



基于过渡金属硫族化合物同质结的光电探测器

舒衍涛 张有为 王顺

Photodetectors based on homojunctions of transition metal dichalcogenides

Shu Yan-Tao Zhang You-Wei Wang Shun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 177301 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210859

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210859>

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

过渡金属硫族化合物柔性基底体系的模型与应用

Model and applications of transition metal dichalcogenides based compliant substrate epitaxy system

物理学报. 2018, 67(21): 218102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181571>

具有光电倍增的宽光谱三相体异质结有机彩色探测器

Organic color photodetectors based on tri-phase bulk heterojunction with wide spectrum and photoelectronic multiplication

物理学报. 2018, 67(19): 198503 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180502>

基于石墨烯-钙钛矿量子点场效应晶体管的光电探测器

Field effect transistor photodetector based on graphene and perovskite quantum dots

物理学报. 2018, 67(11): 118502 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180129>

基于二维材料二硒化锡场效应晶体管的光电探测器

Field effect transistor photodetector based on two dimensional SnSe₂

物理学报. 2020, 69(13): 137801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191960>

二维半导体过渡金属硫化物的逻辑集成器件

Logical integration device for two-dimensional semiconductor transition metal sulfide

物理学报. 2017, 66(21): 218503 <https://doi.org/10.7498/aps.66.218503>

二维过渡金属硫属化合物相变方法的研究进展

Research progress of two-dimensional transition metal dichalcogenide phase transition methods

物理学报. 2020, 69(24): 246101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200965>

青年科学评述

基于过渡金属硫族化合物同质结的光电探测器*

舒衍涛¹⁾ 张有为^{1)2)†} 王顺¹⁾²⁾

1) (华中科技大学物理学院, 精密重力测量国家重大科技基础设施, 基本物理量测量教育部

重点实验室, 引力与量子物理湖北省重点实验室, 武汉 430074)

2) (深圳华中科技大学研究院, 深圳 518057)

(2021年5月7日收到; 2021年6月10日收到修改稿)

近年来, 二维过渡金属硫族化合物 (transition metal dichalcogenides, TMDCs) 由于其出色的电学和光学特性在光电探测领域被广泛研究. 相比于报道较多的场效应晶体管型以及异质结型器件, 同质结器件在光电探测方面具有独特优势. 本文将聚焦基于 TMDCs 同质结的光电探测器的研究, 首先介绍同质结光电器件的主要工作原理, 然后以载流子调控方式为分类依据总结 TMDCs 同质结的几种制备方法及其获得的电学和光电性能. 此外, 本文还对同质结器件中光生载流子的输运过程进行具体分析, 阐述横向 p-i-n 结构具有超快光电响应速度的原因. 最后对基于 TMDCs 同质结的光电探测器的研究进行总结与前景展望.

关键词: 光电探测器, 过渡金属硫族化合物, 同质结, 光伏效应**PACS:** 73.40.Lq, 85.60.Gz, 73.50.Pz, 73.63.-b**DOI:** 10.7498/aps.70.20210859

1 引言

光电探测器的功能是将光信号转换为电信号, 在如今的信息化社会中发挥着重要的作用, 被广泛应用于视频成像、光通信、生物医学成像、安全、军事化应用等领域. 尽管应用领域的规模和多样性正在增长, 但在速度、效率、波长范围以及柔性、透明性和 CMOS 可集成性等方面, 对于更高性能的光电探测器的需求正变得越来越突出. 近年来, 二维材料的快速发展为新型光电探测器的研究提供了新的机遇^[1-6]. 其中, 过渡金属硫族化合物 (transition metal dichalcogenides, TMDCs) 是一类典型的层状二维材料, 具有带隙随层数连续可调、较强的光与物质相互作用等诸多优异的电学和光学特性^[7-14], 是研究新型高性能光电探测器最有潜力的候选材料之一. 此外, TMDCs 的生长技术也不断

被研究和突破^[15-19], 未来有望实现低成本大规模生产.

光电探测器主要有电阻型、场效应晶体管型与二极管型三种基本器件结构. 此外, 研究人员还报道了一些独特的器件结构类型, 如可以显著抑制暗电流的势垒阻挡型器件以及常用于红外探测领域的双色/多色探测器等^[20-22]. 受限于器件制备的难易程度, 报道最多的 TMDCs 基光电探测器是电阻型和场效应晶体管型^[23-25]. 但这两类探测器都要在偏置电压下工作, 功耗较高, 并且无法排除光电导增益 (photoconductive gain, G) 效应, 使得多数 TMDCs 基光电探测器的响应速度较慢. Lopez-Sanchez 等^[25]报道了单层 MoS₂ 光电探测器, 器件实现了 880 A/W 的超高光响应度 (photoresponsivity, R), 但响应时间 (response time, τ) 很慢 (约 9 s). 二极管型器件具有响应速度快、响应线性度高、低噪声、低功耗等优势, 在光电探测器中占据主流

* 国家自然科学基金 (批准号: 12074134)、深圳市科技计划 (批准号: JCYJ20180507183904841, GJHZ20200731095203009) 和湖北省自然科学基金 (批准号: 2020CFB406) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: youweizhang@hust.edu.cn



张有为, 2008年本科毕业于厦门大学材料科学与工程专业; 2016年博士毕业于复旦大学微电子与固态电子学专业; 毕业后赴瑞典乌普萨拉大学从事博士后研究; 2018年至今任华中科技大学物理学院副研究员, 博导; 目前主要从事基于低维材料体系的新型纳米电子器件研究, 包括器件工艺, 电学特性, 光电探测等方面. 在国际顶尖期刊 *ACS Nano*, *Small*, *Advanced Optical Materials*, *Nano Research*, *Nanophotonics*, *Scientific Reports*, *Organic Electronics*, *IEEE Electron Device Letters*, *Journal of Physical Chemistry C* 等发表文章 20 余篇, 其中包括物理学科 ESI 高被引论文 1 篇. 相关器件设计与工艺方面的研究成果已申请并授权国内发明专利 12 项. 主持国家、省、市级科研项目 4 项.

地位. 目前报道的 TMDCs 光电二极管主要有异质结二极管和同质结二极管两类^[26]. 其中异质结二极管需要把两种不同的 TMDCs 材料^[27–30]或者把 TMDCs 与其他材料^[31–34]堆叠在一起, 这通常采用各类转移技术来实现. 虽然通过堆叠不同材料, 异质结能够极大地丰富 TMDCs 光电探测器的种类, 但堆叠过程容易在材料中引入缺陷和非均匀性, 不易制备高质量的二极管^[35]. 此外, 异质结中内建电势决定于两种材料的费米能级差, 难以获得较大的光生电压^[36]. 并且由于异质结中两种材料界面间隙较大以及二维材料层间电阻大, 不利于电荷传输, 导致异质结二极管的光电流通常较小^[37]. 同质结是指掺杂情况不同的同种材料相接触时, 由于费米能级差异引发电荷扩散, 产生接触电势差, 从而在界面处形成的结, 这通常是通过在同一材料的不同区域分别进行 n 型和 p 型掺杂来实现. 对于能带结构会随层数发生变化的 TMDCs 而言, 同质结的制备也可以通过控制材料不同区域的厚度来实现. 同质结器件制备通常不需要复杂的转移、堆叠过程, 原则上更容易得到高质量的光电二极管. 通过对掺杂水平的调控, 同质结中由内建电势引起的势垒高度可以接近甚至超过材料的禁带宽度. 此外, 对于横向结构的同质结, 光生载流子在横向电场作用下在 TMDCs 层内漂移, 能够充分利用二维层状材料层内电阻小, 载流子迁移率高的特点. 因此, 基于同质结的光电探测器可以获得更大的开路电压与光电流以及更短的响应时间, 有望兼顾响应度与响应速度, 具有良好的研究与应用前景.

在本文中, 首先介绍同质结光电探测器的工作原理, 然后总结基于目前几种常见的载流子调控方式制备的 TMDCs 同质结光探测器及其性能. 此外, 还从同质结中光电流机制入手, 探究限制器件响应速度的因素, 进而提出一种优化的器件结构. 最后, 对基于 TMDCs 同质结的光电探测器的研究进行简要的总结与展望.

2 同质结光电探测器的工作原理

同质结器件在施加正向和反向偏置电压时, 由于耗尽区宽度的改变, 会出现正向导通和反向截止的现象. 如果在正向导通状态下进行光电探测, 器件较大的暗电流会导致相对较低的比探测率 (specific detectivity, D^*), 并且功耗较高. 因此同质结器件一般工作在零偏或者反偏状态, 下面对这两种工作状态下同质结中光电转换涉及的物理过程进行简要介绍.

2.1 零偏压状态

同质结器件在零偏下的光电转换过程通过光伏效应 (photovoltaic effect, PVE) 来实现. 热平衡状态下, 由于浓度梯度引起的载流子扩散, 同质结中会形成空间电荷区, 产生由 n 区指向 p 区的内建电场. 当入射光的光子能量高于 TMDCs 的禁带宽度时, 光生电子-空穴对会在内建电场的作用下发生漂移而分离. 同质结的两端由于收集到光生电子或者空穴会产生电势差, 即开路电压 V_{OC} , 当器件两端短接时会产生短路电流 I_{SC} , 这就是光伏效应. 光伏效应是同质结器件实现光电转换最主要的物理机制. 同质结器件工作在零偏压状态下具有自驱动、低功耗的优点, 而且暗电流较小, 从而提升了比探测率, 同时优化了线性度和灵敏度.

2.2 反向偏置状态

在反向偏置状态下, 同质结器件中内建电场得到增强, 光生载流子被更加有效地分离, 即光伏效应得到了增强. 因而, 理论上可以获得更高的响应度和更快的响应速度. 但反向偏压也可能导致器件暗电流增加, 比探测率降低. 此外, 当光敏材料中存在陷阱态时, 器件在外加偏压下会产生显著的光电导增益. 陷阱态的存在会导致光生载流子寿命延长, 光电导增益提高, 光响应度随之提高, 但这付

出的代价是响应速度降低. 即这种光电导增益和响应速度对光生载流子的寿命有着相反的依赖关系, 因此在存在光电导增益的情况下, 器件难以同时实现高的响应度和快的响应速度.

3 TMDCs 同质结光电探测器的制备与性能

对同一材料的不同区域进行载流子类型与浓度调控是制备同质结器件的关键, 下面将介绍目前几种常用的载流子调控方式以及所获得的内建电场的电学与光电性能, 并对各种方法的优劣进行适当的评析.

3.1 基于电场调控的 TMDCs 同质结

二维 TMDCs 只有纳米级厚度, 载流子类型和浓度很容易被外部电场调控, 尤其对于单层和少层的双极型 TMDCs (如 WSe_2 和 MoTe_2). 因此可以通过在 TMDCs 不同区域形成方向相反的电场来构建同质结器件进行光电探测. 图 1 展示了利用电场调控实现同质结的原理示意图以及能带图, 其中电场 E 可以由栅极电压、铁电剩余极化或者束缚电荷产生.

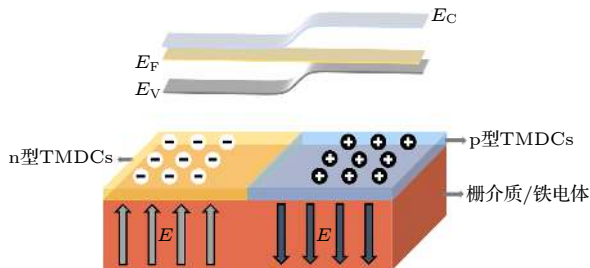


图 1 基于电场调控的 TMDCs 同质结示意图与能带图

Fig. 1. Schematic and band diagram of TMDCs homojunction based on electric field regulation.

3.1.1 分离栅极静电调控的 TMDCs 同质结

直接施加栅极电压是实现电场调控最直接的方式, 利用分离栅极实现的内建电场器件被诸多研究者报道 [38–45]. 对于此类器件, 两个分离栅极上的电压独立地调控 TMDCs 两侧的载流子类型和浓度. 当栅压为正时, 对应沟道区域被调制为 n 型; 相反当栅压为负时, 对应沟道区域被调制为 p 型. 通过不同的栅压配置可以将器件调整为不同的工作模式. Groenendijk 等 [41] 使用六方氮化硼 (hexagonal boron nitride, h-BN) 作为栅极电介质, 利用分

离栅极调控实现了单层 WSe_2 p-n 同质结, 如图 2(a) 所示. 相比于之前报道使用的 HfO_2 [38] 和 Si_3N_4 [40] 等电介质材料, h-BN 具有原子级平整、无电荷陷阱的表面和大的介电击穿电场, 有助于提高器件性能. 图 2(b) 为四种不同模式下器件的输出特性曲线, p-n 结二极管理想因子为 2.14. PN 配置下器件的光响应如图 2(c) 所示, 在 532 nm 的光照下测得了 0.70 mA/W 的最大光响应, 响应时间约为 10 ms. Bie 等 [44] 制备了分离顶栅调控的双层 MoTe_2 p-n 同质结二极管, 并与硅光波导耦合在一起, 展示了 TMDCs 基光电器件在集成光电系统与光通信领域的应用前景. Lee 等 [45] 首先利用部分氢 (H) 掺杂 [46] 制备了 MoTe_2 横向 p-n 同质结, 然后通过调节分离栅极的电压形成了 p⁺, 本征 (i) 和 n⁺ 的三个区域从而获得了 p-i-n 二极管. 由于内建电场的增加, p-i-n 模式极大增强了可见光至 1300 nm 短波红外 (shortwave infrared, SWIR) 波长范围内的光响应.

3.1.2 铁电极化调控的 TMDCs 同质结

利用铁电极化可以对二维材料载流子进行有效调控 [47–50], 因此可以通过使用铁电体衬底并将不同区域铁电体极化调整为相反方向实现电场调控的内建结 [51–54]. Wu 等 [52] 在预先制备有分离底栅电极的 Si/SiO₂ 衬底上旋涂了 P(VDF-TrFE) 膜, 然后将机械剥离的多层 MoTe_2 和石墨烯电极有序转移到铁电聚合物上. 通过在分离底栅上施加相反方向的电压脉冲使铁电共聚物产生极化引起的方向相反的非易失性铁电电场, 实现了双极型 MoTe_2 中有效的载流子调制从而形成了 p-n 同质结二极管, 如图 2(d) 所示. 二极管显示出很强的整流特性, 整流比超过 10^5 . 图 2(e) 与图 2(f) 展示了二极管出色的光电探测性能, 在无外加偏压和栅极电压的情况下器件对 520 nm 可见光表现出 5 A/W 的高光响应度, 40% 的高外量子效率 (external quantum efficiency, EQE), 以及 3×10^{12} Jones 的高比探测率, 30 μs 的快速响应时间, 并且在室温下响应范围可扩展至 1400 nm 的 SWIR. 这种方法为制造二维材料电子和光电器件提供了一种新的思路. 此外, 他们还开发了一种利用扫描探针精确控制 P(VDF-TrFE) 的极化来制备同质结光电器件和存储器件的方法 [53].

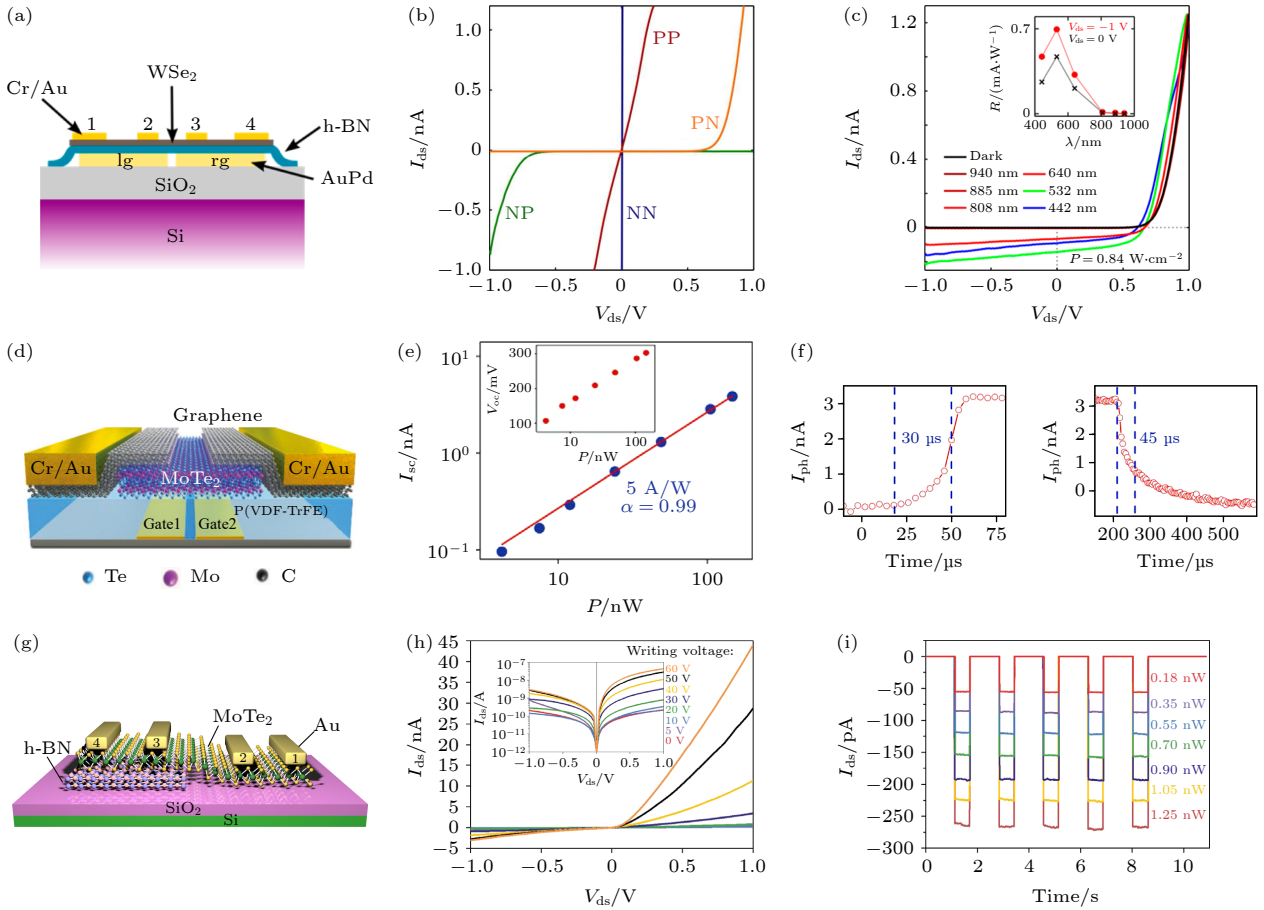


图 2 基于电场调控的 TMDCs 同质结光电探测器 (a) 分离栅极调控的同质结示意图; (b) 不同栅压配置下的输出特性; (c) PN 配置下器件的光响应^[41]; (d) 铁电极化调控的同质结示意图; (e) 不同光功率下的 I_{sc} 和 V_{oc} ; (f) 光电流的响应时间^[52]; (g) UV 诱导电场调控的同质结示意图; (h) 输出特性随写入电压的变化; (i) 不同光功率下的动态光响应^[56]

Fig. 2. TMDCs homojunction photodetectors based on electric field regulation: (a) Schematic diagram of homojunction controlled by local gates; (b) output characteristics under different gate voltage configurations; (c) photoresponse of the device in PN configuration^[41]; (d) schematic diagram of homojunction defined by ferroelectric polarization; (e) I_{sc} and V_{oc} at different laser powers; (f) the response time of photocurrent^[52]; (g) schematic diagram of homojunction regulated by UV-induced electric field; (h) variation of output characteristics with writing voltage; (i) dynamic responses under different laser powers^[56].

3.1.3 紫外线照射诱导电场调控的 TMDCs 同质结

除了上述两种电场调控方式外, 有研究者报道了在异质结构中栅极电压辅助的光诱导非易失性电场调控^[55–57]. Wu 等^[56]在 Si/SiO₂ 衬底上制备了如图 2(g) 所示的叠层结构, 其中 MoTe₂ 部分堆叠在 h-BN 上. 紫外线 (ultraviolet, UV) 照射会诱导 MoTe₂ 层中电子和空穴以及 h-BN/SiO₂ 界面陷阱态的产生. 在正的栅极写入电压下, 堆叠区域电子被陷阱态俘获从而产生电场调控的效果以实现 p 型掺杂, 而未堆叠区域 MoTe₂ 保持固有的 n 型. 图 2(h) 显示了 p-n 结整流特性随着写入电压的增大而增强. 作为光电探测器, 器件具有出色的灵敏度、可重复性和稳定性, 如图 2(i) 所示. 响应

度达到 0.21 A/W, 响应时间约为 2 ms. 此外他们通过进一步研究, 通过特定的源、漏、栅极电压配置, 只在堆叠区域即可实现同质结的制备^[57].

通过改变栅压或者写入电压等来调节电场大小和方向, 可以方便地对器件的工作模式进行切换. 因此, 利用电场对载流子进行的调控通常是可控并且可逆的, 这使得基于电场调控的同质结光电探测器具有更多应用上的灵活性. 此外, 电场调控不会有化学试剂或杂质的引入, 更好地保留了 TMDCs 的本征电学性能. 但同时此类器件制备过程较为复杂, 难以实现阵列结构以提高集成度. 此外, 电场调控的方式通常只能实现单层和少层 TMDCs 同质结, 受限于层间电荷屏蔽作用, 难以在多层 TMDCs 材料中应用. 另一方面, 利用栅极

静电调控的器件在工作时更是需要多个电路通道同时工作, 不仅增加了功耗也提升了电路系统的复杂程度.

3.2 基于表面电荷转移掺杂的 TMDCs 同质结

得益于二维 TMDCs 大的比表面积, 表面电荷转移掺杂 (surface charge transfer doping, SCTD) 是调控载流子的高效方法. 将掺杂剂与 TMDCs 形成表面接触或者在 TMDCs 表面形成有掺杂作用的界面层后, 由于掺杂剂或者界面层与 TMDCs 在费米能级、功函数或者氧化还原电势上的差异, 电荷的单方向转移会对 TMDCs 形成有效的掺杂. 图 3 为 TMDCs 的 p 型和 n 型 SCTD 过程的能级示意图, 其中 E_0 表示真空中静止电子的能量. 此类同质结器件一般通过局域化学掺杂 [37,58–64] 或者表面等离子体处理 [65–68] 等来实现, 也有研究者报道了利用一些独特的掺杂方法实现基于 SCTD 的同质结 [69–72].

3.2.1 基于化学掺杂诱导 SCTD 的 TMDCs 同质结

利用化学溶液处理是实现 SCTD 最简单的方式. Choi 等 [58] 通过在部分 MoS_2 上堆叠 h-BN 作为掩模保持其固有的 n 型, 并利用 AuCl_3 溶液 (AuCl_3 的正还原电位高, 因此可以作为有效的电子受体 [73]) 对 MoS_2 进行 p 型掺杂, 形成了横向 MoS_2 p-n 同质结, 如图 4(a) 所示. 在 -40 V 的栅

压下, 器件具有如图 4(b) 所示的整流特性, 理想因子约为 1. 在波长 500 nm 的光照下最大响应度为 5.07 A/W , 响应时间约为 $100\text{--}200\text{ ms}$, 并观察到较大的开路电压与短路电流. 图 4(c) 展示了不同波长和栅压下器件的 EQE(左轴) 和 D^* (右轴). 与横向结不同, Li 等 [59] 利用湿法转移技术在 MoS_2 两面分别旋涂了苜蓿紫精 (benzyl viologen, BV)[73] 和 AuCl_3 溶液并退火处理形成了 n 型和 p 型表面掺杂, 实现了具有良好整流特性和光伏特性的垂直 p-n 同质结. Sun 等 [64] 使用十六烷基三甲基溴化铵 (cetyltrimethyl ammonium bromides, CTAB) 溶液对 WSe_2 进行了局域化 n 型掺杂制备了横向同质结光电探测器. 器件具有 10^3 的整流比, 最大光响应为 30 A/W ($\text{EQE} = 7989\%$), 比探测率大于 10^{11} Jones, 响应速度相比于掺杂前也有较大提升. 此外他们还利用密度泛函理论从理论计算上解释了 CTAB 对 Cr 电极的功函数修饰以及 CTAB 上的 Br^- 与 TMDCs 之间的电荷转移.

3.2.2 基于等离子体处理诱导 SCTD 的 TMDCs 同质结

近年来, 利用等离子体处理对 TMDCs 进行载流子类型与浓度的调控被证明是一类行之有效的方法 [74–79]. 等离子体基元具有能量高、反应活性大等特点, 其与 TMDCs 表面发生物理与化学相互作用, 使得 TMDCs 表面形成元素组成、成键状态有别于本征 TMDCs 的界面层, 作为诱发电荷转移的掺杂物质. 利用此方法构建的 TMDCs 同质结光电

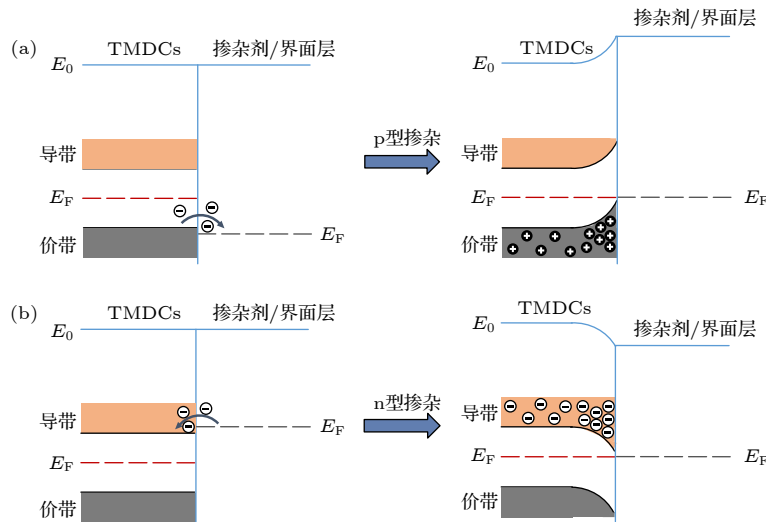


图 3 TMDCs 的 p 型和 n 型 SCTD 过程的能级示意图

Fig. 3. Schematic energy levels for p-type and n-type SCTD processes of TMDCs.

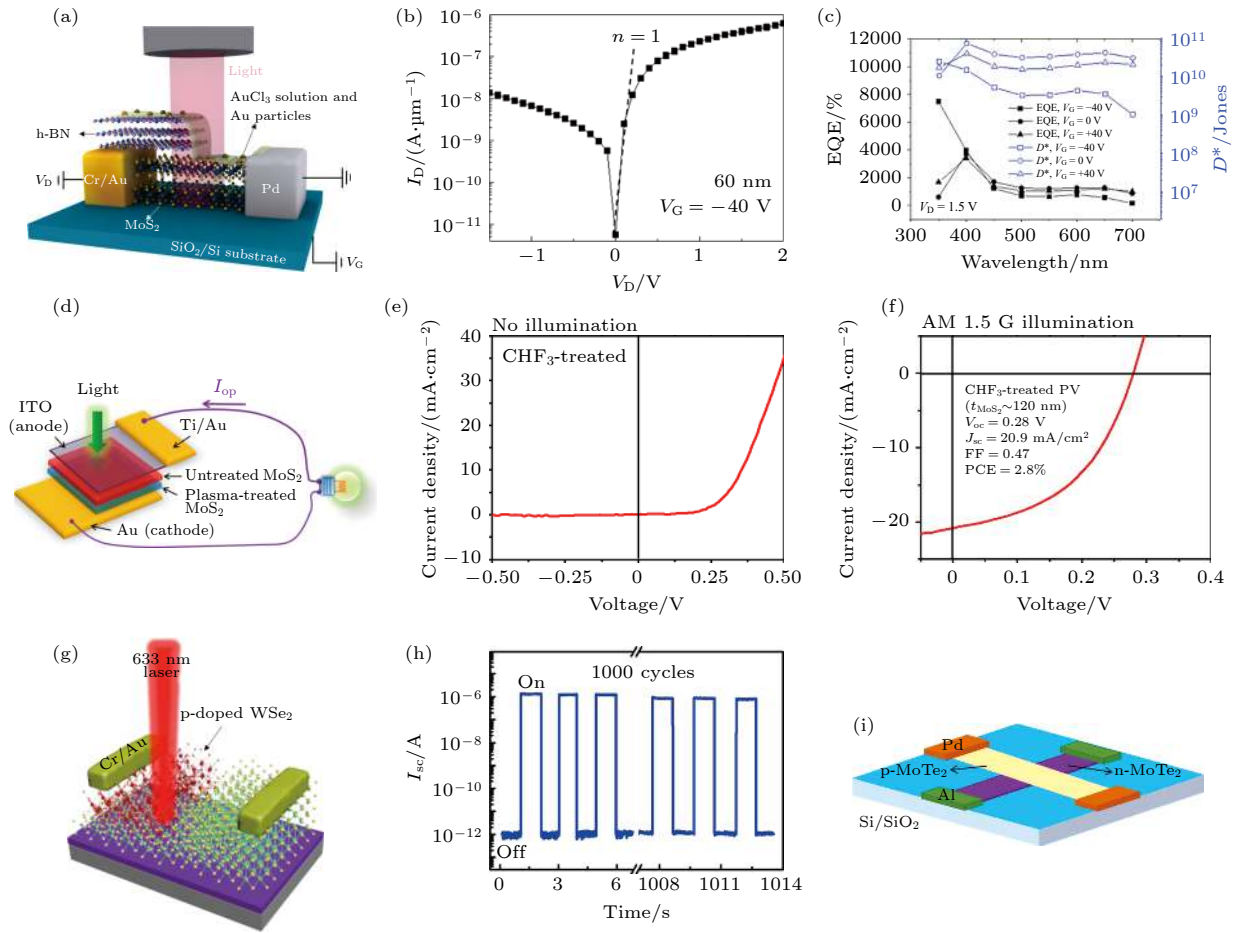


图 4 基于 SCTD 的 TMDCs 同质结光电探测器 (a) 光照下基于 AlCl_3 化学掺杂的同质结示意图与电路图; (b) $V_G = -40$ V 时的 I_D - V_D 曲线; (c) 不同波长光照下的 EQE 和 D^* ($V_D = 1.5$ V, $V_G = 0, \pm 40$ V)^[58]; (d) 光照下基于 CHF_3 等离子体处理的垂直同质结光伏效应示意图; (e) 暗态和 (f) AM1.5 G 光照下的 J - V 曲线^[65]; (g) 激光诱导 WSe_2 同质结示意图; (h) 长时间循环光响应 ($V_{ds} = 0$ V, $V_g = 40$ V)^[69]; (i) 基于 DUV 诱导掺杂的垂直同质结示意图^[70]

Fig. 4. TMDCs homojunction photodetectors based on SCTD: (a) Schematic diagram and circuit diagram of homojunction based on chemical doping by AlCl_3 under illumination; (b) I_D - V_D curve at $V_G = -40$ V; (c) EQE and D^* under different wavelengths of light ($V_D = 1.5$ V, $V_G = 0, \pm 40$ V)^[58]; (d) photovoltaic effect of vertical homojunction based on CHF_3 plasma treatment under illumination; J - V curves of (e) dark state and (f) AM1.5 G illumination^[65]; (g) schematic diagram of laser-induced WSe_2 homojunction; (h) Temporal photocurrent response ($V_{ds} = 0$ V, $V_g = 40$ V)^[69]; (i) schematic diagram of vertical homojunction based on DUV-induced doping^[70].

器件也被数个研究团队报道^[65–68]. Wi 等^[65]制造了垂直堆叠的氧化铟锡 (indium tin oxide, ITO) 透明电极/多层 MoS_2/Au 电极结构的光伏器件, 其中与 Au 电极接触的一面利用 CHF_3 等离子体诱导实现了 p 型掺杂从而形成了垂直 MoS_2 p-n 同质结, 如图 4(d) 所示. 器件表现出良好的整流特性 (整流比大于 10^4), 反向暗电流密度约为 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 如图 4(e) 所示. 图 4(f) 展示了器件在模拟太阳光 (AM1.5 G) 照明下的光伏性能, 获得了高达 $20.9 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 的短路光电流密度值和高达 2.8% 的功率转换效率. Xie 等^[66]将 BN 转移到 WSe_2 场效应晶体管上并覆盖部分沟道, 然后将器件暴露在

N_2O 等离子体中使另一半沟道的表面氧化从而引发电荷转移实现 p 型掺杂. 所获得的 p-n 同质结在 -60 V 的栅压调制下整流比达 10^6 . 此外, 此横向 p-n 结表现出出色的光电性能, 在 $V_{ds} = 1$ V 的情况下, 光响应度高达 $2.49 \text{ A}/\text{W}$, 光响应的上升和下降时间分别为 8 和 30 ms.

3.2.3 基于激光扫描诱导 SCTD 的 TMDCs 同质结

区别于采用各种掩膜层来定义掺杂区域的内同质结制备方法, Chen 等^[69]开发了一种通过激光扫描来构建横向 WSe_2 p-n 同质结的技术. 其中激光扫描区域的表层氧化产物 WO_x 作为电子受体实现

该区域的 p 型掺杂, 相邻区域被适当的栅极电压调制为 n 型掺杂, 如图 4(g) 所示. 所制备的同质结光电探测器具有 10^6 的高光开关比, 800 mA/W 的光响应度和微秒级的光响应时间, 并且具有良好的循环稳定性, 如图 4(h) 所示.

3.2.4 基于深紫外线诱导 SCTD 的 TMDCs 同质结

有研究团队报道了一种在 N_2 和 O_2 环境中利用深紫外线 (deep ultraviolet, DUV) 驱动对 TMDCs 进行可逆 n 型掺杂/退掺杂的技术^[70,71,80,81]. n 型掺杂/退掺杂的实现被解释为 TMDCs 表面作为电子受体的氧原子 (分子) 的清除/吸附. Aftab 等^[70] 利用这种掺杂技术制备了垂直 $MoTe_2$ 同质结, 并且使用了非对称金属电极 (p 型区: Pd/Au, n 型区: Al/Au) 以实现低接触电阻, 如图 4(i) 所示. 器件具有 10^4 的整流比, 并且随栅压的调制变化不大. 在 530 nm 绿光的照射下, 器件表现出 850 mA/W 的光响应度, 最大 EQE 达 195.5%. 此外他们还报道了具有更加优异的电学与光电特性的横向同质结^[71].

基于 SCTD 的同质结光电探测器结构与制备工艺简单, 在材料的选择上也更具广泛性. 同时, 通过控制表面掺杂层覆盖率或厚度, 可以实现对掺杂浓度的定量调控. 结合快速发展的 TMDCs 生长技术, 未来有望实现器件的大规模制备, 具有良好的应用前景. 但目前仍有诸多问题亟待解决, 如掺杂效果的持久性、稳定性、重复性等问题, 还需进行更加深入的研究. 此外, 掺杂剂和掺杂工艺可能对器件电学以及光电性能产生不利影响, 这也是限制 SCTD 应用的因素之一. 比如, 掺杂物质作为载流子散射中心或者光生载流子陷阱中心, 掺杂工艺在 TMDCs 晶格中引入缺陷等.

3.3 基于元素替位掺杂的 TMDCs 同质结

作为 Si 和 Ge 等传统半导体材料通常采用的掺杂方法, 元素替位掺杂在 TMDCs 中也被证明是可行的^[82-84], 利用此方法制备的同质结器件也获得了一些研究报道^[84-86]. Svatek 等^[86] 首先使用化学气相传输 (chemical vapor transport, CVT) 的方法制备了 p 型 $MoS_2(0.5\%Nb)$ 掺杂) 和 n 型 $MoS_2(0.5\%Fe)$ 掺杂), 然后利用转移技术在预构有 Au/Ti 电极的 SiO_2/Si 衬底上先后堆叠了 $MoS_2:Fe$ 和

$MoS_2:Nb$, 实现了 MoS_2 垂直 p-n 同质结的制备, 如图 5(a) 所示. 图 5(b) 展示了栅极电压对器件的光伏性能的调制, 这是由于栅极电压可以对 p-n 结空间电荷区的厚度进行有效的调控. 零栅压时的光伏性能如图 5(c) 所示, 在 660 nm 光的照射下, 短路电流的最大值为 $J_{SC} = 3.3$ mA/cm², 对应 4.7% 的 EQE 和 25 mA/W 的光响应度, 响应时间为 80 ms. 此外, 他们还探索了器件在柔性透明衬底上的制备和光电特性. 利用元素替位掺杂实现的同质结器件性能持久稳定, 但实现对二维 TMDCs 掺杂浓度和区域进行精确调控以提高同质结质量仍是需要进一步探究的问题.

3.4 基于缺陷工程的 TMDCs 同质结

一般来说, TMDCs 中硫族元素空位的形成能远低于金属元素空位^[87,88], 因此 TMDCs 通常表现为富含硫族元素空位的状态^[89]. 理论计算^[87,89,90] 和实验^[74,75,89] 均表明硫族元素空位的存在会形成靠近导带的缺陷能级从而对 TMDCs 具有 n 型掺杂的效果, 因此可以通过对硫族元素空位的调控实现对载流子的调控. Zhang 等^[91] 通过 PSS 诱导的氢化过程实现了 MoS_2 中硫空位被表面上硫原子团簇的自发修复, 自修复后的 MoS_2 电子浓度降低了数百倍. 基于此方法他们制造了单层 MoS_2 横向同质结, 如图 5(d) 所示. 器件在光照下的输出特性曲线如图 5(e) 所示, 在零偏压下具有 308 mA/W 的光响应度, 并且具有出色的长时间空气稳定性, 但响应时间接近 1 s. 此外, 他们还通过垂直堆叠自修复前后的单层 MoS_2 并通过退火处理制备了如图 5(f) 所示的垂直同质结光电二极管^[92], 器件具有比垂直堆叠的异质结器件更强的层间耦合. 缺陷工程在对载流子浓度进行调控的同时消除了缺陷诱导的局域场, 进一步提高了同质结器件的性能. 但另一方面这种方法并不能改变 TMDCs 中多数载流子的类型, 难以获得较大内建电场, 也导致器件的性能受到一定的限制.

3.5 基于厚度调制的 TMDCs 同质结

与常规的半导体材料不同, 由于量子限域效应, 二维 TMDCs 的能带结构会随着层数的变化而变化^[2,7,9,10], 图 5(g) 展示了单层和多层 MoS_2 以及常用的接触金属 Ti 的能带结构示意图^[93]. 因此通过

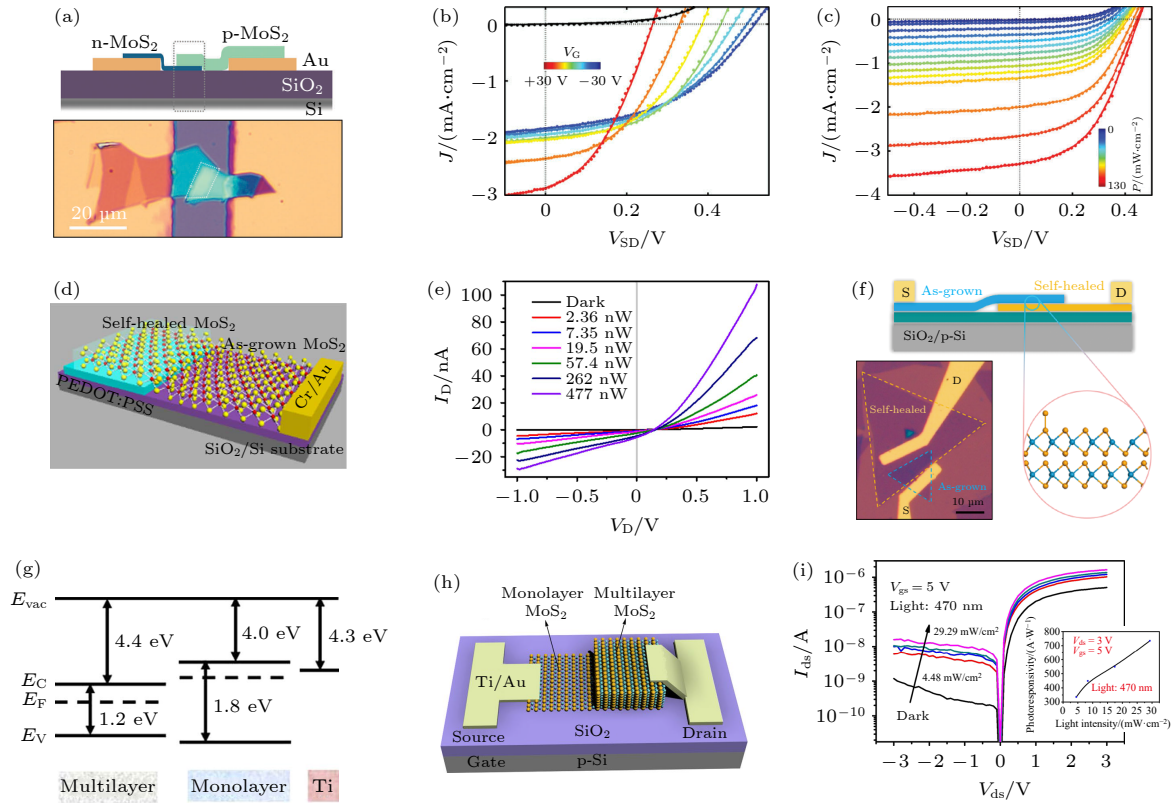


图 5 基于元素替位掺杂、缺陷工程和厚度调制的 TMDCs 同质结光电探测器 (a) 基于元素替位掺杂的同质结示意图与光学图像; (b) 栅极电压对光伏性能的调制; (c) 不同光功率下的光伏性能 ($V_g = 0$, $\lambda = 660$ nm)^[86]; (d) 基于 S 空位自修复的单层 MoS₂ 横向同质结示意图; (e) 光照下的输出特性曲线 ($\lambda = 575$ nm)^[91]; (f) 基于 S 空位自修复的垂直同质结示意图与光学图像^[92]; (g) 单层和多层 MoS₂ 以及 Ti 的能带图; (h) MoS₂ 单层-多层结示意图; (i) 470 nm 光照下器件的光响应特性^[93]

Fig. 5. TMDCs homojunction photodetectors based on element substitution doping, defect engineering and thickness modulation: (a) Schematic diagram and optical image of homojunction based on element substitution doping; (b) modulation of gate voltage on photovoltaic performance; (c) photovoltaic performance under different optical power ($V_g = 0$, $\lambda = 660$ nm)^[86]; (d) schematic diagram of single-layer MoS₂ lateral homojunction based on S vacancy self-healing; (e) output curve under illumination ($\lambda = 575$ nm)^[91]; (f) schematic diagram and optical image of vertical homojunction based on S vacancy self-healing^[92]; (g) the band diagram of single and multilayer MoS₂ and Ti; (h) schematic diagram of the multilayer/monolayer MoS₂ junction; (i) photoresponse characteristics of the device under 470 nm illumination^[93].

调控不同区域 TMDCs 的厚度也可实现同质结器件的制备^[93–99]. Sun 等^[93] 剥离得到了连续的单层-多层 MoS₂, 从而直接制备了同质结器件, 如图 5(h) 所示. 其中单层和多层 MoS₂ 的厚度约为 0.65 和 6.90 nm. 器件表现出栅压可调的良好整流特性, 最大整流比达 10^3 , 表明了高质量结的形成. 图 5(i) 显示了器件在 470 nm 光照下的良好光响应特性, 并且器件具有从紫外到可见光的宽带光响应. 除了直接剥离得到连续的不同厚度 TMDCs 以外, 激光扫描^[94]、等离子体刻蚀^[95]、可控化学气相沉积生长^[96]、原子层刻蚀^[97] 都被证明是制备不同厚度 TMDCs 同质结器件的有效方法. 基于厚度调制的 TMDCs 同质结利用 TMDCs 能带结构随层数变化的固有性质来实现, 无掺杂过程, 制备工艺简单

稳定. 但另一方面, 与缺陷工程类似, 由于能带结构随层数变化范围有限, 基于层数调制的同质结器件也存在内建电势较小的问题.

4 TMDCs 同质结光电探测器中的光电流输运机制与器件结构优化

由上述文献报道可以看出, TMDCs 同质结器件应用于光电探测已经表现出高的响应度与灵敏度, 但另一方面, 现阶段 TMDCs 同质结光电器件性能还存在诸多亟待提高之处, 其中最显著的问题是响应速度慢, 以至于带宽 (bandwidth, BW) 低. 表 1 总结了基于 TMDCs 的同质结光电探测器的性能参数. 就响应速度而言, 响应时间大多数在毫秒 (ms) 到秒 (s) 量级, 少数达到了微秒 (μ s) 量级,

表 1 基于 TMDCs 同质结的光电探测器性能对比
Table 1. Performance comparison of photodetectors based on TMDCs homojunctions.

材料	载流子调控方式		理想因子	光源 波长/nm	偏置电压 V_{bias}/V	响应度/ $\text{mA}\cdot\text{W}^{-1}$	探测率/ Jones		响应时间		文献
	n型	p型					整流比	比探测率/ Jones	上升/ms	下降/ms	
单层WSe ₂	正栅压	负栅压	1.9	532	2	210	—	—	—	—	[38]
单层WSe ₂	正栅压	负栅压	2.14	532	-1	0.7	—	10.4	9.8	—	[41]
多层MoTe ₂	铁电极化	铁电极化	2	520	0	5	3×10^{12}	0.03	0.045	—	[52]
多层MoS ₂	铁电极化	铁电极化	1.7	532	0	15	—	0.01	0.02	—	[54]
单层MoTe ₂	UV诱导电场	UV诱导电场	2.1	532	0	160	—	2	2	—	[57]
多层MoS ₂	—	AuCl ₃	1 ($V_g = -40\text{ V}$)	500	1.5	5070	3×10^{10}	100	200	—	[58]
单层MoS ₂	BV	AuCl ₃	1.6	655	-1	30	—	—	—	—	[59]
单层WSe ₂	N ₂ H ₄	—	—	470	-5	30	6.18×10^8	2	2	—	[60]
多层WSe ₂	N ₂ H ₄	—	1.1	635	-5 ($V_g = -40\text{ V}$)	468	2.5×10^9	4	4	—	[37]
单层MoSe ₂	PPH3	MoO _x (退火)	1.2	532	0	1300	—	—	—	—	[61]
多层WSe ₂	PEI	负栅压	1.66	520	0	80	10^{11}	0.2	0.06	—	[63]
单层WSe ₂	CTAB	—	1.64	450	-1.5	3×10^4	10^{11}	7.8	7.7	—	[64]
多层WSe ₂	—	N ₂ O plasma	3.1	520	1	2490	—	8	30	—	[66]
多层WSe ₂	—	WO _x (O ₂ Plasma)	—	520	1	250	7.7×10^9	41.8	2289.8	—	[67]
多层WSe ₂	正栅压	WO _x (laser)	—	633	0	800	—	0.136	0.039	—	[69]
多层MoTe ₂	DUV(N ₂)	—	1.05	530	0	850	—	—	—	—	[70]
多层MoTe ₂	DUV(N ₂)	—	-1	850	0	5500	—	29	38	—	[71]
单层MoS ₂	元素掺杂(Fe)	元素掺杂(Nb)	-2.5	660	0	25	—	80	80	—	[86]
单层MoS ₂	PSS诱导缺陷修复(n ⁺)	—(n)	1.6	575	0	308	—	810	750	—	[91]
双层MoS ₂	PSS诱导缺陷修复(n ⁺)	—(n)	1.6	532	0	54.6	—	3100	3800	—	[92]
多层WSe ₂	WSe _{2,y} (Ar Plasma)	WO _x (O ₂ plasma)	1.14	450	0	105	2.2×10^{13}	0.000264	0.000552	—	[68]
MoS ₂	—	—	10^3 ($V_g = 10\text{ V}$)	470	—	10^6	7×10^{10}	2	2000	—	[93]

对应带宽只有几 Hz 至几十 kHz, 严重限制了探测器在高频领域的应用.

为了获得更快的响应速度, 必须从分析光电流机制入手. 器件在外加偏压下工作时, 由于 TMDCs 中缺陷态对光生载流子的俘获, 光生载流子的寿命被极大地延长, 引起显著的光电导增益效应, 使得器件表现出超高的响应度, 但代价是响应速度严重退化 [100,101]. 要克服光电导增益现象, 最直接的解决思路就是减少 TMDCs 中的缺陷密度. 但目前无论是二维 TMDCs 的直接生长还是块状晶体生长后的机械剥离都难以避免本征缺陷的存在. 尽管有些缺陷修复的方法被报道 [101,102], 但取得的效果仍然差强人意. 另一方面, 光电导增益效应离不开外置偏压电场, 而由于存在内建电场, 二极管型光电探测器可以在零偏压的光伏模式下工作, 这从根本上消除了限制 TMDCs 光电探测器响应速度的光电导增益效应.

光伏模式下的光电二极管, 其响应时间主要由三个时间分量共同决定, 分别是 RC 时间常数 (τ_{RC}), 载流子漂移时间 (τ_{Drift}), 载流子扩散时间 ($\tau_{Diffusion}$). 这三个分量与探测器响应时间满足如下关系:

$$\tau = (\tau_{RC}^2 + \tau_{Drift}^2 + \tau_{Diffusion}^2)^{1/2}. \quad (1)$$

下面以报道最多的横向 p-n 同质结为例对这

三个时间分量进行粗略分析. 器件结构和光生载流子输运过程如图 6(a) 所示. 假设 TMDCs 的厚度为 nm 量级, 结区感光面积为 μm^2 量级, 耗尽区宽度为 μm 量级.

首先, 器件的 τ_{RC} 可表示为

$$\tau_{RC} = R_L \times C = \frac{\epsilon AR_L}{4\pi kd}, \quad (2)$$

其中 ϵ 为相对介电常数; A 为结电容面积; k 为静电力常数; d 为耗尽区宽度. 由于二维 TMDCs 材料 nm 级的厚度, 横向结构中结面积 A 非常小, 如果选用最常见的 50Ω 负载, τ_{RC} 经计算只有飞秒 (fs) 量级, 因此 τ_{RC} 基本不会限制 TMDCs 同质结的光电响应速度.

同质结内建电场由结区电势差 (V_{bi}) 产生, 因此器件的 τ_{Drift} 可以表示为

$$\tau_{Drift} = \frac{L}{\mu E} = \frac{L^2}{\mu V_{bi}}. \quad (3)$$

式中, L 为沟道长度; μ 为载流子迁移率; E 为内建电场强度. 同质结中最大内建电势取决于半导体的禁带宽度, 多层 TMDCs 的带隙在 1.1—1.3 eV 之间, 可以假设 V_{bi} 为 1 V, 计算得出 τ_{Drift} 约为纳秒 (ns) 量级.

$\tau_{Diffusion}$ 主要由未耗尽区域内产生的电子空穴对扩散进入空间电荷区的过程决定, 这一过程的时间通常可以表示为 [103]

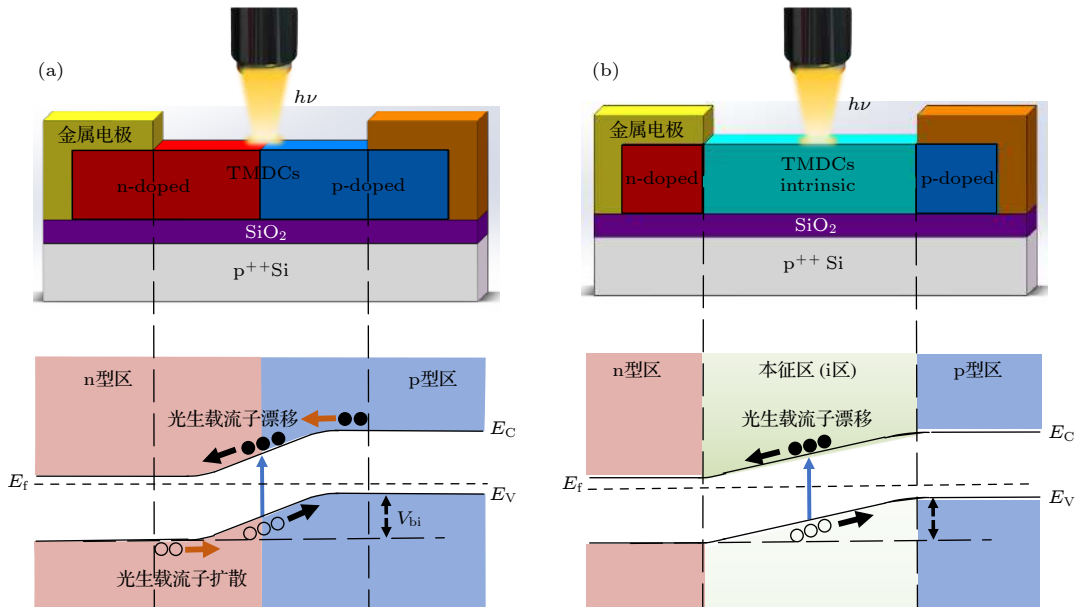


图 6 (a) 横向 p-n 结与 (b) 横向 p-i-n 结的器件结构与对应的光生载流子输运过程

Fig. 6. Device structures and corresponding photogenerated carrier transport processes for (a) lateral p-n junction and (b) lateral p-i-n junction.

$$\tau_{\text{Diffusion}} = \frac{x}{2.43D} = \frac{xq}{2.43k_0T\mu}, \quad (4)$$

其中 x 为扩散的距离; D 为扩散系数; q 为元电荷电量; k_0 为玻尔兹曼常数; T 为温度. 经计算, 即使 x 只有百纳米量级时, $\tau_{\text{Diffusion}}$ 也至少为 μs 量级.

可见对于常见的 TMDCs 同质结器件来说, $\tau_{\text{Diffusion}}$ 远大于 τ_{RC} 与 τ_{Drift} , 是决定器件响应速度的主要因素. 因此, 可以考虑通过器件结构的设计来避免光生载流子的扩散这一慢过程, 从而实现高带宽光电探测器. 图 6(b) 为我们设计的一种横向 p-i-n 器件的结构与光生载流子输运示意图. 与常规横向 p-n 同质结相比, 在此结构中, p 区和 n 区完全被金属电极覆盖不参与光吸收和光生载流子的产生, 热平衡状态下 i 区完全耗尽. 因此该结构可以显著抑制甚至避免未耗尽区域中光生载流子的扩散, 从而实现超快的光响应.

据此设计本课题组报道了一种基于横向 p-i-n 同质结的超快 WSe_2 光电二极管^[68]. 其中 p 区和 n 区分别由 O_2 和 Ar 等离子体处理产生的表面 WO_x 和 WSe_{2-y} 引起的电荷转移而形成, 并且被非对称金属电极所覆盖 (p 区: Pd/Au, n 区: Ti/Au) 以实现欧姆接触, 同时保持沟道区域 (i 区) 的本征状态. 图 7(a) 与图 7(b) 为器件光学图像和掺杂分布示意图. 这种二极管表现出了理想的整流性

能, 电流开/关比高达 1.2×10^6 , 理想因子为 1.14, 如图 7(c) 所示. 在光伏模式下工作时, 该二极管在 450 nm 光照下具有出色的光电探测性能, 包括 340 mV 的开路电压, 0.1 A/W 的响应度和 2.2×10^{13} Jones 的超高比检测率, 图 7(d) 显示了零偏和反向偏置 ($V_{\text{ds}} = -1$ V) 状态下器件光响应在不同光功率下的稳定性. 由于避免了光生载流子的扩散过程以及等离子处理引起的缺陷态对光生载流子的俘获/去俘获过程, 器件的响应速度达百纳秒量级 (264 ns), 对应 3 dB 带宽大于 1 MHz, 如图 7(e) 和图 7(f) 所示. 从表 1 中可以看出, 此 p-i-n 同质结与其他同质结相比在电学与光电特性上均有更加优异的表现.

5 总结与展望

本文主要总结了基于 TMDCs 同质结的光电探测器的研究现状, 并通过分析同质结器件中光生载流子的输运过程从器件结构层面提出了实现快速光响应的解决思路. 与常见的场效应晶体管型和异质结型光电探测器相比, 同质结器件在制备工艺和性能上更具优势. 通过电场调控、表面电荷转移等方法对载流子类型进行调控, 基于 TMDCs 同质结光电探测器已被广泛研究, 并且获得了出色的电

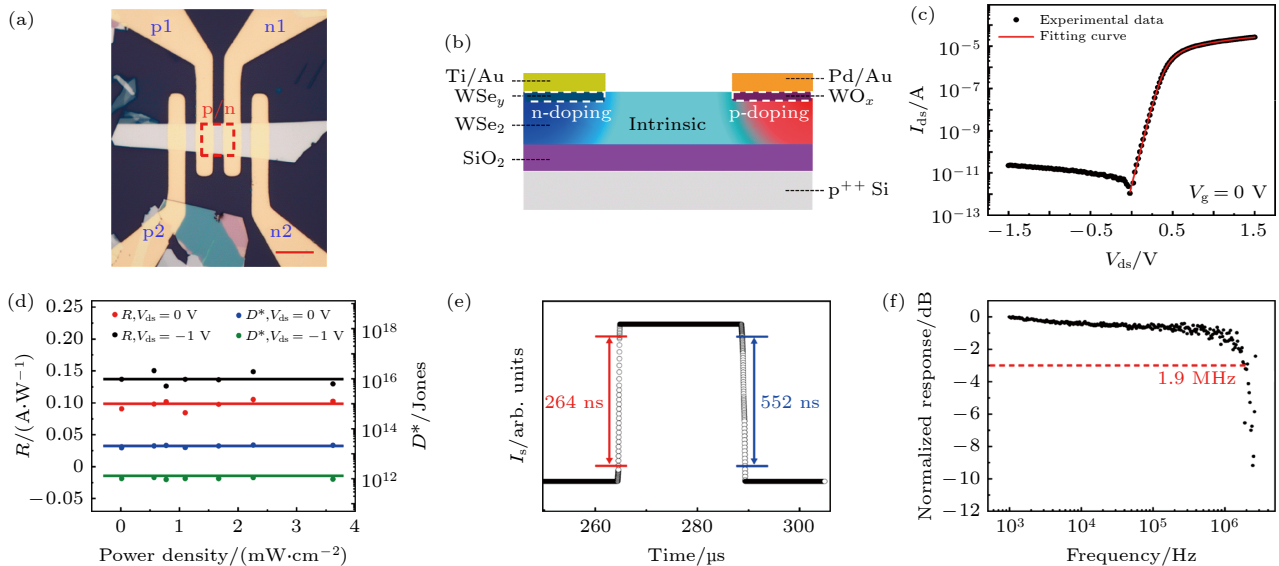


图 7 基于横向 p-i-n 同质结的超快 WSe_2 光电二极管 (a) 器件光学图像; (b) 掺杂分布的横截面示意图; (c) $V_{\text{ds}} = 1$ V 时的输出特性曲线; (d) 零偏和反向偏置状态下响应度和比探测率随入射光功率的变化; (e) 光电流响应时间; (f) p-i-n 光电二极管的带宽频率响应^[68]

Fig. 7. Ultrafast WSe_2 photodiode based on lateral p-i-n homojunction: (a) Optical image of the device; (b) cross-sectional schematic diagram of doping distribution; (c) output curve at $V_{\text{ds}} = 1$ V; (d) R and D^* as a function of incident light power density under zero bias and reverse bias; (e) the response time of photocurrent; (f) broadband frequency response of the p-i-n photodiode^[68].

学与光电性能, 如表 1 所列. 但这些器件仍存在工艺复杂、杂质引入、性能不稳定等一系列问题. 而响应速度慢是大部分器件存在的问题, 通过分析同质结器件中光电流的运输机制, 可以发现非耗尽区光生载流子的扩散是限制器件响应速度进一步提升的主要因素. 因此今后的研究可以从这一角度入手去进行器件结构的合理设计来实现性能更加优异的 TMDCs 同质结光电探测器. 另一方面, 光生载流子漂移过程的快慢受限于载流子迁移率, 因此, 提高 TMDCs 载流子迁移率是进一步提高 TMDCs 光电器件带宽的必由之路. 总之, 在对于基于 TMDCs 同质结的光电探测器的研究上, 一系列优秀的成果已经涌现, 但仍有诸多问题亟待解决. 我们期望在不远的未来 TMDCs 同质结光电探测器会有更多突破性进展.

参考文献

- [1] Koppens F H, Mueller T, Avouris P, Ferrari A C, Vitiello M S, Polini M 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 780
- [2] Xie C, Mak C, Tao X, Yan F 2017 *Adv. Funct. Mater.* **27** 1603886
- [3] Wang G, Zhang Y, You C, Liu B, Yang Y, Li H, Cui A, Liu D, Yan H 2018 *Infrared Phys. Technol.* **88** 149
- [4] Huo N, Konstantatos G 2018 *Adv. Mater.* **30** e1801164
- [5] Guo N, Xiao L, Gong F, Luo M, Wang F, Jia Y, Chang H, Liu J, Li Q, Wu Y, Wang Y, Shan C, Xu Y, Zhou P, Hu W 2020 *Adv. Sci.* **7** 1901637
- [6] Han J, He M, Yang M, Han Q, Wang F, Zhong F, Xu M, Li Q, Zhu H, Shan C, Hu W, Chen X, Wang X, Gou J, Wu Z, Wang J 2020 *Light-Sci. Appl.* **9** 167
- [7] Mak K F, Lee C, Hone J, Shan J, Heinz T F 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 136805
- [8] Wang Q H, Kalantar-Zadeh K, Kis A, Coleman J N, Strano M S 2012 *Nat. Nanotechnol.* **7** 699
- [9] Lee H S, Min S W, Chang Y G, Park M K, Nam T, Kim H, Kim J H, Ryu S, Im S 2012 *Nano Lett.* **12** 3695
- [10] Jin W, Yeh P C, Zaki N, Zhang D, Sadowski J T, Al-Mahboob A, van der Zande A M, Chenet D A, Dadap J I, Herman I P, Sutter P, Hone J, Osgood R M Jr 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 106801
- [11] Bernardi M, Palumbo M, Grossman J C 2013 *Nano Lett.* **13** 3664
- [12] Mak K F, Shan J 2016 *Nat. Photonics* **10** 216
- [13] Choi W, Choudhary N, Han G H, Park J, Akinwande D, Lee Y H 2017 *Mater. Today* **20** 116
- [14] Manzeli S, Ovchinnikov D, Pasquier D, Yazyev O V, Kis A 2017 *Nat. Rev. Mater.* **2** 17033
- [15] Lee Y H, Zhang X Q, Zhang W, Chang M T, Lin C T, Chang K D, Yu Y C, Wang J T, Chang C S, Li L J, Lin T W 2012 *Adv. Mater.* **24** 2320
- [16] Zhou H, Wang C, Shaw J C, Cheng R, Chen Y, Huang X, Liu Y, Weiss N O, Lin Z, Huang Y, Duan X 2015 *Nano Lett.* **15** 709
- [17] Lv R, Robinson J A, Schaak R E, Sun D, Sun Y, Mallouk T E, Terrones M 2015 *Acc. Chem. Res.* **48** 56
- [18] Shi Y, Li H, Li L J 2015 *Chem. Soc. Rev.* **44** 2744
- [19] Chen J Y, Liu L, Li C X, Xu J P 2019 *Chin. Phys. Lett.* **36** 037301
- [20] Chen Y, Wang Y, Wang Z, Gu Y, Ye Y, Chai X, Ye J, Chen Y, Xie R, Zhou Y, Hu Z, Li Q, Zhang L, Wang F, Wang P, Miao J, Wang J, Chen X, Lu W, Zhou P, Hu W 2021 *Nat. Electron.* **4** 357
- [21] Hu W, Ye Z, Liao L, Chen H, Chen L, Ding R, He L, Chen X, Lu W 2014 *Opt. Lett.* **39** 5184
- [22] Hu W D, Li Q, Chen X S, Lu W 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 120701 (in Chinese) [胡伟达, 李庆, 陈效双, 陆卫 2019 物理学报 **68** 120701]
- [23] Yin Z, Li H, Li H, Jiang L, Shi Y, Sun Y, Lu G, Zhang Q, Chen X, Zhang H 2012 *ACS Nano* **6** 74
- [24] Wu C C, Jariwala D, Sangwan V K, Marks T J, Hersam M C, Lauthon L J 2013 *J. Phys. Chem. Lett.* **4** 2508
- [25] Lopez-Sanchez O, Lembke D, Kayci M, Radenovic A, Kis A 2013 *Nat. Nanotechnol.* **8** 497
- [26] Wei X, Yan F G, Shen C, Lü Q S, Wang K Y 2017 *Chin. Phys. B* **26** 038504
- [27] Furchi M M, Pospischil A, Libisch F, Burgdörfer J, Mueller T 2014 *Nano Lett.* **14** 4785
- [28] Li M Y, Shi Y, Cheng C C, Lu L S, Lin Y C, Tang H L, Tsai M L, Chu C W, Wei K H, He J H, Chang W H, Suenaga K, Li L J 2015 *Science* **349** 524
- [29] Duan X, Wang C, Shaw J C, Cheng R, Chen Y, Li H, Wu X, Tang Y, Zhang Q, Pan A, Jiang J, Yu R, Huang Y, Duan X 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 1024
- [30] Cheng R, Li D, Zhou H, Wang C, Yin A, Jiang S, Liu Y, Chen Y, Huang Y, Duan X 2014 *Nano Lett.* **14** 5590
- [31] Esmaeili-Rad M R, Salahuddin S 2013 *Sci. Rep.* **3** 2345
- [32] Xu Z, Lin S, Li X, Zhang S, Wu Z, Xu W, Lu Y, Xu S 2016 *Nano Energy* **23** 89
- [33] He D, Pan Y, Nan H, Gu S, Yang Z, Wu B, Luo X, Xu B, Zhang Y, Li Y, Ni Z, Wang B, Zhu J, Chai Y, Shi Y, Wang X 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 183103
- [34] Deng Y, Luo Z, Conrad N J, Liu H, Gong Y, Najmaei S, Ajayan P M, Lou J, Xu X, Ye P D 2014 *ACS Nano* **8** 8292
- [35] Novoselov, K. S, Mishchenko, A., Carvalho, Ne to, Castro. A H 2016 *Science* **353** aac9439
- [36] Kang J, Tongay S, Zhou J, Li J, Wu J 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 012111
- [37] Yang Y, Huo N, Li J 2018 *J. Mater. Chem. C* **6** 11673
- [38] Baugher B W, Churchill H O, Yang Y, Jarillo-Herrero P 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 262
- [39] Ross J S, Klement P, Jones A M, Ghimire N J, Yan J, Mandrus D G, Taniguchi T, Watanabe K, Kitamura K, Yao W, Cobden D H, Xu X 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 268
- [40] Pospischil A, Furchi M M, Mueller T 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 257
- [41] Groenendijk D J, Buscema M, Steele G A, Michaelis de Vasconcelos S, Bratschitsch R, van der Zant H S, Castellanos-Gomez A 2014 *Nano Lett.* **14** 5846
- [42] Memaran S, Pradhan N R, Lu Z, Rhodes D, Ludwig J, Zhou Q, Ogunolu O, Ajayan P M, Smirnov D, Fernandez-Dominguez A I, Garcia-Vidal F J, Balicas L 2015 *Nano Lett.* **15** 7532
- [43] Wang Z, Wang F, Yin L, Huang Y, Xu K, Wang F, Zhan X, He J 2016 *Nanoscale* **8** 13245
- [44] Bie Y Q, Grosso G, Heuck M, Furchi M M, Cao Y, Zheng J, Bunandar D, Navarro-Moratalla E, Zhou L, Efetov D K, Taniguchi T, Watanabe K, Kong J, Englund D, Jarillo-

- Herrero P 2017 *Nat. Nanotechnol.* **12** 1124
- [45] Lee H S, Lim J Y, Yu S, Jeong Y, Park S, Oh K, Hong S, Yang S, Lee C H, Im S 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1900768
- [46] Lim J Y, Pezeshki A, Oh S, Kim J S, Lee Y T, Yu S, Hwang D K, Lee G H, Choi H J, Im S 2017 *Adv. Mater.* **29** 1701798
- [47] Wang X, Wang P, Wang J, Hu W, Zhou X, Guo N, Huang H, Sun S, Shen H, Lin T, Tang M, Liao L, Jiang A, Sun J, Meng X, Chen X, Lu W, Chu J 2015 *Adv. Mater.* **27** 6575
- [48] Zheng Y, Ni G X, Toh C T, Tan C Y, Yao K, Özyilmaz B 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 166602
- [49] Baeumer C, Rogers S P, Xu R, Martin L W, Shim M 2013 *Nano Lett.* **13** 1693
- [50] Baeumer C, Saldana-Greco D, Martinez J M P, Rappe A M, Shim M, Martin L W 2015 *Nat. Commun.* **6** 6136
- [51] Chen J W, Lo S T, Ho S C, Wong S S, Vu T H, Zhang X Q, Liu Y D, Chiou Y Y, Chen Y X, Yang J C, Chen Y C, Chu Y H, Lee Y H, Chung C J, Chen T M, Chen C H, Wu C L 2018 *Nat. Commun.* **9** 3143
- [52] Wu G, Wang X, Chen Y, Wu S, Wu B, Jiang Y, Shen H, Lin T, Liu Q, Wang X, Zhou P, Zhang S, Hu W, Meng X, Chu J, Wang J 2020 *Adv. Mater.* **32** e1907937
- [53] Wu G, Tian B, Liu L, Lv W, Wu S, Wang X, Chen Y, Li J, Wang Z, Wu S, Shen H, Lin T, Zhou P, Liu Q, Duan C, Zhang S, Meng X, Wu S, Hu W, Wang X, Chu J, Wang J 2020 *Nat. Electron.* **3** 43
- [54] Lü L, Zhuge F, Xie F, Xiong X, Zhang Q, Zhang N, Huang Y, Zhai T 2019 *Nat. Commun.* **10** 3331
- [55] Liu T, Xiang D, Zheng Y, Wang Y, Wang X, Wang L, He J, Liu L, Chen W 2018 *Adv. Mater.* **30** e1804470
- [56] Wu E, Xie Y, Zhang J, Zhang H, Hu X, Liu J, Zhou C, Zhang D 2019 *Sci. Adv.* **5** eaav3430
- [57] Wu E, Xie Y, Wang S, Zhang D, Hu X, Liu J 2020 *Nano Res.* **13** 3445
- [58] Choi M S, Qu D, Lee D, Liu X, Watanabe K, Taniguchi T, Yoo W J 2014 *ACS Nano* **8** 9332
- [59] Li H M, Lee D, Qu D, Liu X, Ryu J, Seabaugh A, Yoo W J 2015 *Nat. Commun.* **6** 6564
- [60] Sun M, Xie D, Sun Y, Li W, Ren T 2018 *Nanotechnology* **29** 015203
- [61] Fan S, Shen W, An C, Sun Z, Wu S, Xu L, Sun D, Hu X, Zhang D, Liu J 2018 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10** 26533
- [62] Jo S H, Kang D H, Shim J, Jeon J, Jeon M H, Yoo G, Kim J, Lee J, Yeom G Y, Lee S, Yu H Y, Choi C, Park J H 2016 *Adv. Mater.* **28** 4824
- [63] Tang Y, Wang Z, Wang P, Wu F, Wang Y, Chen Y, Wang H, Peng M, Shan C, Zhu Z, Qin S, Hu W 2019 *Small* **15** e1805545
- [64] Sun J, Wang Y, Guo S, Wan B, Dong L, Gu Y, Song C, Pan C, Zhang Q, Gu L, Pan F, Zhang J 2020 *Adv. Mater.* **32** e1906499
- [65] Wi S, Kim H, Chen M, Nam H, Guo L J, Meyhofer E, Liang X 2014 *ACS Nano* **8** 5270
- [66] Xie Y, Wu E, Hu R, Qian S, Feng Z, Chen X, Zhang H, Xu L, Hu X, Liu J, Zhang D 2018 *Nanoscale* **10** 12436
- [67] Mitta S B, Ali F, Yang Z, Moon I, Ahmed F, Yoo T J, Lee B H, Yoo W J 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 23261
- [68] Zhang Y, Ma K, Zhao C, Hong W, Nie C, Qiu Z J, Wang S 2021 *ACS Nano* **15** 4405
- [69] Chen J, Wang Q, Sheng Y, Cao G, Yang P, Shan Y, Liao F, Muhammad Z, Bao W, Hu L, Liu R, Cong C, Qiu Z J 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** 43330
- [70] Aftab S, Khan M F, Gautam P, Noh H, Eom J 2019 *Nanoscale* **11** 9518
- [71] Aftab S, Samiya, Rabia, Yousuf S, Khan M U, Khawar R, Younus A, Manzoor M, Iqbal M W, Iqbal M Z 2020 *Nanoscale* **12** 15687
- [72] Zhang M L, Zou X M, Liu X Q 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 118501
- [73] Shin H J, Choi W M, Choi D, Han G H, Yoon S M, Park H K, Kim S W, Jin Y W, Lee S Y, Kim J M, Choi J Y, Lee Y H 2010 *J. Am. Chem. Soc.* **132** 15603
- [74] Tosun M, Chan L, Amani M, Roy T, Ahn G H, Taheri P, Carraro C, Ager J W, Maboudian R, Javey A 2016 *ACS Nano* **10** 6853
- [75] Jin Z, Cai Z, Chen X, Wei D 2018 *Nano Res.* **11** 4923
- [76] Pudasaini P R, Oyedele A, Zhang C, Stanford M G, Cross N, Wong A T, Hoffinan A N, Xiao K, Duscher G, Mandrus D G, Ward T Z, Rack P D 2017 *Nano Res.* **11** 722
- [77] Kang W M, Lee S, Cho I T, Park T H, Shin H, Hwang C S, Lee C, Park B G, Lee J H 2018 *Solid-State Electron.* **140** 2
- [78] Bolshakov P, Smyth C M, Khosravi A, Zhao P, Hurley P K, Hinkle C L, Wallace R M, Young C D 2019 *ACS Appl. Electron. Mater.* **1** 210
- [79] Hoffinan A N, Stanford M G, Sales M G, Zhang C, Ivanov I N, McDonnell S J, Mandrus D G, Rack P D 2019 *2D Mater.* **6** 045024
- [80] Singh A K, Andleeb S, Singh J, Dung H T, Seo Y, Eom J 2014 *Adv. Funct. Mater.* **24** 7125
- [81] Iqbal M W, Iqbal M Z, Khan M F, Shehzad M A, Seo Y, Eom J 2015 *Nanoscale* **7** 747
- [82] Wang S Y, Ko T S, Huang C C, Lin D Y, Huang Y S 2014 *Jpn. J. Appl. Phys.* **53** 04EH07
- [83] Suh J, Park T E, Lin D Y, Fu D, Park J, Jung H J, Chen Y, Ko C, Jang C, Sun Y, Sinclair R, Chang J, Tongay S, Wu J 2014 *Nano Lett.* **14** 6976
- [84] Nipane A, Karmakar D, Kaushik N, Karande S, Lodha S 2016 *ACS Nano* **10** 2128
- [85] Jin Y, Keum D H, An S J, Kim J, Lee H S, Lee Y H 2015 *Adv. Mater.* **27** 5534
- [86] Svatek S A, Antolin E, Lin D-Y, Frisenda R, Reuter C, Molina-Mendoza A J, Muñoz M, Agraït N, Ko T-S, de Lara D P, Castellanos-Gomez A 2017 *J. Mater. Chem. C* **5** 854
- [87] Noh J Y, Kim H, Kim Y S 2014 *Phys. Rev. B* **89** 205417
- [88] Haldar S, Vovusha H, Yadav M K, Eriksson O, Sanyal B 2015 *Phys. Rev. B* **92** 235408
- [89] Qiu H, Xu T, Wang Z, Ren W, Nan H, Ni Z, Chen Q, Yuan S, Miao F, Song F, Long G, Shi Y, Sun L, Wang J, Wang X 2013 *Nat. Commun.* **4** 2642
- [90] Cui Z, Ke X, Li E, Wang X, Ding Y, Liu T, Li M, Zhao B 2018 *Opt. Quantum. Electron.* **50** 1
- [91] Zhang X, Liao Q, Liu S, Kang Z, Zhang Z, Du J, Li F, Zhang S, Xiao J, Liu B, Ou Y, Liu X, Gu L, Zhang Y 2017 *Nat. Commun.* **8** 15881
- [92] Zhang X, Liao Q, Kang Z, Liu B, Ou Y, Du J, Xiao J, Gao L, Shan H, Luo Y, Fang Z, Wang P, Sun Z, Zhang Z, Zhang Y 2019 *ACS Nano* **13** 3280
- [93] Sun M, Xie D, Sun Y, Li W, Teng C, Xu J 2017 *Sci. Rep.* **7** 4505
- [94] Lu J, Lu J H, Liu H, Liu B, Chan K X, Lin J, Chen W, Loh K P, Sow C H 2014 *ACS Nano* **8** 6334
- [95] Xu Z-Q, Zhang Y, Wang Z, Shen Y, Huang W, Xia X, Yu W, Xue Y, Sun L, Zheng C, Lu Y, Liao L, Bao Q 2016 *2D Mater.* **3** 041001
- [96] He Y, Sobhani A, Lei S, Zhang Z, Gong Y, Jin Z, Zhou W, Yang Y, Zhang Y, Wang X, Yakobson B, Vajtai R, Halas N

- J, Li B, Xie E, Ajayan P 2016 *Adv. Mater.* **28** 5126
- [97] Kim K S, Ji Y J, Kim K H, Choi S, Kang D H, Heo K, Cho S, Yim S, Lee S, Park J H, Jung Y S, Yeom G Y 2019 *Nat. Commun.* **10** 4701
- [98] Tan C, Wang H, Zhu X, Gao W, Li H, Chen J, Li G, Chen L, Xu J, Hu X, Li L, Zhai T 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 44934
- [99] Wang Z, Chen Y, Wu P, Ye J, Peng M, Yan Y, Zhong F, He T, Wang Y, Xu M, Zhang K, Hu Z, Li Q, Zhang L, Wang F, Wang P 2020 *Infrared Phys. Technol.* **106** 103272
- [100] Fang H, Hu W 2017 *Adv. Sci.* **4** 1700323
- [101] Jiang J, Ling C, Xu T, Wang W, Niu X, Zafar A, Yan Z, Wang X, You Y, Sun L, Lu J, Wang J, Ni Z 2018 *Adv. Mater.* **30** 1804332
- [102] Hu Z, Wu Z, Han C, He J, Ni Z, Chen W 2018 *Chem. Soc. Rev.* **47** 3100
- [103] Lucovsky G, Emmons R B 1965 *Appl. Opt.* **4** 697

YOUNG SCIENTISTS' FORUM

Photodetectors based on homojunctions of transition metal dichalcogenides*

Shu Yan-Tao¹⁾ Zhang You-Wei^{1)2)†} Wang Shun¹⁾²⁾

1) (Hubei Key Laboratory of Gravitation and Quantum Physics, MOE Key Laboratory of Fundamental Physical Quantities Measurement, National Precise Gravity Measurement Facility, School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

2) (Shenzhen Huazhong University of Science and Technology Research Institute, Shenzhen 518057, China)

(Received 7 May 2021; revised manuscript received 10 June 2021)

Abstract

In recent years, two-dimensional transition metal chalcogenides (TMDCs) have been widely studied in the field of photodetection due to their excellent electronic and optical properties. Compared with the more reported field-effect transistor and heterojunction devices, homojunction devices have unique advantages in photodetection. This article focuses on the researches of photodetectors based on the homojunctions of TMDCs. First, the working principle of homojunction optoelectronic device is introduced. Then, the reported TMDCs based homojunctions are classified and summarized according to the adopted carrier modulation techniques. In addition, this article also specifically analyzes the transport process of photogenerated carriers in homojunction device, and explains why the lateral p-i-n homojunction exhibits fast photoresponse speed. Finally, the research progress of the TMDCs based homojunction photodetectors is summarized and the future development is also prospected.

Keywords: photodetector, transition metal dichalcogenides, homojunction, photovoltaic effect

PACS: 73.40.Lq, 85.60.Gz, 73.50.Pz, 73.63.-b

DOI: 10.7498/aps.70.20210859

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12074134), the Shenzhen Science and Technology Project, China (Grant Nos. JCYJ20180507183904841, GJHZ20200731095203009), and the Natural Science Foundation of Hubei Province, China (Grant No. 2020CFB406).

† Corresponding author. E-mail: youweizhang@hust.edu.cn