

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.05.011

二维半导体 InSe 纳米片光电探测器制备及其光电性能研究

江 洋^{1,2}, 杨远俊¹, 何兰萍¹, 李皖豫¹, 葛威锋¹, 陈美霞¹

(1. 合肥工业大学 物理学院, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要:文章通过机械剥离、干法转移和电子束刻蚀等技术或工艺制备了范德瓦尔斯硒化铟(InSe)纳米片光电探测器。利用原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)和显微共焦拉曼光谱仪分别对器件形貌与 γ 相 InSe 的物相进行了表征,研究了室温下范德瓦尔斯 InSe 纳米片光电探测器件的光电特性对激光波长、激光功率密度及偏置电压等参数的依赖关系。实验结果表明:在 532 nm 波长下,该探测器的响应度约为 12.9 mA/W,外量子效率约为 2.5%,比探测率高达 9.6×10^7 Jones;随着光强增加,该器件光电流显著增加,并且在周期性变化的光照下光电流可以同步复现,显示了器件在室温下具有良好的瞬态光吸收特性与稳定性。研究结果表明,基于范德瓦尔斯 InSe 纳米片的探测器有望应用于室温光电探测。

关键词:机械剥离;干法转移;InSe 纳米片;光电探测器;响应度

中图分类号:O469

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)05-0649-06

Preparation of two-dimensional semiconductor InSe nano-flake photodetectors and study of photoelectric properties

JIANG Yang^{1,2}, YANG Yuanjun¹, HE Lanping¹, LI Wanyu¹, GE Weifeng¹, CHEN Meixia¹

(1. School of Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: In this work, van der Waals nano-flake InSe photodetectors were prepared by mechanical exfoliation, dry transfer and electron beam lithography (EBL). Atomic force microscope (AFM) and micro confocal laser Raman spectroscopy were used to characterize the device morphology and crystalline phase of γ -InSe, respectively, and the dependence of the photoelectric properties of the van der Waals nano-flake InSe photodetectors at room temperature on laser wavelength, laser power density and bias voltage was further investigated. It is observed that the responsivity of the detector at 532 nm is approximately 12.9 mA/W, the external quantum efficiency is approximately 2.5%, and the specific detectivity reaches 9.6×10^7 Jones. With the increase of light intensity, the photocurrent of the device also increases significantly. Moreover, the photocurrent can be synchronized under periodically varying laser illumination, implying a fast, transient photo-absorption and stable photoelectric response at room temperature. These results indicate promising photodetection applications using van der Waals nano-flake InSe detectors at room temperature.

Key words: mechanical exfoliation; dry transfer; InSe nano-flakes; photodetector; responsivity

收稿日期:2024-02-20;修回日期:2024-03-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52072102;12235015)

作者简介:江 洋(1996—),男,安徽铜陵人,合肥工业大学硕士生;

杨远俊(1984—),男,安徽六安人,博士,合肥工业大学副研究员,博士生导师,通信作者, E-mail: yangyuanjun@hfut.edu.cn.

0 引言

过去十年间,人们一直在寻找合适带宽、高载流子迁移率及高稳定性二维(two dimensional, 2D)范德瓦尔斯材料以应用于光电子领域。2004年,人们首次通过胶带机械剥离方法从块状石墨中获得了单层石墨烯^[1],开启了人们对其他2D材料的探索。最近,Ⅲ-VI族金属硫族化合物因其卓越的光学及电学特性引起了人们强烈兴趣^[2]。由于石墨烯无带隙,基于石墨烯的光电探测器暗电流通常较高^[3]。有别于石墨烯,范德瓦尔斯硒化铟(InSe)半导体的带隙约1.2 eV,适合制造高性能的光电探测器。随着层数减少,范德瓦尔斯InSe能带结构由直接带隙转变为间接带隙^[4],其带隙由块体的1.2 eV转变为单层(或少数层)的2.1 eV。此外,范德瓦尔斯硒化铟(InSe)纳米片还具有较高的电子迁移率。文献[5]测得范德瓦尔斯InSe纳米片的室温电子迁移率高达 $1\,000\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$;文献[6]更是将其电子迁移率提升至 $3\,700\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 。范德瓦尔斯InSe纳米片带隙可调及高迁移率的特点,使其在光电探测领域展现出优异的应用潜力。最近,文献[7]在氮化硅波导上集成了90 nm厚范德瓦尔斯InSe纳米片的光电探测器件,获得约0.38 A/W的响应度及44%的外量子效率;文献[8]通过构建InSe/ $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{Se}$ 异质结,在980 nm激光波长下获得13.3 mA/W的响应度及 2.06×10^{11} Jones的比探测率;文献[9]通过堆叠 WS_2/InSe 双层结构光电探测器,实现了基于光伏效应的61 mA/W的响应度。这些研究表明,范德瓦尔斯InSe纳米片有望应用于高灵敏度光电探测领域。然而,当前围绕二维材料InSe的器件制造工艺、电学性能优化以及光响应能力与稳定性提升等问题还没有充分解决。

本文通过机械剥离从块状InSe上获得少层InSe纳米片,采用干法转移将其转移至预沉积的Au电极上,构建范德瓦尔斯InSe纳米片光电探测器。随后在红光(633 nm)激光照射下对器件的光电性能进行测试,测得响应度为7 mA/W。此外,针对绿光(532 nm)激光进行同样的光电检测,最大光电响应度为12.9 mA/W,外量子效率为2.5%,比探测率达到 9.6×10^7 Jones。这一性能高于部分石墨烯基^[10]以及过渡金属卤族化合物(PtSe_2 ^[11]、 PdSe_2 ^[12]、 PtTe_2 ^[13]等)光电探测器,表明该光电器件对短波长光具有良好的光电响应

能力。另外,在周期性激光照射下,该器件还表现出同步、稳定的动态响应,进一步验证了器件的可靠性。该研究结果对优化二维半导体InSe光电探测器的制备工艺及提升其性能具有重要意义。

1 器件制备及表征方法

InSe作为一种Ⅲ-VI族层状半导体材料,由Se-In-In-Se原子沿着c轴周期性排列的蜂窝状层状结构构成,如图1所示。根据铟原子和硒原子的交替排列顺序,目前已经发现3种物相,即 α 相InSe、 β 相InSe以及 γ 相InSe^[14]。

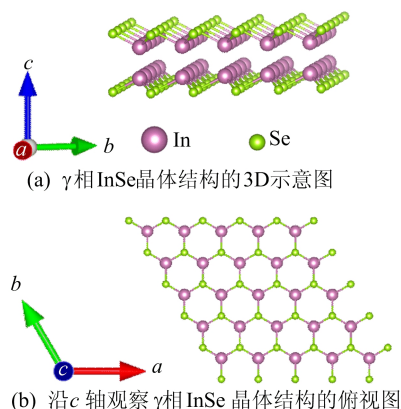


图1 γ 相InSe晶体结构示意图

本文使用了来自六碳科技的 γ 相InSe。对 γ 相块状InSe利用机械剥离获得少层InSe纳米片,剥离过程在充满氮气的手套箱内进行,并通过胶带释放到预沉积Au电极(厚度45 nm)的衬底上。衬底是带有300 nm SiO_2 氧化层的单晶Si,其上Au电极采用 5×5 左右对称叉指电极,衬底预先通过丙酮、乙醇、去离子水各超声清洗5 min,烘干后在等离子清洗机清洗7 min,保证其表面高洁净度和黏附性^[15]。鉴于InSe中较薄部分与 SiO_2 衬底颜色接近,且在光学显微镜下层数与颜色具有对应关系,因此可利用光学显微镜大致确定少层InSe的厚度。本文中使用的光学显微镜是舜宇公司生产的CX40M系列正置金相显微镜,原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)是Oxford Instrument生产的Asylum Research AFM Cypher S。通过AFM表征发现InSe纳米片厚度为6 nm。随后进一步利用拉曼光谱确定其物相,本文使用的拉曼系统为HORI-BA JOBIN YVON公司生产的LabRam HR Evolution显微共焦拉曼光谱仪。在300 K下测到的少层InSe拉曼光谱图如图2所示,分别在112、

174、223 cm^{-1} 处观察到特征峰,峰位对应的振动模式分别为 A_{1g}^1 、 E_{2g}^1 、 A_{1g}^2 ,这与先前报道中的 γ 相 InSe 特征峰所处位置相一致^[16],因此验证了本文的少层 InSe 为 γ 相。

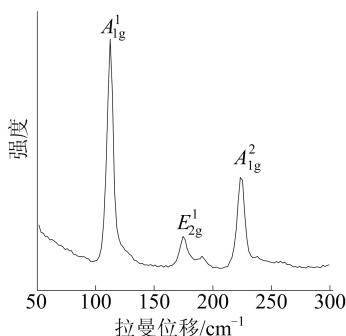


图2 本文使用的 InSe 拉曼光谱图

在光学显微镜辅助下,利用干法转移技术将剥离的少层 InSe 转移到 Au 电极上,这种转移方式能够保证 InSe 样品表面维持超高洁净度,进而有利于改善 InSe 与 Au 电极界面的接触特性。进一步利用 AFM 对电极及样品形貌进行扫描,结果显示表面干净、平整。这里选择叉指电极,主要是为了缩短光生载流子在电极间的传输距离。另外,选用较薄的 InSe 纳米片,是为了使其与 Au 电极软接触,从而保证 InSe 纳米片在转移过程中不被折断,以提高器件制备的成功率。

用剪刀取一小块聚二甲基硅氧烷(PDMS)印章作为转移介质,通过聚碳酸酯(PC)膜包裹其表面的方式制作转移平台。利用 PC 膜拾取硅片衬底上的少层 InSe 纳米片,由于 PC 膜与样品之间的作用力大于样品与硅片之间作用力,使得样品附着在 PC 膜上而被提起,最终转移至 Au 电极上。转移完成后,利用氯仿洗去残余 PC 膜及其他杂质。通过引线键合的方式,将电极与印刷电路板(printed circuit board, PCB)用铝线连接。由于少层 InSe 对暴露在空气中的水分及氧气非常敏感,造成 InSe 氧化,且氧化过程会扩展至样品内部,从而损坏器件性能^[17]。本文利用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)进行封装,以保护 InSe 样品不被氧化。PMMA 可溶于其他有机物中,能够将载流子沟道与空气隔离,降低周围环境的不利影响^[18]。

2 器件光电性能表征结果

首先,利用 Keithley 2400 源表在室温下对器件进行 I - V 特性曲线测试,该测试在基于探针台装置搭建的黑暗环境中进行。范德瓦尔斯 InSe

纳米片光电探测器的结构示意图如图 3a 所示,在不同波长、可调光功率的激光照射下对器件光电流进行测量。该器件的典型 I - V 特性曲线如图 3b 所示,可以看出,电流与电压保持良好的线性关系,表明电极与 InSe 之间形成了良好的欧姆接触,进而保证了光电流测量的准确性。

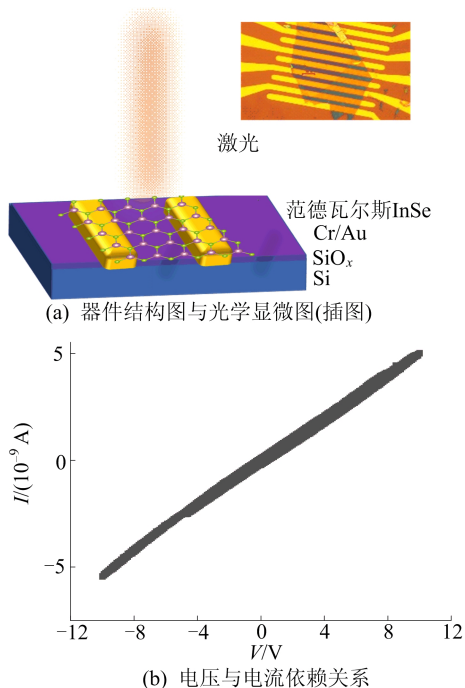


图3 范德瓦尔斯 InSe 纳米片光电探测器示意图和 I - V 特性曲线

本文进一步研究光电流随激光波长、光功率密度的变化规律。

在 0.5 V 偏置电压、633 nm 红光照射下,范德瓦尔斯 InSe 纳米片光电探测器的光电流随光功率的时间变化关系如图 4a 所示。从图 4a 可以看出:在黑暗环境下,该光电探测器的暗电流为 10^{-11} A,这是由于在黑暗条件下,暗电流主要由 InSe 内部的本征载流子发生定向移动而产生;当激光功率密度升至 6.4 mW/cm^2 及 22.9 mW/cm^2 时,对应光电流分别增大到约 1.16×10^{-10} A 和 4.96×10^{-10} A,并且呈现出较好的重复性,这是由于 InSe 表面接收到了更多外来光子,从而增加了载流子数目。

光电流在不同偏压下随光功率密度的变化关系如图 4b 所示。从图 4b 可以看出:在光功率密度为 22.9 mW/cm^2 、偏置电压为 1.0 V 时,光电流为 7.28×10^{-10} A;当电压增大到 4.0 V 时,光电流高达 15.3×10^{-10} A。总体来看,光电流随偏置电压增大而增加,主要原因是较大的偏置电压更能有效收集光激发的载流子,在较大的偏置电

压下光生载流子的产生-分离-收集过程更快,从而提升了 InSe 探测器的光电响应能力^[19]。

为了进一步验证范德瓦尔斯 InSe 纳米片光电探测器对其他波长激光的光响应情况,本文使用 532 nm 绿色激光对其进行照射,发现了与上述红光情况下类似的结果,如图 4c 所示。由图 4c 可知:当偏置电压为 0.5 V、光功率密度为 6.4 mW/cm² 时,该器件光电流约为 1.78×10^{-10} A;当偏置电压

增大至 4.0 V、光功率密度为 6.4 mW/cm² 时,光电流增加到 6.81×10^{-10} A;当偏置电压为 4.0 V,光功率密度增加到 22.9 mW/cm² 时,光电流达到 23.9×10^{-10} A。另外,可以预测随着光功率进一步提高,光电流还会进一步增加。因此,范德瓦尔斯 InSe 纳米片光电探测器在红光和绿光波段均具有优异的光电响应特性,这为设计可见光波段室温光电探测器提供了实验基础。

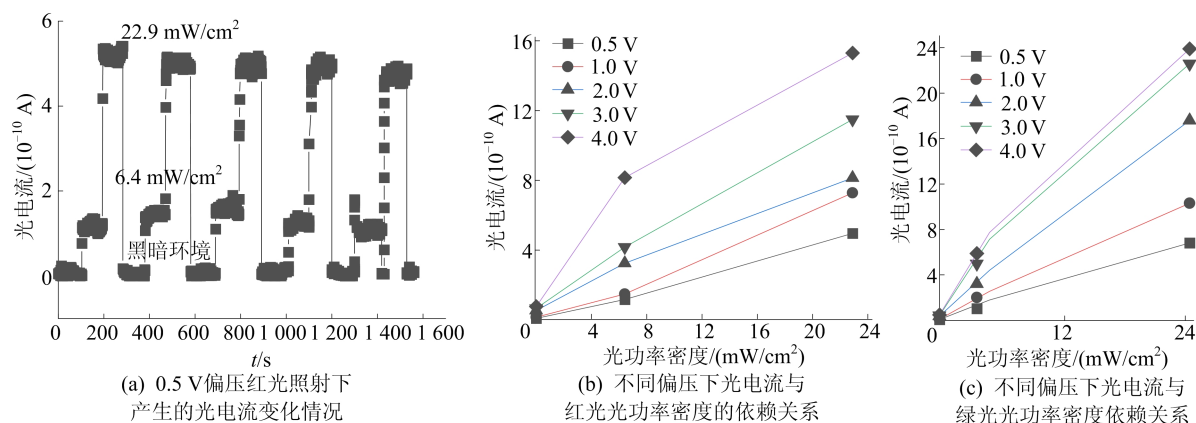


图 4 范德瓦尔斯 InSe 纳米片光电探测器对红、绿光的响应表征

3 实验分析

为了充分了解范德瓦尔斯 InSe 探测器对光照的响应情况,本文采用光电探测器常见性能指标进行定量分析。其中,探测器性能指标之一的光响应度 R 定义为净产出光电流与有效面积上入射光功率的比值,即

$$R = \frac{I_{ph}}{PS} \quad (1)$$

其中: I_{ph} 为净产出光电流,描述了光电流与暗电流的差值; P 为单位面积上入射的光功率大小,即光功率密度; S 为少层 InSe 有效感光面积,对应于 InSe 表面受照射的有效面积。外量子效率 (external quantum efficiency, EQE) 反映了光电探测器将入射光子转换成电子-空穴对的能力,定义为产生的电子数与入射光子数的比值,即

$$EQE = \frac{Rhc}{e\lambda} \quad (2)$$

其中: h 为普朗克常数; c 为光速; e 为基本电荷量; λ 为激光波长。比探测率 D^* 反映探测器对微弱光强的探测能力,其计算公式为:

$$D^* = \frac{RS^{\frac{1}{2}}}{(2eI_{dark})^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

本文计算了在上述不同条件下获得的光响应

度、外量子效率和比探测率。

响应度 R 随偏置电压的变化关系如图 5a 所示。从图 5a 可以看出,在 633 nm 红色激光、532 nm 绿色激光照射下,在偏置电压为 4.0 V、光功率密度为 6.4 mW/cm² 时均获得最大响应度,约为 12.9 mA/W,这一结果超过部分石墨烯、黑磷范德瓦尔斯光电探测器的响应度^[20]。由图 5a 还可知,尽管波长不同,但该器件的光响应度基本与偏置电压成线性依赖关系。这是由于随着漏极和源极电压增大,电场增强,少层 InSe 纳米片中产生的光生电子及空穴的横向漂移速度增大,进而产生更大的光电流,因此范德瓦尔斯 InSe 半导体的光电流表现出对偏置电压的线性响应。此外,532 nm 波长激光在不同偏压下的响应度总体上大于 633 nm 激光照射所获得的响应度,这表明少层 InSe 对短波长激光的吸收及转换能力强于长波长激光。这一结果与前人报道一致,文献[21]研究表明,二维 InSe 材料的光谱响应曲线是蓝移的,这归因于 InSe 短波长处吸收系数大。

范德瓦尔斯少层 InSe 纳米片光电探测器的 EQE 随偏置电压的变化关系如图 5b 所示。从图 5b 可以看出,在红、绿激光照射下, EQE 在偏置电压为 4.0 V、光功率密度为 6.4 mW/cm² 时最大,均为 2.5%。图 5a 与图 5b 曲线高度相似,这归因于 EQE

取决于 R 的数值。若 E_{QE} 值大于 1, 则说明每个光子至少生成 1 个对应的电荷载流子, 反映了光电转换过程中的增益水平, 说明范德瓦尔斯 InSe 纳米片光电器件具有高效的光电转换能力。

该探测器的比探测率随偏置电压的变化关系如图 5c 所示。从图 5c 可以看出, 绿光对应的比探测率普遍高于红光的比探测率。比探测率作为表征探测器灵敏程度的性能指标, 说明少层 InSe 对微弱绿光的敏感性高于红光。此外, 比探测率受散粒噪声影响较大, 范德瓦尔斯 InSe 纳米片光电器件在不同偏压下的比探测率差异小于 2×10^{10} Jones, 说明器件能随偏压变化保持较好的稳

定性。InSe 光电探测器件因其维度降低而导致光电探测能力存在显著差异, 已报道的响应度可在 $0.034\ 7\ \text{A/W}$ 到 $10^7\ \text{A/W}$ 范围内变化^[22]。这一结果表明少层 InSe 光电特性还有进一步提升的空间。目前, 层状范德瓦尔斯材料构建的光电探测器内部光电转换机理主要有光电导机制、光生伏特机制、光栅机制和光热机制 4 种类型。其中, 光生伏特机制主要应用于零偏压下实现光电探测自供电。就本文而言, 光电导机制及光栅机制在 InSe 纳米片探测器中占据主导地位。当没有施加外部电场时, 层状 InSe 内部不会出现可移动的电荷。

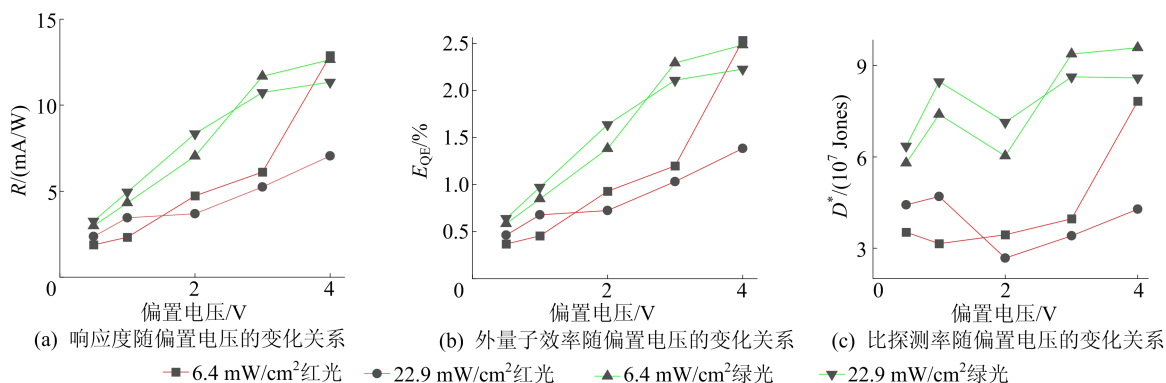


图5 器件光电特性随着偏置电压的变化关系

当施加外部电场(或偏置电压)时, 少层 InSe 纳米片内部的电子吸收光子在带间发生跃迁, 形成电子-空穴对, 并且在电场激励下, 电子-空穴对迅速分离, 进而形成光生电流, 展现出光电导效应。另一方面, 由于 InSe 界面与 SiO_2 界面处存在杂质缺陷以及少层 InSe 本身存在缺陷, 使得光生载流子在传输过程中被陷阱捕获, 降低了通道内传输载流子的数目, 从而降低了光电流的大小。此外, 少层 InSe 表面由于杂质缺陷或转移过程引入的污损等原因, 会吸收电荷形成表面静电场^[23], 这同样会使得载流子在传输过程中受到类似栅极的作用, 降低其传输寿命, 也会导致光电流的衰减。上述 3 个方面因素共同作用, 导致范德瓦尔斯少层 InSe 纳米片光电性能的差异。

4 结 论

本文利用机械剥离与干法转移技术制备了范德瓦尔斯 InSe 纳米片光电探测器原型器件。在室温下, 对该器件进行了黑暗条件下 $I-V$ 特性测试, 结果表明源极与漏极之间呈现欧姆接触特性。进一步对器件进行了光电性能表征。在 $633\ \text{nm}$

和 $532\ \text{nm}$ 波长激光照射下, 研究了该器件在不同偏置电压和光功率密度下光电流的变化规律。该器件的暗电流约为 $10^{-11}\ \text{A}$, 最大响应度高达 $12.9\ \text{mA/W}$, 外量子效率约为 2.5% , 比探测率达到 $9.6 \times 10^7\ \text{Jones}$ 。不仅如此, 该器件还表现出良好的光电探测稳定性与瞬态响应特性, 为基于层状半导体 InSe 光电探测器的设计提供了实验基础。

受不同制备工艺以及 InSe 材料自身性能差异的影响, 少层 InSe 纳米片的光电探测响应特性存在差异, 可进一步优化以提高其性能。例如: 可通过退火改善 InSe 与电极的界面特性, 从而减少载流子在界面处的复合几率^[24]; 可采用顶部电极方法, 构建电极/InSe/ SiO_2 自上而下的器件结构, 以降低少层 InSe 纳米片与电极表面之间的接触电阻, 进而提升光生载流子的收集效率。这些考虑将为该器件下一步研究提供思路。

[参 考 文 献]

[1] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. E-

- lectric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.
- [2] PI L, LI L, LIU K, et al. Recent progress on 2D noble-transition-metal dichalcogenides[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(51): 1904932.
- [3] XIA F, MUELLER T, LIN Y, et al. Ultrafast graphene photodetector[J]. *Nature Nanotechnology*, 2009, 4(12): 839-843.
- [4] MUDD G W, SVATEK S A, REN T, et al. Tuning the bandgap of exfoliated InSe nanosheets by quantum confinement[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(40): 5714-5718.
- [5] BANDURIN D A, TYURNINA A V, YU G L, et al. High electron mobility, quantum Hall effect and anomalous optical response in atomically thin InSe[J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(3): 223-227.
- [6] LI M, LIN C Y, YANG S H, et al. High mobilities in layered InSe transistors with indium-encapsulation-induced surface charge doping[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(44): 1803690.
- [7] TAMALAMPUDI S R, VILLEGAS J E, DUSHAQ G, et al. High-speed waveguide-integrated InSe photodetector on SiN photonics for near-infrared applications[J]. *Advanced Photonics Research*, 2023, 4(11): 2300162.
- [8] ZHANG Z, HAN L, DAN Z, et al. Type II homo-type $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ nanosheet/InSe nanoflake heterostructures for self-driven broadband visible; near-infrared photodetectors[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, 6(6): 4573-4583.
- [9] CHEN J, ZHANG Z, MA Y, et al. High-performance self-powered ultraviolet to near-infrared photodetector based on WS_2/InSe van der Waals heterostructure[J]. *Nano Research*, 2023, 16(5): 7851-7857.
- [10] MUELLER T, XIA F, AVOURIS P. Graphene photodetectors for high-speed optical communications[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(5): 297-301.
- [11] SEFIDMOOYE AZAR N, BULLOCK J, SHRESTHA V R, et al. Long-wave infrared photodetectors based on 2D platinum diselenide atop optical cavity substrates[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(4): 6573-6581.
- [12] WU J, MA H, ZHONG C, et al. Waveguide-integrated PdSe_2 photodetector over a broad infrared wavelength range[J]. *Nano Letters*, 2022, 22(16): 6816-6824.
- [13] SHAWKAT M S, HAFIZ S B, ISLAM M M, et al. Scalable van der Waals two-dimensional PtTe_2 layers integrated onto silicon for efficient near-to-mid infrared photodetection[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(13): 15542-15550.
- [14] HAN G, CHEN Z G, DRENNAN J, et al. Indium selenides: structural characteristics, synthesis and their thermoelectric performances[J]. *Small*, 2014, 10(14): 2747-2765.
- [15] TAN C, LIAO J H, ZHENG G, et al. Room-temperature magnetic phase transition in an electrically tuned van der Waals ferromagnet[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(16): 166703.
- [16] LEI S, GE L, NAJMAEI S, et al. Evolution of the electronic band structure and efficient photo-detection in atomic layers of InSe[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(2): 1263-1272.
- [17] ZHOU L, LV Y, ZHAO Y, et al. Electrical and optical properties of InSe with various interfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 121(7): 072102.
- [18] WU J, MA H, ZHONG C, et al. Waveguide-integrated PdSe_2 photodetector over a broad infrared wavelength range[J]. *Nano Letters*, 2022, 22(16): 6816-6824.
- [19] TAMALAMPUDI S R, LU Y Y, UPADHYAY R K, et al. High performance and bendable few-layered InSe photodetectors with broad spectral response[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(5): 2800-2806.
- [20] 柯宇轩, 岑颖乾, 蔡殿禹, 等. 基于二维材料的光通信波段光电探测器[J]. *中国激光*, 2023, 50(1): 0113008.
- [21] WU C Y, CAO K J, LE Y X, et al. Spectral engineering of InSe nanobelts for full-color imaging by tailoring the thickness[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2022, 13(12): 2668-2673.
- [22] LONG M, WANG P, FANG H, et al. Progress, challenges, and opportunities for 2D material based photodetectors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(19): 1803807.
- [23] 赵清华, 郑丹, 陈鹏, 等. 硒化铜材料的发展及其光电器件应用[J]. *人工晶体学报*, 2022, 51(9/10): 1703-1721.
- [24] 乔恺, 李合琴, 王伟, 等. $\text{La}_{0.56}\text{Li}_{0.33}\text{TiO}_3$ 薄膜的制备及退火对其光电性能的影响[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(3): 324-327.

(责任编辑 胡亚敏)