

激光与光电子学进展

基于 PdSe₂/InSe 的高性能范德华异质结隧穿器件孙科学^{1,2*}, 李江霖¹, 陈泽锋³, 许建斌⁴, 赵强¹¹南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023;²射频集成与微组装技术国家地方联合工程实验室, 江苏 南京 210023;³苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;⁴香港中文大学电子工程系, 香港 999077

摘要 由二维材料制成的范德华异质结为设计和实现多功能和高性能的电子、光电设备提供了竞争机会。为了构建能够在室温下工作的异质结,选择一种五边形二维层状贵金属过渡金属双硫分子配合物 PdSe₂,其具有空气稳定性及高电子场效应迁移率。在刚性 SiO₂/Si 衬底上制造的 InSe 器件具有约 50 ms 的响应时间,在光开关中表现出长期稳定性,能够在柔性基板上运作。在肖特基结和异质结的适当能带对准设计下, PdSe₂ 和 InSe 构成的异质结构在室温下显示出超过 10⁶ 的高反向整流比和低于 pA 的超低正向电流,同时具有超过 10⁶ 的高电流开/关比。因此, PdSe₂ / InSe 范德华异质结可以用作超灵敏的光电探测器,表现出明显的光伏效应,具有光谱检测能力。该研究为基于二维材料的范德华集成和设计以及光电多功能设备的能带对准技术提供了新思路。

关键词 PdSe₂; InSe; 范德华异质结; 光电探测器

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230432

High-Performance van der Waals Heterotunneling Device Based on PdSe₂/InSeSun Kexue^{1,2*}, Li Jianglin¹, Chen Zefeng³, Xu Jianbin⁴, Zhao Qiang¹¹College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China;²Nation-Local Joint Project Engineering Laboratory of RF Integration & Micropackage, Nanjing 210023, Jiangsu, China;³School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;⁴Electronics Engineering Department, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China

Abstract Van der Waals heterojunctions made from two-dimensional materials offer competitive opportunities for designing and implementing multifunctional and high-performance electronic and optoelectronic devices. A pentagonal two-dimensional-layered noble metal transition metal disulfide molecular complex PdSe₂ is used to construct a heterojunction capable of operating at room temperature, which has air stability and high electron field-effect mobility. InSe devices manufactured on rigid SiO₂/Si substrates have a response time of approximately 50 ms, exhibiting long-term stability in optical switches, and can be performed on flexible substrates. Under the appropriate band alignment design of the Schottky junction and heterojunction, the heterostructure comprising PdSe₂ and InSe exhibits a high reverse rectification ratio exceeding 10⁶, ultralow forward current lower than pA at room temperature, and a high current on/off ratio exceeding 10⁶. Therefore, the PdSe₂/InSe van der Waals heterojunction can be used as an ultrasensitive photodetector, exhibiting apparent photovoltaic effects and spectral detection capability. This study provides a new approach to van der Waals integration and design based on two-dimensional materials and energy band alignment technology for photoelectric multifunctional equipment.

Key words PdSe₂; InSe; van der Waals heterojunction; photodetector

1 引言

20 世纪初,英国科学家用微剥离法分离得到石

墨烯^[1],自此二维材料开始引起国内外研究人员的极大关注。随后过渡金属二硫化物(TMDs)^[2-3]和黑磷(BP)^[4-5]的出现,进一步促进了二维材料异质结的发

收稿日期: 2023-01-03; 修回日期: 2023-02-09; 录用日期: 2023-03-07; 网络首发日期: 2023-03-10

基金项目: 江苏省研究生实践创新计划(SJCX21_0279)、国家自然科学基金(11304160)、南京邮电大学自孵化项目(NY220013)

通信作者: *sunkx@njupt.edu.cn

展。通过较弱的范德华力,可以将不同的二维材料垂直堆叠以构造人工异质结构,即范德华异质结构(vdWHs)^[6-8]。与传统外延生长得到的异质结构相比,范德华异质结构在堆叠的二维材料界面处具有自由化学键和晶格失配的优势,这为在单个器件中组合和利用组成材料的独特特性提供了自由度。通过机械剥离、逐层堆叠或范德华外延法,目前已经制备出各种具有不同能带排列和瑞利界面的范德华异质结构,包括 p-n 结二极管^[9]、隧道场效应晶体管(TFET)^[10]、存储器^[11]、发光二极管^[12]、双极光电晶体管^[13]、红外光门控二极管^[14]和光电探测器^[15-17]。最近,已经证明基于 MoS₂和 BP 的多功能范德华异质结能够显示出高电流整流比($\approx 4 \times 10^5$)和开/关比($\approx 10^7$),可以用作可调多值逆变器^[18]。由 WSe₂、BN、石墨烯组成的另一种范德华异质结具有半浮栅场效应晶体管配置,已被证明是非易失性可编程 p-n 结。这种类型的结构可以用于存储器、光伏逻辑整流器和逻辑光电电路。由石墨烯、BN、MoS₂和 MoTe₂组成的不对称范德华异质结构的电流开/关比为 6×10^8 、整流比为 3×10^7 ,可以用作高性能二极管、晶体管、光电检测器和可编程整流器^[19]。对于范德华异质结,整流特性不仅取决于 2 种构成材料的费米能级差,而且取决于导带和价带的带偏移。

对于已报道的范德华异质结二极管来说,低整流比和大反向电流通常是不可避免的,考虑到超薄的 p-n 结区域,反向隧道电流非常重要。对于原子薄的 p-n 结,这个问题甚至更严重。此外,由于带隙小以及 n 沟道和 p 沟道材料的传输特性相反,通常无法同时实现二极管的高整流比和晶体管的高电流开/关比^[20]。如果选择具有窄带隙的双极材料作为通道材料之一,则可以解决这些问题。褶皱的二维 PdSe₂ 薄片显示出可调节的带隙,其带隙范围为 0~1.3 eV(单层)。硒化铟(InSe)是一种 n 型层状半导体,将这 2 种材料结合成范德华异质结,可以获得大带偏的 II 型能带排列。此外,通过厚度调制对肖特基结和异质结进行适当的能带对准设计,肖特基势垒和异质结势垒的协同效应可以显著地抑制正向电流。同时在外部电场下,随着从 II 型到 III 型的能带对准调谐,可以通过隧道主导来允许反向电流传输。

本文构建了一种由 PdSe₂和 InSe 组成的范德华异质结隧穿器件,它可以用作高性能反向二极管、晶体管和光电探测器,并通过光谱显示该异质结的探测范围以及宽带探测能力。在室温下,通过栅极控制,该器件可以同时实现超过 10^7 的高反向整流比和超过 10^8 的高电流开/关比,达到单个范德华异质结器件的最大值。因此,该器件可以用作超灵敏光电探测器,响应度约为 1 A/W。此外,在零偏置电压下,可以观察到明显的光伏效应。

2 结构表征与实验方法

2.1 PdSe₂/InSe 范德华异质结器件的光学和结构表征

垂直堆叠的多层 PdSe₂/InSe 范德华异质结通过机械剥离法和聚二甲基硅氧烷(PDMS)辅助转移法构建而成。首先将多层 InSe 薄片剥离到 300 nm SiO₂/Si 基板上,将多层 PdSe₂薄片剥离到 PDMS 膜上。然后将 PdSe₂薄片精确地转移到配有微型操纵器和显微镜的转移平台的 InSe 薄片表面上。最后,通过电子束光刻(EBL)定义电极图案,并通过热蒸发和标准剥离工艺沉积 Cr/Au(15 nm/55 nm)电极。图 1 为 PdSe₂/InSe 范德华异质结的示意图和光学显微镜图像,其中 I_{dc} 为漏极电流, V_g 为栅极电压, V_{ds} 为偏置电压。值得注意的是,电极分别沉积在 InSe 和 PdSe₂ 区域,而不是重叠区域。由于 PdSe₂和 InSe 的稳定性较好,与其他材料不同,不需要在设备上涂覆聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)层,可直接测量。

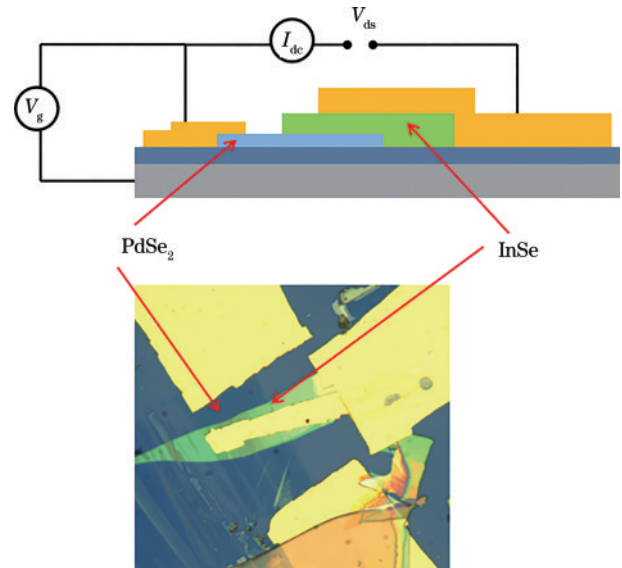


图 1 PdSe₂/InSe 的垂直异质结构示意图及光学显微镜图像
Fig. 1 Schematic diagram and optical microscope image of PdSe₂/InSe vertical heterostructure

2.2 器件制备

PdSe₂/InSe 范德华异质结器件是通过使用 PDMS 载体的常见干式转移方法制备的。

首先,使用透明胶带从市售的同类产品(美国 2D Semiconductors)上剥离 InSe 薄片,将其转移到基板(300 nm SiO₂)上。然后,将 PdSe₂薄片从生长的 PdSe₂晶体剥落到 PDMS 膜上,并在光学显微镜下通过对准转移系统将其转移到 InSe 薄片上。所有过程均在 N₂ 保护手套箱中进行,以最大限度地减轻 InSe 和 PdSe₂ 的氧化程度。为了制造用于测量的设备,通过电子束光刻系统 EBL[带有纳米图案生成系统(NPGS)的 FEI F50 扫描电子显微镜(SEM)]定义电极图案,并通

过热蒸发沉积 Cr/Au (15 nm/55 nm) 金属。

2.3 装置表征

利用光学显微镜 (BX51, OLMPUS) 研究 PdSe₂/InSe 范德华异质结的形态。在室温下通过装有 532 nm 激光源的共焦拉曼/光致发光 (PL) 系统 (LabRAM HR800) 获得拉曼光谱。使用 FEI Titan Probe 显微镜系统获取高分辨率透射电子显微镜 (TEM) 图像和能谱仪 (EDS) 图。使用带有 Ga 离子源的 FEI Helios SEM 系统, 通过聚焦离子束 (FIB) 技术制备 TEM 标本。利用原子力显微镜 (AFM) 和开尔文探针力显微镜 (KPFM) 表征 (布鲁克多模) 获得层的厚度和表面电势。使用半导体器件参数分析仪 (Agilent, B1500) 在探针台 (湖岸) 中测量所制备器件的电性能。使用 520 nm 激光照射设备, 以研究器件的可见光响应。为了进行红外光响应测量, 将这些器件引线键合到 24 针芯片载体中。对于时间光响应测量, 使用示波器 (DPO 5204 Tektronix) 来监视电流的时间依赖性。所有设备均在室温环境中测量。

3 结果和讨论

3.1 PdSe₂ 的电性能

对于低对称的晶格结构, 具有弯曲或皱折的五边形结构的二维材料是一类非常理想的材料。它们在理论上得到了预测, 在实验上得到了探索。

五边形通常被认为是拓扑缺陷或几何上的缺陷,

正如“孤立五边形规则 (IPR)”所述, 但很少有人发现这一结构是基本的二维材料中的构建块。与二维材料中作为主要图案的六边形结构不同, 大多数预测的五边形二维材料 (包括五石墨烯和五 SnS₂) 以规则的波纹状弯曲或褶皱保持对称。这种独特的原子结构加上弯曲的结构会导致较大的带隙和奇异的机械性能, 并具有不寻常的负泊松比和超高的机械强度, 这在灵活的设备应用中很有前景。利用极化拉曼光谱法和第一性原理计算确定 PdSe₂ 中的拉曼活性模式, 通过较大的、依赖于层的拉曼峰移动揭示 PdSe₂ 中的强层间相互作用。由几层 PdSe₂ 制成的场效应晶体管显示双极性电荷载流子传导, 具有约 158 cm²/(V·s) 的高电子迁移率。另外, 单层的 PdSe₂ 系统表现出金属-绝缘体转变 (MIT), 这在块状 PdSe₂ 中是不存在的。与 BP 不同, PdSe₂ 是空气稳定的, 可以通过化学气相沉积法合成。使用双端背栅结构制备了场效应晶体管 (FET) 器件, 图 2 显示了典型的具有 1.0 V 漏极偏置的 PdSe₂ 器件的 I_{dc} 与 V_g 的关系。图 2 中 I-V 特性的线性行为表示 PdSe₂ 器件具有良好的欧姆接触, 表现出双极性传输, 并且在空穴和电子之间具有轻微的不对称性。对于这种使用五边形结构二维材料的器件, 在室温下电子迁移率高达 70 cm²/(V·s), 开/关比大于 10⁵。为了阐明二维 PdSe₂ 晶体的层相关电特性, 测量 PdSe₂ 不同层的传输特性, 如图 3 所示。电子迁移率高于空穴迁移率, 并且较厚的薄膜始终比较薄的薄片显示出更低的开/关比。

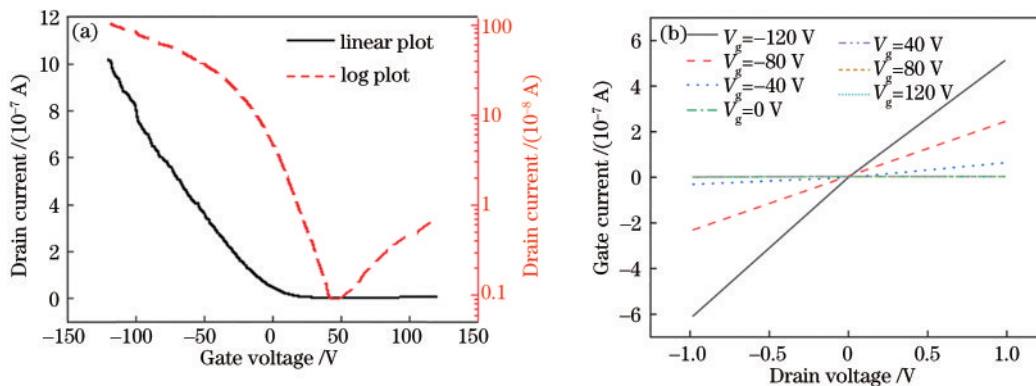


图 2 PdSe₂ 的电性能。(a) 栅极电压和漏极电流的关系; (b) 漏极电压和漏极电流的关系

Fig. 2 Electrical properties of PdSe₂. (a) Relationship between gate voltage and drain current; (b) relationship between drain voltage and drain current

通过 AFM 显示 PdSe₂ 表现出各向异性起皱的五边形结构。单层 PdSe₂ 器件表现出出色的双极性半导体行为, 并且具有很高的室温电子迁移率 [高达 158 cm²/(V·s)]。

3.2 PdSe₂/InSe 范德华异质结构的电性能

首先, 分别表征 PdSe₂/InSe 范德华异质结器件以及 PdSe₂ 和 InSe 器件各自的电性能。图 1 描绘了用于电气测量的 PdSe₂/InSe 范德华异质结器件结构, 其中 PdSe₂ 和 InSe 上的金属触点分别用作漏极和源极, 将重掺杂的 Si 作为栅极。由 InSe 和 PdSe₂ 各自的传输曲

线可以看出, PdSe₂ 表现出具有 p 型优势的双极性半导体行为, 而 InSe 表现出 n 型行为。图 4 显示了 PdSe₂/InSe 范德华异质结构的 I-V 特性。PdSe₂/InSe 范德华异质结构在偏置电压 V_{ds} = ±3 V 下工作。令人惊讶的是, 从图 4 观察到超过 10 μA 的非常大的反向电流, 并且观察到异常超低的正向电流, 这表明形成了反向二极管。反向整流比 (定义为反向与正向电流之比) 在室温下超过 1 × 10⁶。图 5 列出了文献报道的不同反向二极管的反向整流比^[21-23], 可以看出构建的 PdSe₂/InSe 范德华异质结的反向整流比比常规的由块状材料制成

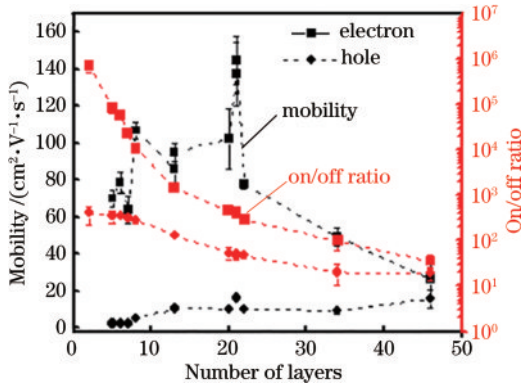


图 3 在室温下测量的 PdSe₂ 器件的电子和空穴迁移率以及开/关比与薄片厚度的关系

Fig. 3 Electron and hole mobility and on/off ratio of PdSe₂ devices measured at room temperature in relation to wafer thickness

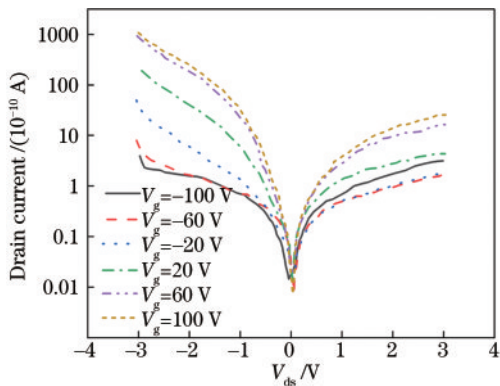


图 4 PdSe₂/InSe 范德华异质结构在不同栅极电压下的 I-V 特性

Fig. 4 I-V characteristics of PdSe₂/InSe van der Waals heterostructures at different gate voltages

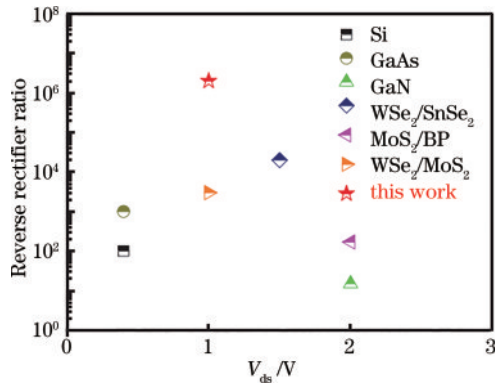


图 5 传统块状材料 Si、GaAs、GaN 和二维异质结构 WSe₂/SnSe₂、MoS₂/BP 及 WSe₂/MoS₂ 制成的不同反向二极管的反向整流比比较^[21-23]

Fig. 5 Comparison of reverse rectifier ratio of different reverse diodes made from traditional massive materials Si, GaAs, and GaN with two-dimensional heterogeneous structures WSe₂/SnSe₂, MoS₂/BP, and WSe₂/MoS₂^[21-23]

的反向二极管和由其他二维材料制成的范德华异质结反向二极管高几个数量级。

值得注意的是, PdSe₂/InSe 范德华异质结二极管的反向整流比取决于厚度, 尤其是 PdSe₂ 薄片的厚度, 反向整流比随着 PdSe₂ 薄片厚度的增加而降低。同时还测量了 PdSe₂/InSe 范德华异质结器件的栅极相关的 I-V 特性。随着栅极电压的增加, 反向电流和正向电流都增加, 而反向电流增加得更快。反向整流比在 V_g=100 V 时达到最大值 3×10⁶, 然后单调下降至接近 1, 如图 4 所示, 这表明该器件具有很强的栅极相关整流性能。高反向整流比和超低正向电流表明, PdSe₂/InSe 范德华异质结器件可充当高性能反向二极管。当栅极电压从 100 V 降低到 -100 V 时, 传输曲线显示亚阈值摆幅的亚阈值区域急剧减小。超过 100 μA 的高通态电流和 7×10⁷ 的超大电流开/关比表明, PdSe₂/InSe 范德华异质结器件可以作为良好的晶体管。应该强调的是, 在研究过程中, 范德华异质结反向二极管与传统的隧穿 p-n 结二极管有很大的不同。隧穿二极管的正向电流很大, 并且经常存在负差分电阻, 当使用厚的 InSe 和 PdSe₂ 层来构建范德华异质结时, 在高栅极电压下会形成隧穿二极管。下文将基于 PdSe₂ 和 InSe 层的能带对准来解释 PdSe₂/InSe 范德华异质结反向二极管的详细传输机制和栅极调制整流行为。

3.3 PdSe₂/InSe 范德华异质结反向二极管隧穿机制

为了精确地确定 PdSe₂/InSe 范德华异质结界面的结势垒, 用 KPFM 通过测量表面电势来获得 PdSe₂ 和 InSe 之间的费米能级差, 同时获得 AFM 图像, 如图 6 所示。

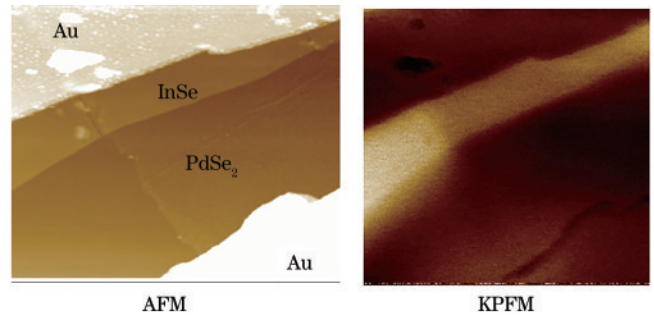


图 6 PdSe₂/InSe 范德华异质结界面处的结势垒 AFM 图像及 KPFM 图像

Fig. 6 AFM and KPFM images of the junction barrier at van der Waals heterojunction interface of PdSe₂/InSe

由图 6 可以看出, 接合区的表面形态干净光滑, 没有明显的气泡, 这证明了范德华异质结的高质量。测得的 PdSe₂ 和 InSe 的厚度分别为 5、25 nm, 接近所制备器件的厚度, 如图 7 所示。

如图 8 所示, PdSe₂ 的表面电势比 InSe 的大, 这意味着 PdSe₂ 与 InSe 相比具有较低的功函数。通过跨异质结区域的线轮廓获得功函数或费米能级差。接触前 Au、InSe 和 PdSe₂ 的能带分布如图 9 所示, 其中描绘了 PdSe₂/InSe 范德华异质结的 II 型能带对准。

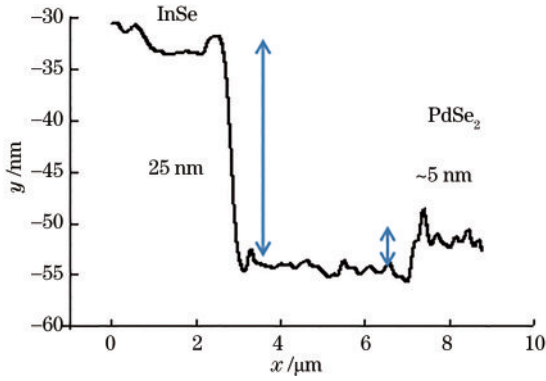


图 7 材料厚度

Fig. 7 Material thickness

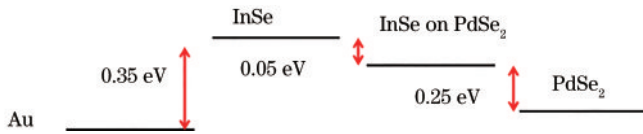


图 8 结的功函数

Fig. 8 Work function of the junction

在平衡状态下,当 PdSe₂ 和 InSe 相互接触时,电子将从 PdSe₂ 移入 InSe,从而在 PdSe₂ 中留下更多的空穴,在 InSe 侧的界面处产生带隙弯曲严重的电荷载流子累积区域。由于在费米能级钉扎效应的作用下金属 InSe 的界面处形成了一个大的肖特基势垒,也显示了界面的能带图。在正栅极电压较小时,当向 PdSe₂ 侧施加负偏置电压时,外部电场会抵消 PdSe₂/InSe 和金属 InSe 界面上的内置电场。因此, PdSe₂/InSe 界面处形

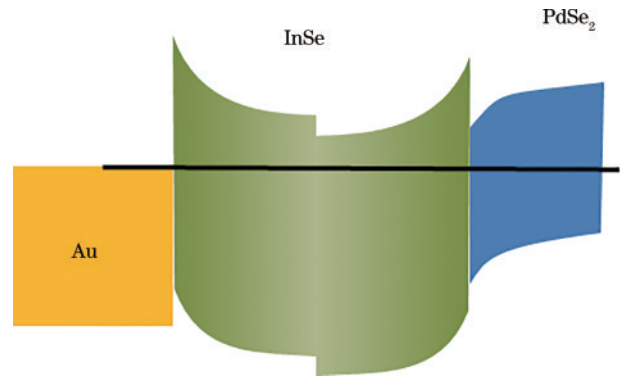


图 9 Au、InSe 和 PdSe₂ 接触前的能带分布

Fig. 9 Band distribution of Au, InSe, and PdSe₂ before contact

成了 III 型能带对准,这意味着电子可以借助外带隧穿 (BTBT) 从 PdSe₂ 侧传输到 InSe 侧。同时, InSe-金属界面的肖特基势垒减小,因此范德华结构中形成了很大的反向电流。通常, BTBT 模型中的 $I-V$ 关系表示为

$$I = C_1 V_2 \exp(-C_2/V), \quad (1)$$

式中: C_1 和 C_2 是拟合参数; V_2 是偏置电压。 BTBT 模型很好地拟合了反向电流,证实了该隧道效应的隧穿机理。如图 10 所示,当偏置电压为正时,结势垒和肖特基势垒都增加,阻碍了电子从源极转移到漏极。同时, PdSe₂/InSe 界面处的价带大偏移会阻止空穴从 PdSe₂ 传输到 InSe。 PdSe₂ 的导电行为从 p 型转变为 n 型。因此, PdSe₂/InSe 界面处形成了 n-n 结,从而在正偏置电压和负偏置电压下都产生了大电流,而整流比却降低了。

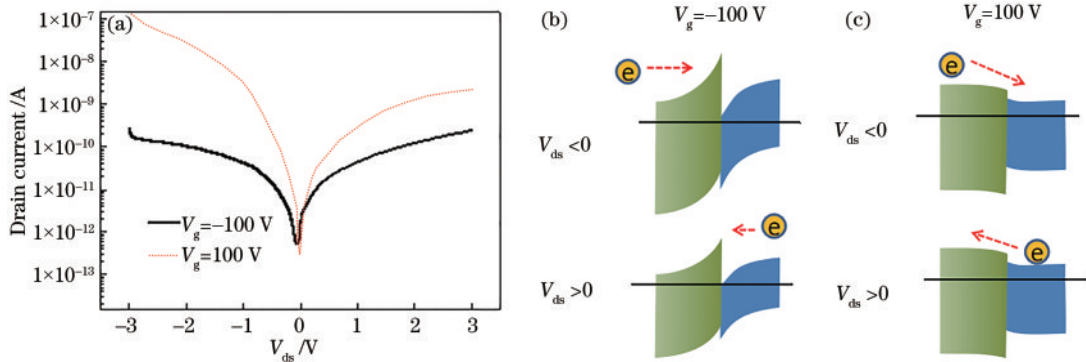


图 10 不同偏置电压和栅极电压条件下 PdSe₂/InSe 范德华异质结器件的 $I-V$ 特性及能带图。(a) PdSe₂/InSe 范德华异质结器件在 -100、100 V 栅极电压下的 $I-V$ 特性;(b) 栅极电压为 -100 V 时的器件能带图;(c) 栅极电压为 100 V 时的器件能带图

Fig. 10 $I-V$ characteristics and energy band diagrams of PdSe₂/InSe van der Waals heterojunction devices with different bias voltages and gate voltages. (a) $I-V$ characteristics of PdSe₂/InSe van der Waals heterojunction devices at -100、100 V gate voltages; (b) energy band diagrams of devices at -100 V gate voltage; (c) energy band diagrams of devices at 100 V gate voltage

3.4 PdSe₂/InSe 异质结的光响应特性

接下来研究 PdSe₂/InSe 异质结的光响应特性,以探讨其在光电探测器和光伏领域的潜在应用。

图 11 为在较暗环境下和 12、6、1 mW 强度激光照射下具有不同入射功率的器件的输出特性。注意,除非另有说明,否则所有光响应测量均在零栅极电压下进行。显然,在光照下,漏极电流在正偏置电压和负偏

置电压下均显著减小。特别地,当 $V_{ds} < 0$ 时,漏极电流随着偏置电压的增加而没有达到饱和,而当 $V_{ds} > 0$ 时,则出现浅饱和,这进一步验证了 $V_{ds} < 0$ 时隧穿主导电流。在零栅极电压下, InSe 沟道具有高电阻,这表明大多数偏置电压在 InSe 沟道下降。因此,光电流主要来源于在大的偏置电压下由外部电场转移的 InSe 沟道中的光生载流子。

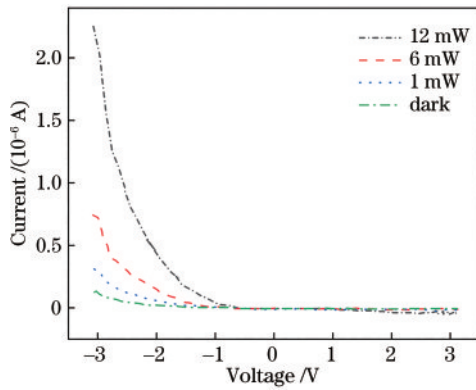


图 11 PdSe₂/InSe 在不同强度激光照射下的输出特性
Fig. 11 Output characteristics of PdSe₂/InSe under different laser intensities

响应度对入射功率的依赖性较弱,这表明该范德华异质结器件可能不存在光栅效应。为了验证这一点,在非常低的照明强度下对器件进行光响应测量,结果表明即使在暗电流的弱照明下,也可获得相同响应度,这表明器件确实不存在光栅效应。光电流受到栅极电压的显著调制,并随着栅极电压的增加而增加,响应度也是如此。

除稳态行为外,响应速度也是高性能光电探测器的重要参数,测量该器件对周期性开关激光照射的时间分辨光响应。520 nm 激光器开启时,漏极电流迅速上升到稳定值,而在激光器关闭时漏极电流迅速下降。如图 11 所示,在不同的激光功率水平下可以观察到光开关具有良好的可重复性。为了准确确定器件的响应速度,用数字示波器来记录快速变化的光电流信号。图 12 显示了在 $V_{ds} = -1$ V 时器件的时间响应。响应速度通常用上升时间(或衰减时间)表示,定义为净光电流从 10% 增加到 90% (或从 90% 减少到 10%) 所需的时间。对于 PdSe₂/InSe 异质结器件,当 $V_{ds} = -1$ V 时,上升时间为 217 μ s,衰减时间为 89 μ s,这表明在外部电场下光生电子-空穴对快速分离。快速的上升和下降时间进一步证明了器件没有光栅效应。但是,当

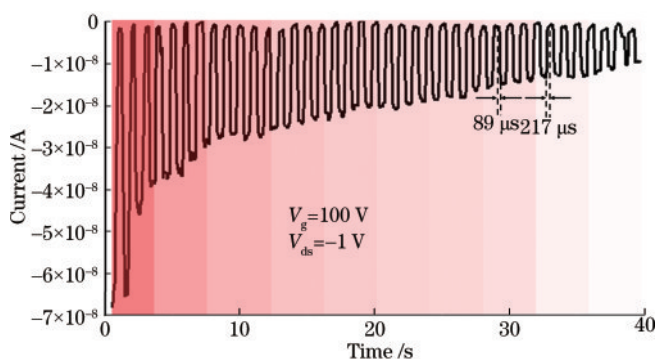


图 12 $V_{ds} = -1$ V 时在 520 nm 激光照射下器件的时间分辨光响应

Fig. 12 Time resolved optical response of the device under 520 nm laser irradiation at $V_{ds} = -1$ V

器件以光伏模式运行时,上升和下降时间分别增加到 620、430 μ s。较慢的响应速度可以归因于载流子较长的穿越通道时间,因为内置电场远小于外部电场。

总之,超高的电流开/关比、快速响应速度、高探测性和响应度表明,PdSe₂/InSe 范德华异质结器件可以用作高性能光电探测器以及潜在的光伏器件。

4 结 论

构建了基于 PdSe₂ 和 InSe 二维材料的范德华异质结隧穿器件,并证明了该器件可以用作高性能反向二极管、晶体管 and 光电探测器,其原因在于异质结构的独特能带对准。该器件显示出明显的光伏效应,为基于二维材料的范德华集成开发以及未来的电子和光电多功能设备提供了新思路。为了能更好地了解基于 PdSe₂ 和 InSe 二维材料的范德华异质结隧穿器件在实际应用中的可靠性,在接下来的工作中,将进一步分析器件的寿命、耐压性能及抗干扰能力,并考虑设计更多的实验条件,如不同层数的 PdSe₂/InSe 范德华异质结器件,以进一步探索器件的特性。

致谢 本工作的完成得到了博士后合作导师黄维院士强有力的指导与支持,特此感谢。

参 考 文 献

- [1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.
- [2] Radisavljevic B, Radenovic A, Brivio J, et al. Single-layer MoS₂ transistors[J]. Nature Nanotechnology, 2011, 6(3): 147-150.
- [3] Jiang A H, Cao X L, Wang Z Y, et al. Friction performance and corrosion resistance of MoS₂/DLC composite films deposited by magnetron sputtering[J]. Results in Physics, 2021, 25: 104278.
- [4] Harrou A, Gharibi E K, Taha Y, et al. Phosphogypsum and black steel slag as additives for ecological bentonite-based materials: microstructure and characterization[J]. Minerals, 2020, 10(12): 1067.
- [5] Harrou A, Gharibi E, Nasri H, et al. Physico-mechanical properties of phosphogypsum and black steel slag as aggregate for bentonite-lime based materials[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 31: S51-S55.
- [6] Novoselov K S, Mishchenko A, Carvalho A, et al. 2D materials and van der Waals heterostructures[J]. Science, 2016, 353(6298): aac9439.
- [7] Geim A K, Grigorieva I V. Van der Waals heterostructures[J]. Nature, 2013, 499(7459): 419-425.
- [8] Jariwala D, Marks T J, Hersam M C. Mixed-dimensional van der Waals heterostructures[J]. Nature Materials, 2017, 16(2): 170-181.
- [9] Yang T F, Zheng B Y, Wang Z, et al. Van der Waals epitaxial growth and optoelectronics of large-scale WSe₂/SnS₂ vertical bilayer p-n junctions[J]. Nature Communications,

- 2017, 8(1): 1-9.
- [10] Yan X, Liu C S, Li C, et al. Tunable SnSe₂/WSe₂ heterostructure tunneling field effect transistor[J]. *Small*, 2017, 13(34): 1701478.
- [11] Liu C S, Yan X, Song X F, et al. A semi-floating gate memory based on van der Waals heterostructures for quasi-non-volatile applications[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(5): 404-410.
- [12] Liu C H, Clark G, Fryett T, et al. Nanocavity integrated van der Waals heterostructure light-emitting tunneling diode[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(1): 200-205.
- [13] Li J Q, Mao X R, Xie S, et al. Bipolar phototransistor in a vertical Au/graphene/MoS₂ van der Waals heterojunction with photocurrent enhancement[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(1): 39-45.
- [14] Shimatani M, Fukushima S, Ogawa S. High-performance graphene/InSb heterojunction mid-infrared photogated diode[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12107: 121071Z.
- [15] Dong C B, Patil C, Dalir H, et al. Self-driven highly responsive PN junction InSe heterostructure near-infrared light detector[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(7): A97-A105.
- [16] Tian X Y, Liu Y S. Van der Waals heterojunction ReSe₂/WSe₂ polarization-resolved photodetector[J]. *Journal of Semiconductors*, 2021, 42(3): 032001.
- [17] Zhou X, Hu X Z, Zhou S S, et al. Tunneling diode based on WSe₂/SnS₂ heterostructure incorporating high detectivity and responsivity[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(7): 1703286.
- [18] Huang M Q, Li S M, Zhang Z F, et al. Multifunctional high-performance van der Waals heterostructures[J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(12): 1148-1154.
- [19] Cheng R Q, Wang F, Yin L, et al. High-performance, multifunctional devices based on asymmetric van der Waals heterostructures[J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(6): 356-361.
- [20] Zhou N, Wang R Y, Zhou X, et al. P-GaSe/N-MoS₂ vertical heterostructures synthesized by van der Waals epitaxy for photoresponse modulation[J]. *Small*, 2018, 14(7): 1702731.
- [21] Murali K, Dandu M, Das S, et al. Gate-tunable WSe₂/SnSe₂ backward diode with ultrahigh-reverse rectification ratio[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(6): 5657-5664.
- [22] Roy T, Tosun M, Cao X, et al. Dual-gated MoS₂/WSe₂ van der Waals tunnel diodes and transistors[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(2): 2071-2079.
- [23] Liu X C, Qu D S, Li H M, et al. Modulation of quantum tunneling via a vertical two-dimensional black phosphorus and molybdenum disulfide p-n junction[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(9): 9143-9150.