10] Zhang K, Fang X, Wang Y, Wan Y, Song Q, Zhai W, Li Y, Ran G, Ye Y, Dai L 2017 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9** 5392
- [11] Luo W, Cao Y, Hu P, Cai K, Feng Q, Yan F, Yan T, Zhang X, Wang K 2015 *Adv. Opt. Mater.* **3** 1418
- [12] Zhong M, Zhou K, Wei Z, Li Y, Li T, Dong H, Jiang L, Li J, Hu W 2018 *2D Mater.* **5** 035033
- [13] Zhong M, Zhang S, Huang L, You J, Wei Z, Liu X, Li J 2017 *Nanoscale* **9** 3736
- [14] Zhong M, Xia Q, Pan L, Liu Y, Chen Y, Deng H X, Li J, Wei Z 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1802581
- [15] Zhong M, Shen C, Huang L, Deng H X, Shen G, Zheng H, Wei Z, Li J 2019 *NPJ 2D Mater. Appl.* **3** 1
- [16] Lv Q, Yan F, Wei X, Wang K 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1700490
- [17] Wei X, Yan F G, Shen C, Lü Q S, Wang K Y 2017 *Chin. Phys. B* **26** 038504
- [18] Wei X, Yan F, Lü Q, Shen C, Wang K 2017 *Nanoscale* **9** 8388
- [19] Yan F, Zhao L, Patané A, Hu P, Wei X, Luo W, Zhang D,

- Lü Q, Feng Q, Shen C, Chang K, Eaves L, Wang K 2017 *Nanotechnology* **28** 27LT01
- [20] Lee C H, Lee G H, van der Zande A M, Chen W, Li Y, Han M, Cui X, Arefe G, Nuckolls C, Heinz T F, Guo J, Hone J, Kim P 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 676
- [21] Massicotte M, Schmidt P, Vialla F, Schädler K G, Reserbat-Plantey A, Watanabe K, Taniguchi T, Tielrooij K J, Koppens F H L 2015 *Nat. Nanotechnol.* **11** 42
- [22] Cui Y, Zhou Z, Li T, Wang K, Li J, Wei Z 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1900040
- [23] Wang X, Cui Y, Li T, Lei M, Li J, Wei Z 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1801274
- [24] Cao Y, Cai K, Hu P, Zhao L, Yan T, Luo W, Zhang X, Wu X, Wang K, Zheng H 2015 *Sci. Rep.* **5** 8130
- [25] Wang F, Wang Z, Jiang C, Yin L, Cheng R, Zhan X, Xu K, Wang F, Zhang Y, He J 2017 *Small* **13** 1604298
- [26] Yan F, Wei Z, Wei X, Lv Q, Zhu W, Wang K 2018 *Small Methods* **2** 1700349
- [27] Li L, Han W, Pi L, Niu P, Han J, Wang C, Su B, Li H, Xiong J, Bando Y, Zhai T 2019 *InfoMat.* **1** 54
- [28] Zhou Z, Cui Y, Tan P H, Liu X, Wei Z 2019 *J. Semicond.* **40** 061001
- [29] Venuthurumilli P K, Ye P D, Xu X 2018 *ACS Nano* **12** 4861
- [30] Chen Y, Chen C, Kealhofer R, Liu H, Yuan Z, Jiang L, Suh J, Park J, Ko C, Choe H S, Avila J, Zhong M, Wei Z, Li J, Li S, Gao H, Liu Y, Analytis J, Xia Q, Asensio M C, Wu J 2018 *Adv. Mater.* **30** 1800754
- [31] Chu F, Chen M, Wang Y, Xie Y, Liu B, Yang Y, An X, Zhang Y 2018 *J. Mater. Chem. C* **6** 2509
- [32] Lin Y C, Komsa H P, Yeh C H, Björkman T, Liang Z Y, Ho C H, Huang Y S, Chiu P W, Krashenninikov A V, Suenaga K 2015 *ACS Nano* **9** 11249
- [33] Liu F, Zheng S, He X, Chaturvedi A, He J, Chow W L, Mion T R, Wang X, Zhou J, Fu Q, Fan H J, Tay B K, Song L, He R-H, Kloc C, Ajayan P M, Liu Z 2016 *Adv. Funct. Mater.* **26** 1169
- [34] Zhang E, Wang P, Li Z, Wang H, Song C, Huang C, Chen Z G, Yang L, Zhang K, Lu S, Wang W, Liu S, Fang H, Zhou X, Yan H, Zou J, Wan X, Zhou P, Hu W, Xiu F 2016 *ACS Nano* **10** 8067
- [35] Zhou W, Chen J, Gao H, Hu T, Ruan S, Stroppa A, Ren W 2019 *Adv. Mater.* **31** 1804629
- [36] Liu F, Shimotani H, Shang H, Kanagasekaran T, Zólyomi V, Drummond N, Fal'ko V I, Tanigaki K 2014 *ACS Nano* **8** 752
- [37] Yang S, Hu C, Wu M, Shen W, Tongay S, Wu K, Wei B, Sun Z, Jiang C, Huang L, Wang Z 2018 *ACS Nano* **12** 8798
- [38] Zhang Z, Yang J, Zhang K, Chen S, Mei F, Shen G 2017 *J. Mater. Chem. C* **5** 11288
- [39] Tian Z, Guo C, Zhao M, Li R, Xue J 2017 *ACS Nano* **11** 2219
- [40] Wang X, Li Y, Huang L, Jiang X W, Jiang L, Dong H, Wei Z, Li J, Hu W 2017 *J. Am. Chem. Soc.* **139** 14976
- [41] Yang Y, Liu S C, Wang X, Li Z, Zhang Y, Zhang G, Xue D J, Hu J S 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1900411
- [42] Yang Y, Liu S C, Yang W, Li Z, Wang Y, Wang X, Zhang S, Zhang Y, Long M, Zhang G, Xue D J, Hu J S, Wan L J 2018 *J. Am. Chem. Soc.* **140** 4150
- [43] Zhou Z, Long M, Pan L, Wang X, Zhong M, Blei M, Wang J, Fang J, Tongay S, Hu W, Li J, Wei Z 2018 *ACS Nano* **12** 12416
- [44] Li L, Wang W, Gong P, Zhu X, Deng B, Shi X, Gao G, Li H, Zhai T 2018 *Adv. Mater.* **30** e1706771
- [45] Li L, Gong P, Sheng D, Wang S, Wang W, Zhu X, Shi X, Wang F, Han W, Yang S, Liu K, Li H, Zhai T 2018 *Adv. Mater.* **30** 1804541
- [46] Wang X, Wu K, Blei M, Wang Y, Pan L, Zhao K, Shan C, Lei M, Cui Y, Chen B, Wright D, Hu W, Tongay S, Wei Z 2019 *Adv. Elect. Mater.* **5** 1900419
- [47] Liu S, Xiao W, Zhong M, Pan L, Wang X, Deng H X, Liu J, Li J, Wei Z 2018 *Nanotechnology* **29** 184002
- [48] Hwang E, Sarma S D 2008 *Phys. Rev. B* **77** 115449
- [49] Li L, Yu Y, Ye G J, Ge Q, Ou X, Wu H, Feng D, Chen X H, Zhang Y 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 372
- [50] Ling X, Huang S, Hasdeo E H, Liang L, Parkin W M, Tatsumi Y, Nugraha A R T, Puzosky A A, Das P M, Sumpter B G, Geohagan D B, Kong J, Saito R, Drndic M, Meunier V, Dresselhaus M S 2016 *Nano Lett.* **16** 2260
- [51] Hong T, Chamlagain B, Lin W, Chuang H J, Pan M, Zhou Z, Xu Y Q 2014 *Nanoscale* **6** 8978
- [52] Yuan H, Liu X, Afshinmanesh F, Li W, Xu G, Sun J, Lian B, Curto A G, Ye G, Hikita Y, Shen Z, Zhang S C, Chen X, Brongersma M, Hwang H Y, Cui Y 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 707
- [53] Ye L, Wang P, Luo W, Gong F, Liao L, Liu T, Tong L, Zang J, Xu J, Hu W 2017 *Nano Energy* **37** 53
- [54] Bullock J, Amani M, Cho J, Chen Y Z, Ahn G H, Adinolfi V, Shrestha V R, Gao Y, Crozier K B, Chueh Y L 2018 *Nat. Photonics* **12** 601
- [55] Amani M, Regan E, Bullock J, Ahn G H, Javey A 2017 *ACS Nano* **11** 11724
- [56] Liu B, Köpf M, Abbas A N, Wang X, Guo Q, Jia Y, Xia F, Wehrich R, Bachhuber F, Pielhofer F, Wang H, Dhall R, Cronin S B, Ge M, Fang X, Nilges T, Zhou C 2015 *Adv. Mater.* **27** 4423
- [57] Castellanos-Gomez A, Vicarelli L, Prada E, Island J O, Narasimha-Acharya K L, Blanter S I, Groenendijk D J, Buscema M, Steele G A, Alvarez J V, Zandbergen H W, Palacios J J, van der Zant H S J 2014 *2D Mater.* **1** 025001
- [58] Gibaja C, Rodriguez-San-Miguel D, Ares P, Gómez-Herrero J, Varela M, Gillen R, Maultzsch J, Hauke F, Hirsch A, Abellán G, Zamora F 2016 *Angew. Chem., Int. Ed.* **128** 14557
- [59] Wu X, Shao Y, Liu H, Feng Z, Wang Y L, Sun J T, Liu C, Wang J O, Liu Z L, Zhu S Y, Wang Y Q, Du S X, Shi Y G, Ibrahim K, Gao H J 2017 *Adv. Mater.* **29** 1605407
- [60] Mak K F, Lee C, Hone J, Shan J, Heinz T F 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 136805
- [61] Zhao Y, Xu K, Pan F, Zhou C, Zhou F, Chai Y 2017 *Adv. Funct. Mater.* **27** 1603484
- [62] Zhang X, Lai Z, Ma Q, Zhang H 2018 *Chem. Soc. Rev.* **47** 3301
- [63] Wang Q H, Kalantar-Zadeh K, Kis A, Coleman J N, Strano M S 2012 *Nat. Nanotechnol.* **7** 699
- [64] Mak K F, Shan J 2016 *Nat. Photonics* **10** 216
- [65] Li S L, Tsukagoshi K, Orgiu E, Samori P 2016 *Chem. Soc. Rev.* **45** 118
- [66] Gong C, Zhang Y, Chen W, Chu J, Lei T, Pu J, Dai L, Wu C, Cheng Y, Zhai T, Li L, Xiong J 2017 *Adv. Sci.* **4** 1700231
- [67] Chenet D A, Aslan O B, Huang P Y, Fan C, van der Zande A M, Heinz T F, Hone J C 2015 *Nano Lett.* **15** 5667
- [68] Wolverson D, Crampin S, Kazemi A S, Ilie A, Bending S J 2014 *ACS Nano* **8** 11154
- [69] Hafeez M, Gan L, Li H, Ma Y, Zhai T 2016 *Adv. Mater.* **28** 8296
- [70] Song Q, Wang H, Pan X, Xu X, Wang Y, Li Y, Song F, Wan X, Ye Y, Dai L 2017 *Sci. Rep.* **7** 1758

- [71] Song Q, Wang H, Xu X, Pan X, Wang Y, Song F, Wan X, Dai L 2016 *RSC Adv.* **6** 103830
- [72] Zhong H X, Gao S, Shi J J, Yang L 2015 *Phys. Rev. B* **92** 115438
- [73] Jiang J, Liu Z K, Sun Y, Yang H F, Rajamathi C R, Qi Y P, Yang L X, Chen C, Peng H, Hwang C C, Sun S Z, Mo S K, Vobornik I, Fujii J, Parkin S S P, Felser C, Yan B H, Chen Y L 2017 *Nat. Commun.* **8** 13973
- [74] Wu Y, Mou D, Jo N H, Sun K, Huang L, Bud'ko S L, Canfield P C, Kaminski A 2016 *Phys. Rev. B* **94** 121113
- [75] Qi Y, Naumov P G, Ali M N, Rajamathi C R, Schnelle W, Barkalov O, Hanfland M, Wu S C, Shekhar C, Sun Y, Stüß V, Schmidt M, Schwarz U, Pippel E, Werner P, Hillebrand R, Förster T, Kampert E, Parkin S, Cava R J, Felser C, Yan B, Medvedev S A 2016 *Nat. Commun.* **7** 11038
- [76] Ho C H, Huang Y S, Tiong K K, Liao P C 1998 *Phys. Rev. B* **58** 16130
- [77] Cui F, Feng Q, Hong J, Wang R, Bai Y, Li X, Liu D, Zhou Y, Liang X, He X, Zhang Z, Liu S, Lei Z, Liu Z, Zhai T, Xu H 2017 *Adv. Mater.* **29** 1705015
- [78] Wen W, Zhu Y, Liu X, Hsu H P, Fei Z, Chen Y, Wang X, Zhang M, Lin K H, Huang F S, Wang Y P, Huang Y S, Ho C H, Tan P H, Jin C, Xie L 2017 *Small* **13** 1603788
- [79] Liu D, Hong J, Wang X, Li X, Feng Q, Tan C, Zhai T, Ding F, Peng H, Xu H 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1804696
- [80] Huang S, Tatsumi Y, Ling X, Guo H, Wang Z, Watson G, Puzos A A, Geohegan D B, Kong J, Li J, Yang T, Saito R, Dresselhaus M S 2016 *ACS Nano* **10** 8964
- [81] Niu C, Buhl P M, Bihlmayer G, Wortmann D, Blügel S, Mokrousov Y 2015 *Nano Lett.* **15** 6071
- [82] Hu P, Zhang J, Yoon M, Qiao X F, Zhang X, Feng W, Tan P, Zheng W, Liu J, Wang X, Idrobo J C, Geohegan D B, Xiao K 2014 *Nano Res.* **7** 694
- [83] Fei R, Li W, Li J, Yang L 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 173104
- [84] Chang C, Wu M, He D, Pei Y, Wu C F, Wu X, Yu H, Zhu F, Wang K, Chen Y, Huang L, Li J F, He J, Zhao L D 2018 *Science* **360** 778
- [85] Zhao L D, Lo S H, Zhang Y, Sun H, Tan G, Uher C, Wolverton C, Dravid V P, Kanatzidis M G 2014 *Nature* **508** 373
- [86] Zhou X, Hu X, Zhou S, Zhang Q, Li H, Zhai T 2017 *Adv. Funct. Mater.* **27** 1703858
- [87] Zhou X, Hu X, Jin B, Yu J, Liu K, Li H, Zhai T 2018 *Adv. Sci.* **5** 1800478
- [88] Mortazavi B, Rabezuk T 2018 *Phys. E: Low-Dimensional Syst. Nanostructures* **103** 273
- [89] Yang S, Yang Y, Wu M, Hu C, Shen W, Gong Y, Huang L, Jiang C, Zhang Y, Ajayan P M 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1707379
- [90] Li C, Wang S, Li C, Yu T, Jia N, Qiao J, Zhu M, Liu D, Tao X 2018 *J. Mater. Chem. C* **6** 7219
- [91] Fan Z, Chang P C, Lu J G, Walter E C, Penner R M, Lin C H, Lee H P 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 6128
- [92] Wang J, Gudixsen M S, Duan X, Cui Y, Lieber C M 2001 *Science* **293** 1455
- [93] Comini E, Baratto C, Faglia G, Ferroni M, Vomiero A, Sberveglieri G 2009 *Prog. Mater. Sci.* **54** 1
- [94] Gao L, Zeng K, Guo J, Ge C, Du J, Zhao Y, Chen C, Deng H, He Y, Song H, Niu G, Tang J 2016 *Nano Lett.* **16** 7446
- [95] Niu Y, Frisenda R, Flores E, Ares J R, Jiao W, Perez de Lara D, Sánchez C, Wang R, Ferrer I J, Castellanos-Gomez A 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800351
- [96] Niu S, Joe G, Zhao H, Zhou Y, Orvis T, Huyan H, Salman J, Mahalingam K, Urwin B, Wu J 2018 *Nat. Photonics* **12** 392
- [97] Song H, Li T, Zhang J, Zhou Y, Luo J, Chen C, Yang B, Ge C, Wu Y, Tang J 2017 *Adv. Mater.* **29** 1700441
- [98] Ma Z, Chai S, Feng Q, Li L, Li X, Huang L, Liu D, Sun J, Jiang R, Zhai T, Xu H 2019 *Small* **15** 1805307
- [99] Tian N, Yang Y, Liu D, Liu X, Tan P H, Zhang D, Chang K, Li H, Zhao M, Li J R, Tang X, Zhang D, Zhang Z, Xiao W, Yan H, Zhang Y 2018 *ACS Nano* **12** 1712
- [100] Lai J, Liu Y, Ma J, Zhuo X, Peng Y, Lu W, Liu Z, Chen J, Sun D 2018 *ACS Nano* **12** 4055
- [101] Liu Y, Gu Q, Peng Y, Qi S, Zhang N, Zhang Y, Ma X, Zhu R, Tong L, Feng J, Liu Z, Chen J H 2018 *Adv. Mater.* **30** 1706402
- [102] Qiu G, Du Y, Charnas A, Zhou H, Jin S, Luo Z, Zemlyanov D Y, Xu X, Cheng G J, Ye P D 2016 *Nano Lett.* **16** 7364
- [103] Tong L, Duan X, Song L, Liu T, Ye L, Huang X, Wang P, Sun Y, He X, Zhang L, Xu K, Hu W, Xu J B, Zang J, Cheng G J 2019 *Appl. Mater. Today* **15** 203
- [104] Huang L, Huo N, Li Y, Chen H, Yang J, Wei Z, Li J, Li S S 2015 *J. Phys. Chem. Lett.* **6** 2483
- [105] Huang L, Li Y, Wei Z, Li J 2015 *Sci. Rep.* **5** 16448
- [106] Huang L, Tao L, Gong K, Li Y, Dong H, Wei Z, Li J 2017 *Phys. Rev. B* **96** 205303
- [107] Huo N, Kang J, Wei Z, Li S S, Li J, Wei S H 2014 *Adv. Funct. Mater.* **24** 7025
- [108] Li B, Huang L, Zhao G, Wei Z, Dong H, Hu W, Wang L W, Li J 2016 *Adv. Mater.* **28** 8271
- [109] Li B, Huang L, Zhong M, Huo N, Li Y, Yang S, Fan C, Yang J, Hu W, Wei Z, Li J 2015 *ACS Nano* **9** 1257
- [110] Li B, Huang L, Zhong M, Li Y, Wang Y, Li J, Wei Z 2016 *Adv. Elect. Mater.* **2** 1600298
- [111] Li B, Xing T, Zhong M, Huang L, Lei N, Zhang J, Li J, Wei Z 2017 *Nat. Commun.* **8** 1958
- [112] Li Y, Huang L, Li B, Wang X, Zhou Z, Li J, Wei Z 2016 *ACS Nano* **10** 8938
- [113] Li Y, Wang Y, Huang L, Wang X, Li X, Deng H X, Wei Z, Li J 2016 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8** 15574
- [114] Li Y, Wei Z, Li J 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 112103
- [115] Liu J, Liu X, Chen Z, Miao L, Liu X, Li B, Tang L, Chen K, Liu Y, Li J, Wei Z, Duan X 2019 *Nano Res.* **12** 463
- [116] Liu S, Huang L, Wu K, Wei Z, Huang B, Meng X, Tongay S, Liu J, Li J, Chen H 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 112102
- [117] Pan L, Huang L, Zhong M, Jiang X W, Deng H X, Li J, Xia J B, Wei Z 2018 *Nanoscale* **10** 22196
- [118] Wang X, Huang L, Peng Y, Huo N, Wu K, Xia C, Wei Z, Tongay S, Li J 2016 *Nano Res.* **9** 507
- [119] Wang Y, Zhou W X, Huang L, Xia C, Tang L M, Deng H X, Li Y, Chen K Q, Li J, Wei Z 2017 *2D Mater.* **4** 025097
- [120] Xiong W, Xia C, Du J, Wang T, Zhao X, Peng Y, Wei Z, Li J 2017 *Phys. Rev. B* **95** 245408
- [121] Zhong M, Wang X, Liu S, Li B, Huang L, Cui Y, Li J, Wei Z 2017 *Nanoscale* **9** 12364
- [122] Yan Y, Xiong W, Li S, Zhao K, Wang X, Su J, Song X, Li X, Zhang S, Yang H, Liu X, Jiang L, Zhai T, Xia C, Li J, Wei Z 2019 *Adv. Opt. Mater.*



SPECIAL TOPIC—In commemoration of the 100th anniversary of the birth of Kun Huang  
**Recent progress in polarization-sensitive photodetectors based  
on low-dimensional semiconductors\***

Wei Zhong-Ming<sup>†</sup> Xia Jian-Bai

(*State Key Laboratory of Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,*

*Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

( Received 29 June 2019; revised manuscript received 12 August 2019 )

**Abstract**

Polarized photodetection technology has good application value in the fields of remote sensing imaging, environmental monitoring, medical detection and military equipment. Polarized photodetectors based on low-dimensional materials can use the natural anisotropy of materials to detect polarized information. Some two-dimensional materials have strong in-plane anisotropy due to their low-symmetrical crystal structure, such as black-phosphorus, black-arsenic, ReS<sub>2</sub>, GaTe, GeSe, GeAs, and TiS<sub>3</sub>. These anisotropic two-dimensional materials are appropriate for the working medium of polarized photodetectors. Numerous researchs focused on polarized photodetectors with different materials and device structures and our works are introduced. Polarized photodetectors based on such low-dimensional materials have realized a broadband photodetection, including ultraviolet, visible, and infrared lights.

**Keywords:** photodetectors, polarization, low-dimensional semiconductors, two-dimensional

**PACS:** 32.10.Dk, 32.30.Jc, 42.25.Ja, 85.60.Dw

**DOI:** [10.7498/aps.68.20191002](https://doi.org/10.7498/aps.68.20191002)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61622406).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zmwei@semi.ac.cn](mailto:zmwei@semi.ac.cn)