

MoS₂/MoTe₂ 垂直异质结的电荷传输及其调制*

温恒迪^{1) #} 刘跃^{1) #} 甄良^{1) 2) 3)} 李洋^{1) 3) †} 徐成彦^{1) 2) ‡}

1) (哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

2) (哈尔滨工业大学(深圳), 索维奇智能新材料实验室(诺贝尔奖科学家实验室), 深圳 518055)

3) (哈尔滨工业大学, 微系统与微结构制造教育部重点实验室, 哈尔滨 150080)

(2022 年 9 月 9 日收到; 2022 年 9 月 29 日收到修改稿)

二维材料异质结器件具有纳米级厚度及范德瓦耳斯接触表面, 因而表现出独特的光电特性. 本文构建了栅压可调的 MoS₂/MoTe₂ 垂直异质结器件, 利用开尔文探针力显微镜 (KPFM) 技术结合电输运测量, 揭示了 MoS₂/MoTe₂ 异质结分别在黑暗和 532 nm 激光照射条件下的电荷输运行为, 发现随着栅压的变化异质结表现出从 n-n⁺ 结到 p-n 结的反双极性特征. 系统地解释了 MoS₂/MoTe₂ 异质结的电荷输运机制, 包括 n-n⁺ 结和 p-n 结在正偏和反偏下条件下的电荷输运过程、随栅压变化而发生的转变的结区行为、接触势垒对电荷输运的影响、n-n⁺ 结和 p-n 结具有不同整流特征的原因、偏压对带间隧穿的重要作用及光生载流子对电学输运行为的影响等. 本文所使用的方法可推广到其他二维异质结体系, 为提高二维半导体器件性能及其应用提供了重要的参考和借鉴.

关键词: 二维过渡金属硫族化合物异质结, 电荷传输机制, 能带结构, 开尔文探针力显微镜**PACS:** 61.82.Fk, 73.40.Lq, 85.30.-z**DOI:** 10.7498/aps.72.20221768

1 引言

自 2004 年曼彻斯特大学的 Geim 和 Novoselov 等^[1]成功剥离出单层的石墨烯以来, 过渡金属硫族化合物 (TMD)^[2]、黑磷^[3]、BN^[4]、二维半金属^[5]、二维单元材料 P、Si、B^[6] 等二维材料相继出现. 二维材料是指不同原子层间通过范德瓦耳斯力结合的层状结构材料, 具有不同于块体材料的优异性质^[7].

TMD 作为具有独特物理和化学性能的多晶型结构二维材料, 覆盖了从超导、半导体到半金属和拓扑绝缘体^[8,9], 具有超导性、铁电性、铁电磁、催

化性等新颖的物理特性, 能够应用于场效应晶体管、存储器和电催化制氢等^[10–13]. 二维材料的出现不仅为硅锗等传统半导体提供了丰富的替代品, 还满足了科研人员搭建各类半导体器件、实现各类逻辑功能及探究各类新奇量子现象的物理机制等的想法^[14]. 受启发于传统半导体工业制造各类器件的方法, 二维范德瓦耳斯异质结构受到广泛关注. 它们制备简单, 具有层间悬挂键的晶格结构, 可以综合多种材料的优点, 也可以在原子尺寸上实现对电子、激子、声子和光子等的产生和输运进行控制和利用, 进而成为探究物理机制的理想体系^[15]. 二维范德瓦耳斯器件在发光二极管^[16]、光伏器件^[17]、光电探测^[18]、量子阱^[19]和逻辑器件^[20]等领域具有

* 国家自然科学基金 (批准号: 51772064, 51902069)、黑龙江省自然科学基金 (批准号: YQ2021E019) 和深圳市科学技术项目 (批准号: RCJC20210706091950025) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: liyang2018@hit.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: cy_xu@hit.edu.cn

广泛的应用。

二维材料由于其纳米级厚度以及范德瓦耳斯接触表面而存在不同于体材料的电荷输运机制^[21], 但是目前得到的结论大多是通过宏观的表征手段^[22,23]. 材料的宏观响应是微观上大范围的平均值, 宏观的检测手段对于载流子在输运过程中的电势分布及物理机制缺乏明确的解析. 开尔文探针力显微镜 (KPFM) 作为一种先进的设备, 能量分辨率可达到 5 meV, 空间分辨率可达到 25 nm, 可以反映材料费米能级的位置和能态密度等能带结构的信息^[24]. 本课题利用 KPFM 对能带结构进行直观的表征, 结合电学和光电性能测试从微观上揭示载流子在输运过程中的电势分布及物理机制.

2 实验

2.1 MoS₂/MoTe₂ 异质结的构筑

采用机械剥离的方法制备薄层 MoTe₂ 和 MoS₂ 样品, 通过铜网掩模镀金的方法在 O² 等离子体处理过的硅片表面蒸镀厚度为 3/30 nm 的 Cr/Au 电极, 其中 Cr 作为黏结层增加 Au 电极与基底的黏

附力. 然后通过干法转移将两种样品依次转移到带有金电极的硅片上, 构筑出 MoS₂/MoTe₂ 垂直异质结器件. 之后在 Ar 气氛中对器件进行退火处理, 消除材料表面的静电, 增强异质结界面间的结合力.

2.2 表征与测试

使用光学显微镜 (Zeiss Axio Imager)、拉曼光谱仪 (Renishaw in Via-Reflex) 以及开尔文探针力显微镜 (Bruker Dimension Icon) 对样品形貌, 结构及表面电势分布进行表征. 电学和光电测试使用半导体测试分析仪 (Keithley 4200) 以及探针台 (Lakeshore) 进行, 激光波长选择 532 nm.

3 结果及讨论

通过机械剥离及干法转移构筑了 MoS₂/MoTe₂ 异质结场效应晶体管 (FET), 图 1(a) 和图 1(b) 分别为 FET 的示意图和光学图像, 其中底部为 MoTe₂, 顶部为 MoS₂, MoS₂ 与源极相连, MoTe₂ 与漏极相连. 根据图 1(c) 中的拉曼光谱可以看出实验所用的 MoS₂ 以及 MoTe₂ 的拉曼特征峰与文献^[25, 26]

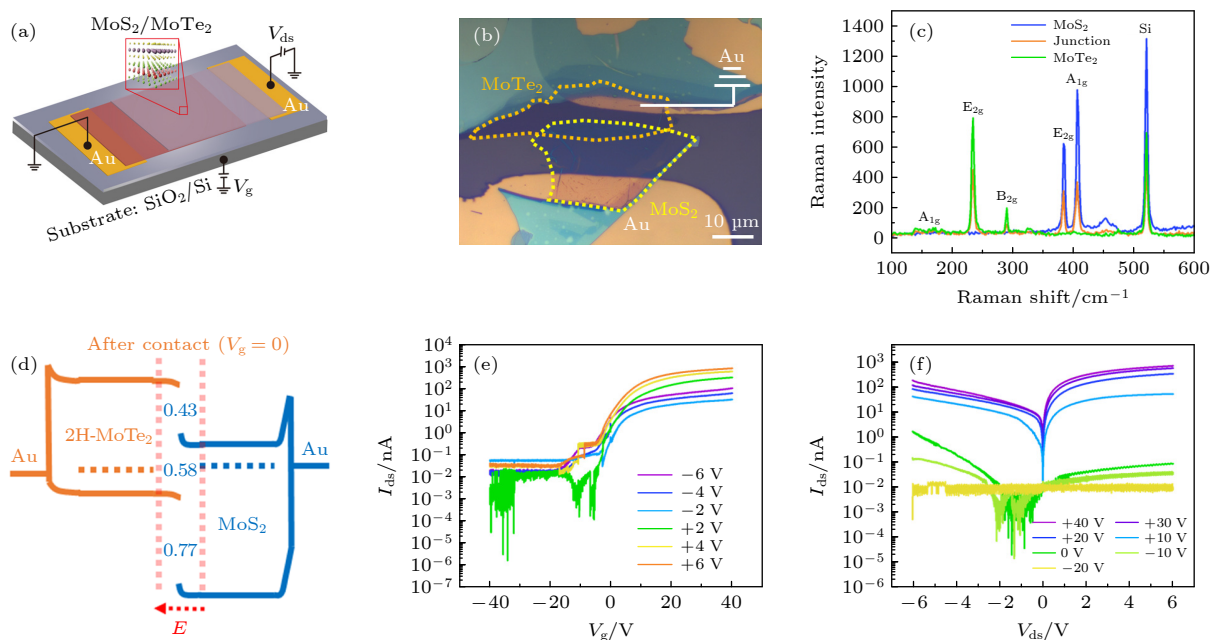


图 1 MoS₂/MoTe₂ 异质结器件及其电学性质 (a) MoS₂/MoTe₂ 异质结器件的示意图; (b) MoS₂/MoTe₂ 异质结器件的光学图像; (c) MoS₂/MoTe₂ 异质结的拉曼光谱; (d) MoS₂/MoTe₂ 异质结的能带结构; (e) MoS₂/MoTe₂ 异质结器件转移曲线; (f) MoS₂/MoTe₂ 异质结器件输出曲线

Fig. 1. MoS₂/MoTe₂ heterojunction devices and its electrical properties: (a) Diagrammatic sketch of MoS₂/MoTe₂ heterojunction device; (b) optical image of the MoTe₂/MoS₂ heterostructure device; (c) Raman spectra of MoTe₂/MoS₂ heterojunction; (d) band structure of the MoTe₂/MoS₂ heterojunction; (e) transfer curves of MoS₂/MoTe₂ heterojunction device; (f) output curves of MoS₂/MoTe₂ heterojunction device.

中的一致. 图 1(d) 为异质结的能带结构^[20], 由于两种材料之间费米能级存在差异, MoTe₂ 的电子流向 MoS₂, 能带发生弯曲, 内建电场方向指向 MoTe₂. 对 FET 进行电学性能测试, 图 1(e) 为不同源漏电压下的转移曲线 (V_g - I_{ds}), 图 1(f) 为不同栅极电压下的输出曲线 (V_{ds} - I_{ds}), 其中 I_{ds} 为源漏电流, V_{ds} 为源漏电压, V_g 为栅极电压. 转移曲线和输出曲线表明该 FET 具有近 n 型微弱的反双极性特征. 当 V_g 远远大于 0 V 时表现为 n-n⁺ 结, 整流比小于 10. 当栅极电压小于 -8 V 时, 表现为 p-n 结, 整流比接近 100.

使用波长为 532 nm 的激光照射 FET 并测量光电性质, 激光功率分别为 600, 800, 1017, 1850 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. 不同激光功率下的转移和输出曲线如图 2(a)–(d) 所示, 可以看出, 在激光照射下 FET 的反双极性特征更加明显. 当栅极电压远远大于 0 V 时, 表现为 n-n⁺ 结, 正偏下的光响应较小. 当栅极电压远远小于 0 V 时, 表现为 p-n 结, 相比于反偏, 正偏下光响应较小. 栅压可调的电学性质可以通过如图 2(e) 所示的能带结构^[27] 解释, 当栅极电压远远大于 0 V 时, 电子注入导致 MoTe₂ 变为 n 型半导体, 因此形成 n-n⁺ 结, 此时内

建电场方向指向 MoS₂. 当栅极电压远远小于 0 V 时, 空穴注入导致 MoTe₂ 变为 p 型半导体, MoS₂ 为弱 n 型半导体, 由此形成 p-n 结, 内建电场方向指向 MoTe₂.

将 MoS₂/MoTe₂ 异质结 FET 用银浆固定在印制电路 (PCB) 板上并用铜线与电极相连, 使用 KPFM 对异质结区域的表面电势分布进行表征, 图 3(a) 为 KPFM 的原理示意图, 尖端以恒定高度扫描样品, 交流电压被施加到悬臂梁上, 在针尖和样品之间产生一个振荡的静电力. 然后施加直流电压使电势为零, 从而阻止悬臂梁振荡. 所施加的直流电压映射为针尖和样品之间接触电势差的测量值. 异质结区域的原子力显微镜 (AFM) 图像如图 3(b) 所示, 根据图 1(b) 中异质结的光学照片可以将 AFM 图像划分出 3 个不同的区域, 从左到右分别为 MoTe₂ 区域、MoS₂/MoTe₂ 结区、MoS₂ 区域, 可以看出 MoTe₂ 厚度为 4 nm, MoS₂ 厚度为 2 nm, MoS₂/MoTe₂ 结区表面较为平整, 图中蓝色虚线为后续表面电势的数据采集线.

当偏压 $V_{ds} = +2$ V 时, 表面电势分布如图 3(c) 所示, 取每一条数据采集线的最大值为 1, 最小值为 0 进行归一化处理得到图 4(a), 其中横轴为数据

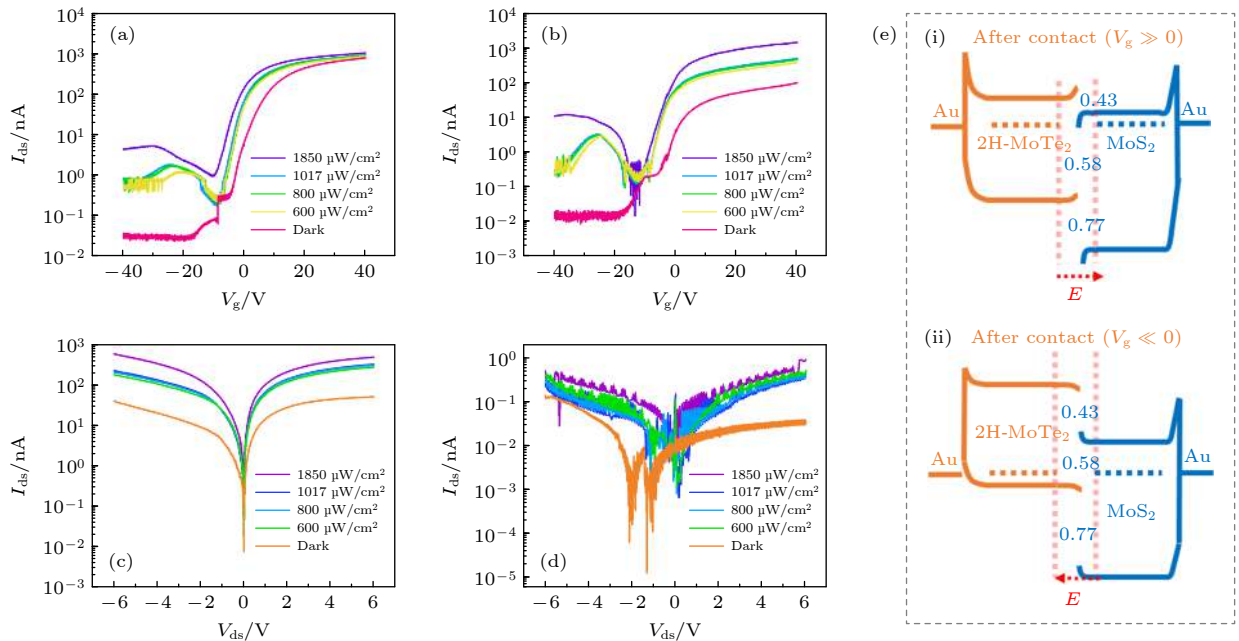


图 2 MoS₂/MoTe₂ 异质结器件的电学特性 (a) $V_{ds} = -6$ V 时不同功率下的转移曲线; (b) $V_{ds} = +6$ V 时不同功率下的转移曲线; (c) $V_g = +40$ V 时不同功率下的输出曲线; (d) $V_g = -10$ V 时不同功率下的输出曲线; (e) 在 $V_g \gg 0$ 和 $V_g \ll 0$ 条件下, MoS₂/MoTe₂ 异质结的能带结构

Fig. 2. Electrical characteristics of MoTe₂/MoS₂ heterojunction device: (a) Power intensity-dependent I_{ds} - V_g curves, $V_{ds} = -6$ V; (b) power intensity-dependent I_{ds} - V_g curves, $V_{ds} = +6$ V; (c) power intensity-dependent I_{ds} - V_{ds} curves, $V_g = +40$ V; (d) power intensity-dependent I_{ds} - V_{ds} , $V_g = -10$ V; (e) band structure of MoTe₂/MoS₂ heterojunction at $V_g \gg 0$ and $V_g \ll 0$.

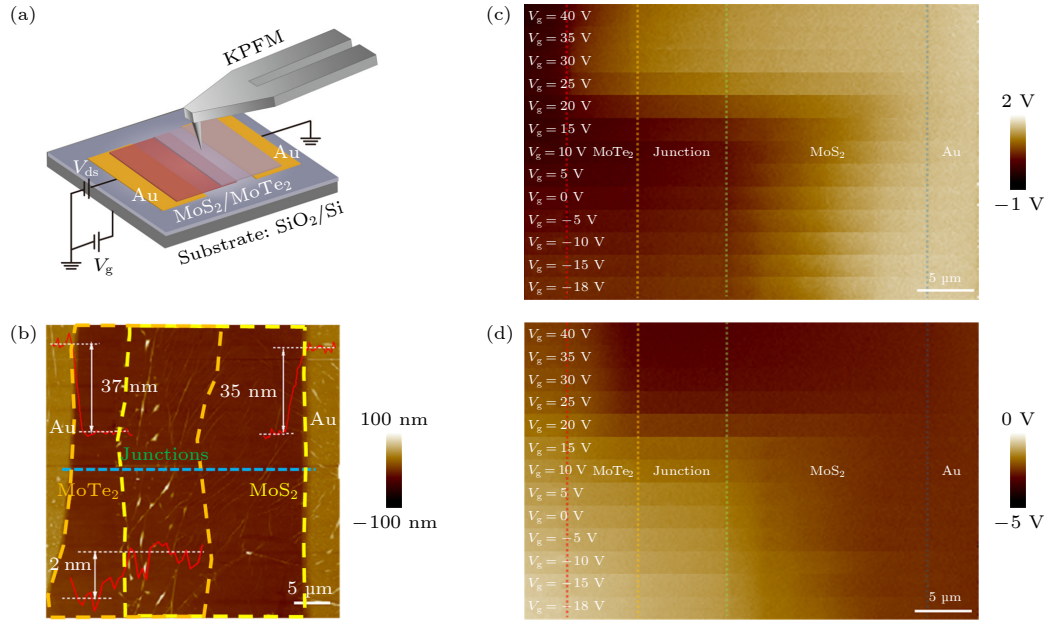


图 3 $\text{MoS}_2/\text{MoTe}_2$ 异质结器件的表面电势分布 (a) KPFM 原理示意图; (b) $\text{MoS}_2/\text{MoTe}_2$ 异质结的 AFM 图像; (c) $V_{\text{ds}} = +2 \text{ V}$ 时异质结器件的表面电势分布; (d) $V_{\text{ds}} = -2 \text{ V}$ 时异质结器件的表面电势分布

Fig. 3. Surface potential distribution of $\text{MoS}_2/\text{MoTe}_2$ heterojunction devices: (a) Schematic diagram of KPFM; (b) AFM image of $\text{MoS}_2/\text{MoTe}_2$ heterojunction; (c) surface potential distribution of heterojunction device, $V_{\text{ds}} = +2 \text{ V}$; (d) surface potential distribution of heterojunction device, $V_{\text{ds}} = -2 \text{ V}$.

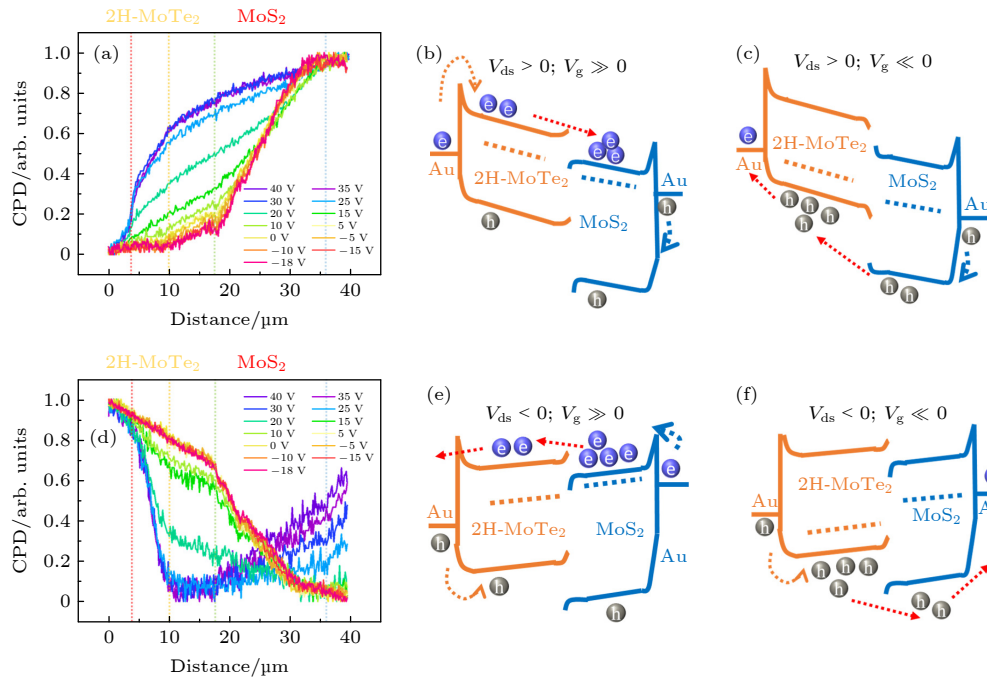


图 4 $\text{MoTe}_2/\text{MoS}_2$ 异质结器件的表面电势分布及其物理机理 (a) $V_{\text{ds}} = +2 \text{ V}$ 时的表面电势归一化数据; (b), (c) $V_{\text{ds}} > 0$ 时的能带结构; (d) $V_{\text{ds}} = -2 \text{ V}$ 时的表面电势归一化数据; (e), (f) $V_{\text{ds}} < 0$ 时的能带结构

Fig. 4. Surface potential distribution of vertical $\text{MoTe}_2/\text{MoS}_2$ heterojunction device and its physical mechanism: (a) Surface potential normalized profiles of heterojunction, $V_{\text{ds}} = +2 \text{ V}$; (b), (c) band structure of heterojunction, $V_{\text{ds}} > 0$; (d) surface potential normalized profiles of heterojunction, $V_{\text{ds}} = -2 \text{ V}$; (e), (f) band structure of heterojunction, $V_{\text{ds}} < 0$.

采集线的横向位置, 纵轴为针尖与样品的接触电势差 (CPD). 当 V_{g} 远远大于 0 V 时, 在 MoTe_2 与电

极交界处的肖特基势垒导致表面电势发生明显突变, MoS_2 和结区之间没有电势斜率的突变, 只是

局部载流子浓度存在差异, 结区行为和 MoS_2 趋于一致. 压降在 MoTe_2 区域略大于在 MoS_2 和结区. 随着 V_g 逐渐降低, 肖特基势垒处的电势突变逐渐减小, 这是因为 MoTe_2 空穴浓度显著增加, 而结区空穴浓度增加量小于 MoTe_2 区域, MoS_2 区域电子浓度显著减小 [27]. 最终结区行为与 MoTe_2 区域趋于一致, 发生了从 $n\text{-}n^+$ 结向 $p\text{-}n$ 结的转变.

改变 V_{ds} 施加电压的方向使得异质结处于 $V_{ds} = -2\text{ V}$, 异质结区域的表面电势的分布如图 3(d) 所示, 归一化处理后得到如图 4(d) 所示的表面电势随位置的变化曲线. 当 V_g 远大于 0 V 时, 电势降主要集中在 MoTe_2 区域, 结区和 MoS_2 的电势基本一致. 在 MoTe_2 与电极交界处及 MoTe_2 与结区交界处的电势斜率均发生突变, 这说明界面

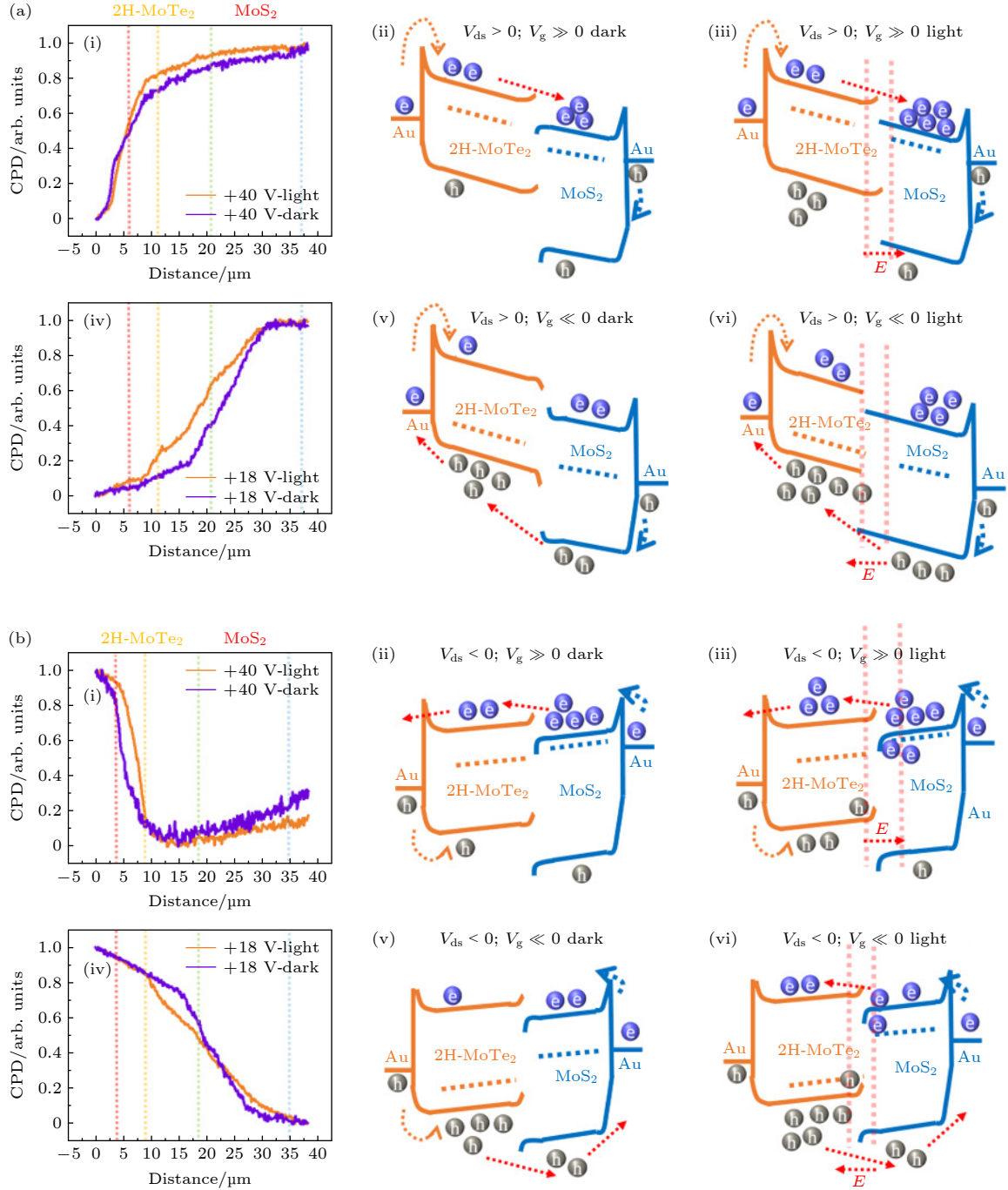


图 5 光照前后 $\text{MoTe}_2/\text{MoS}_2$ 异质结器件的表面电位分布及机理 (a) $V_{ds} = +2\text{ V}$; (b) $V_{ds} = -2\text{ V}$

Fig. 5. Surface potential distribution of $\text{MoTe}_2/\text{MoS}_2$ heterojunction device and its physical mechanism before and after illumination: (a) $V_{ds} = +2\text{ V}$; (b) $V_{ds} = -2\text{ V}$.

处存在势垒, 整体上表现为 $n-n^+$ 结. 随着 V_g 的逐渐降低, MoTe_2 区域的电势降减小, MoS_2 和结区的电势降增大, 随着表面电势斜率突变点从结区与 MoTe_2 的交界处转移到结区与 MoS_2 的交界处, 异质结由 $n-n^+$ 结向 $p-n$ 结转变.

电荷在异质结中的输运机理如图 4(b), (c), (e), (f) 所示, 当 $V_{ds} > 0$ V 时, 电子从 MoTe_2 处注入, 空穴从 MoS_2 处注入. 当 $V_g \gg 0$ V 时, 二者均为 n 型半导体, 材料为正偏, 金的费米能级与 MoTe_2 的导带相差较远, 它们之间会有较大的肖特基势垒, 而金与 MoS_2 的价带相差较近, 空穴注入 MoS_2 较容易, 在注入之后由于 MoS_2 的价带低于 MoTe_2 的价带, 空穴转移到 MoTe_2 区域, 且 MoTe_2 导带高于 MoS_2 导带, 电子注入 MoS_2 中. 随着 V_g 的降低, MoTe_2 中空穴浓度显著增大, 材料变为 $p-n$ 结且为反偏, 电子注入的肖特基势垒也会降低, MoS_2 中载流子浓度减小, 压降主要集中在 MoS_2 区域.

当 $V_{ds} < 0$ 时, 电子从 MoS_2 处注入, 空穴从 MoTe_2 处注入. 当 $V_g \gg 0$ V 时, 材料为 $n-n^+$ 结且为反偏, 在 MoTe_2 中空穴为少数载流子, 在 MoS_2 和电极交界处由于肖特基势垒较小且电子为多数载流子, 注入的难度较小. MoS_2 费米能级更靠近导带, 电子浓度较高, 结区导带位置倾向于能级较低的 MoS_2 导带, 在其交界处形成一个导带势垒. 随着 V_g 的逐渐降低, MoTe_2 中空穴浓度逐渐增多变为多数载流子, 而在 MoS_2 区域电子浓度减小. 材料变为 $p-n$ 结且为正偏.

利用 KPFM 对激光照射下的异质结表面电势分布进行表征, 得到光照条件 (Light) 和黑暗条件 (Dark) 下的表面电势分布归一化结果如图 5 所示, 其中 -18 V 和 $+40$ V 为栅极电压 V_g 的值, 分别对应 $V_g \ll 0$ 和 $V_g \gg 0$ 的情况. 从图中可以看出当 $V_{ds} > 0$ 且 $V_g \gg 0$ 时, 材料为 $n-n^+$ 结, 且为正偏. 光照条件下 MoS_2 和结区的表面电势的差异减小, 这是因为光生载流子在 V_{ds} 的作用下发生分离, MoS_2 区域费米能级上升, 结区和 MoS_2 之间没有显著的势垒差. 当 $V_{ds} > 0$ 且 $V_g \ll 0$ 时, 材料为 $p-n$ 结, 且为反偏, 斜率突变点从结区与 MoS_2 交界处变为与 MoTe_2 交界处, 这是因为光生载流子在结区分离导致 MoTe_2 和 MoS_2 费米能级之间差减小.

当 $V_{ds} < 0$ 且 $V_g \gg 0$ 时, 材料为 $n-n^+$ 结, 且为反偏. 光照条件下 MoS_2 和结区的表面电势的差异减小, 光生载流子在结区聚集导致 MoS_2 费米能级

上升. MoTe_2 和 MoS_2 交界处靠近 MoS_2 侧的高浓度电子分布在更大的范围内, MoS_2 和结区内部载流子浓度差异减小. 当 $V_{ds} < 0$ 且 $V_g \ll 0$ 时, 材料为 $p-n$ 结, 且为正偏. 斜率突变点由结区与 MoS_2 交界处变为与 MoTe_2 交界处. 结区行为由与 MoTe_2 一致变为与 MoS_2 一致. 这是因为光生载流子使得沟道内的载流子浓度升高. 光生载流子的聚集导致结区两侧费米能级之间差值增大, 结区附近载流子浓度很高. 两材料间导带和价带的能级差不变使得 MoTe_2 中空穴扩散的势垒增大. 结区附近高浓度的载流子发生复合.

4 结 论

本文利用机械剥离和干法转移的方法搭建了 $\text{MoS}_2/\text{MoTe}_2$ 异质结, 并对其电学和光电性质进行了表征. 在此基础上, 利用开尔文探针力显微镜表征了材料在加光前后, 不同栅压和偏压作用下的表面电势分布并绘制了各类情况的能带图. 结果表明, 光照前异质结为微弱的反双极性, 随着栅压的逐渐减小, 费米能级逐渐下降, 材料由 $n-n^+$ 结变为 $p-n$ 结. KPFM 数据表明这是由于多子的有效注入和在材料内部的顺畅输运主导了电流. 施加 532 nm 激光后, 异质结反双极性更加明显, 这是由于在负向偏压下, 载流子在结区发生累积; 在正向偏压下, 载流子在结区发分离. 两种情况均使得结区和 MoS_2 间载流子浓度差减小. 输运过程中的势垒决定了测量结果中电势分布的斜率及突变点的位置, 偏压则会影响载流子在结区的隧穿.

本工作所使用的方法可以推广到其他二维异质结体系的半导体器件, 加深制造二维材料异质结 FET 时需要考虑的栅极材料设计参数, 使 FET 具有更强的短沟道效应控制能力, 从而实现极小的泄漏电流.

参考文献

- [1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, Grigorieva I V, Firsov A A 2004 *Science* **306** 666
- [2] Manzeli S, Ovchinnikov D, Pasquier D, Yazyev O V, Kis A 2017 *Nat. Rev. Mater.* **2** 17033
- [3] Li L K, Yu Y J, Ye G J, Ge Q Q, Ou X D, Wu H, Feng D L, Chen X H, Zhang Y B 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 372
- [4] Song L, Ci L J, Lu H, Sorokin P B, Jin C H, Ni J, Kvashnin A G, Kvashnin D G, Lou J, Yakobson B I 2010 *Nano Lett.* **10**

- 3209
- [5] Jian S K, Jiang Y F, Yao H 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 237001
- [6] Lozovoy K A, Izhnin I I, Kokhanenko A P, Dirko V V, Vinarskiy V P, Voitsekhovskii A V, Fitsych O I, Akimenko N Y 2022 *Nanomaterials* **12** 2221
- [7] Novoselov K S, Mishchenko A, Carvalho A, Neto A H C 2016 *Science* **353** aac9439
- [8] Iannaccone G, Bonaccorso F, Colombo L, Fiori G 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 183
- [9] Zeng M Q, Xiao Y, Liu J X, Yang K, Fu L 2018 *Chem. Rev.* **118** 6236
- [10] Chi Z H, Chen X L, Yen F, Peng F, Zhou Y H, Zhu J L, Zhang Y J, Liu X D, Lin C L, Chu S Q 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 037002
- [11] Fei Z Y, Zhao W J, Palomaki T A, Sun B S, Miller M K, Zhao Z Y, Yan J Q, Xu X D, Cobden D H 2018 *Nature* **560** 336
- [12] Bonilla M, Kolekar S, Ma Y J, Diaz H C, Kalappattil V, Das R, Eggers T, Gutierrez H R, Phan M H, Batzill M 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 289
- [13] Li T X, Jiang S W, Shen B, Zhang Y, Li L Z, Tao Z, Trithep D, Kenji W, Takashi T, Fu L, Shan J, Kin F M 2022 *Nature* **600** 641
- [14] Guo H W, Hu Z, Liu Z B, Tian J G 2021 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2007810
- [15] Liu Y, Weiss N O, Duan X D, Cheng H C, Huang Y, Duan X F 2016 *Nat. Rev. Mater.* **1** 16042
- [16] Cheng R, Li D H, Zhou H L, Wang C, Yin A X, Jiang S, Liu Y, Chen Y, Huang Y, Duan X F 2014 *Nano Lett.* **14** 5590
- [17] Lee C H, Lee G H, van der Zande A M, Chen W C, Li Y L, Han M Y, Cui X, Arefe G, Nuckolls C, Heinz T F, Guo J, Hone J, Kim P 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 676
- [18] Zhang K A, Zhang T N, Cheng G H, Li T X, Wang S X, Wei W, Zhou X H, Yu W W, Sun Y, Wang P, Zhang D, Zeng C G, Wang X J, Hu W D, Fan H J, Shen G Z, Chen X, Duan X F, Chang K, Dai N 2016 *ACS Nano* **10** 3852
- [19] Nowack K C, Spanton E M, Baenninger M, König M, Kirtley J R, Kalisky B, Ames C, Leubner P, Brune C, Buhmann H, Molenkamp L W, Goldhaber-Gordon D, Moler K A 2013 *Nature* **12** 787
- [20] Duong N T, Lee J, Bang S, Park C, Lim S C, Jeong M S 2019 *ACS Nano* **13** 4478
- [21] Cao G M, Meng P, Chen J G, Liu H S, Bian R J, Zhu C, Liu F C, Liu Z 2021 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2005443
- [22] Nazir G, Kim H, Kim J, Kim K S, Shin D H, Khan M F, Lee D S, Hwang J Y, Hwang C, Suh J, Eom J, Jung S 2018 *Nat. Commun.* **9** 5371
- [23] Khan S, Khan A, Azadmanjiri J, Roy P K, Děkanovský L, Sofer Z, Numan A 2022 *Adv. Photonics Res.* **3** 2100342
- [24] Melitz W, Shen J, Kummel A C, Lee S 2011 *Surf. Sci. Rep.* **66** 1
- [25] Grzeszczyk M, Golasa K, Zinkiewicz M, Nogajewski K, Molas M R, Potemski M, Wymolek A, Babinski A 2016 *2D Mater.* **3** 025010
- [26] Golasa K, Grzeszczyk M, Bozek R, Leszczynski P, Wymolek A, Potemski M, Babinski A 2014 *Solid State Commun.* **197** 53
- [27] Balaji Y, Smets Q, Szabo A, Mascaro M, Lin D, Asselberghs I, Radu I, Luisier M, Groeseneken G 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 1905970

Charge transmission of MoS₂/MoTe₂ vertical heterojunction and its modulation^{*}

Wen Heng-Di^{1) #} Liu Yue^{1) #} Zhen Liang^{1) 2) 3)}

Li Yang^{1) 3) †} Xu Cheng-Yan^{1) 2) ‡}

1) (*School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

2) (*Sauvage Laboratory for Smart Materials, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China*)

3) (*MOE Key Laboratory of Micro-Systems and Micro-Structures Manufacturing, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China*)

(Received 9 September 2022; revised manuscript received 29 September 2022)

Abstract

The heterojunction device based on two-dimensional materials possesses unique photoelectric properties due to its nanoscale thickness and van der Waals (vdWs) contact surface. In this paper, a gate-voltage-tunable MoS₂/MoTe₂ vertical vdWs heterojunction device is constructed. The Kelvin probe force microscopy (KPFM) technology is combined with the electric transport measurement technology, thereby revealing the charge transport behavior of the MoS₂/MoTe₂ heterojunction under dark condition and laser-irradiation condition, including the bipolarity characteristics of the transition from n-n⁺ junction to p-n junction. In this paper, the charge transport mechanism of heterojunction is explained comprehensively and systematically, including the charge transmission process of n-n⁺ junction and p-n junction under positive and negative bias conditions, the transformation of nodule behavior with gate voltage, the influence of barriers on charge transmission, the different rectification characteristics between n-n⁺ junction and p-n junction, the major role of source and leakage bias voltage in band tunneling, and the influence of photogenerated carriers on electrical transmission. The method in this work can be generalized to other two-dimensional heterojunction systems and also provide an important reference for improving the performance of two-dimensional semiconductor devices and their applications in the future.

Keywords: two-dimensional transition metal chalcogenide heterojunction, charge transmission mechanism, energy band structure, Kelvin probe force microscope

PACS: 61.82.Fk, 73.40.Lq, 85.30.-z

DOI: 10.7498/aps.72.20221768

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51772064, 51902069), the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, China (Grant No. YQ2021E019), and the Shenzhen Science and Technology Program, China (Grant No. RCJC20210706091950025).

[#] These authors contributed equally.

[†] Corresponding author. E-mail: liyang2018@hit.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: cy_xu@hit.edu.cn

MoS₂/MoTe₂垂直异质结的电荷传输及其调制

温恒迪 刘跃 甄良 李洋 徐成彦

Charge transmission of MoS₂/MoTe₂ vertical heterojunction and its modulation

Wen Heng-Di Liu Yue Zhen Liang Li Yang Xu Cheng-Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 036102 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221768

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221768>

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

IV–VI族化合物半导体异质结二维电子气研究进展

Recent progress on IV–VI compound semiconductor heterojunction two-dimensional electron gas

物理学报. 2019, 68(16): 166801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191074>

CuPc/MoS₂范德瓦耳斯异质结荧光特性

Photoluminescence properties of CuPc/MoS₂ van der Waals heterostructure

物理学报. 2022, 71(12): 128103 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220132>

二维铁电In₂Se₃/InSe垂直异质结能带的应力调控

Strain control of two-dimensional ferroelectric In₂Se₃/InSe vertical heterojunction energy band

物理学报. 2021, 70(22): 227701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211158>

二维MoS₂压痕过程异质界面范德瓦耳斯力引起的撕裂行为

Tearing behavior induced by van der Waals force at heterogeneous interface during two-dimensional MoS₂ nanoindentation

物理学报. 2022, 71(19): 194601 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220875>

基于过渡金属硫族化合物同质结的光电探测器

Photodetectors based on homojunctions of transition metal dichalcogenides

物理学报. 2021, 70(17): 177301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210859>

光器件应用改性Ge的能带结构模型

Band structure model of modified Ge for optical device application

物理学报. 2018, 67(19): 198502 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181155>