文章编号:1007 - 4252(2023)01 - 0001 - 001　　DOI:10.20027/j.gncq.2023.0006

MoS_2/ZnO 异质结及其在光电探测器中的研究进展

尚续衡,李亚平,樊志琴*
(河南工业大学理学院,郑州 450001)

摘要:以 MoS_2为代表的过渡金属硫族化合物(TMDCs)由于独特的电子结构、优异的半导体特性、可调节的带隙(1.3~1.8eV)、高迁移率和强光-物质相互作用成为发展下一代高性能光电器件的理想候选材料。然而二维材料独特的层间范德华间隙,使得扩散、注入等传统半导体的掺杂手段无法实现均匀稳定的掺杂,进而无法有效调控其相关电子器件的性能。传统的基于三维半导体的 p-n 结是现代电子器件的基本组成部分,将二维层状 MoS_2集成到传统的半导体材料上成了提升器件性能和探索新功能的策略之一。宽禁带半导体 ZnO 以其优越的光电性能已广泛应用于高效率短波长探测、发光和激光器件以及智能设备上。近年来,MoS_2和 ZnO 组成异质结结构的研究成了热点,诸多研究报道 MoS_2与 ZnO 组成的异质结结构可以提高光电探测器的光响应率、光谱范围和光响应速度等,展示了良好的性能。本文综述了 MoS_2/ZnO 异质结结构的多种制备方法,异质结特性和界面物理机制以及在光电探测器中的研究进展。

关键词:MoS_2; ZnO;范德华异质结; 界面传输;光电探测器
中图分类号:TN36　　**文献标识码**:A

Research progress in MoS_2/ZnO heterostructure and applications in photodetectors

SHANG Xu-heng, LI Ya-ping, FAN Zhi-qin *
(College of Science, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Transition metal dichalcogenides (TMDCs), represented by MoS_2, are ideal candidates for the development of next-generation high-performance optoelectronic devices due to their unique electronic structure, excellent semiconductor properties, tunable band gap (1.3-1.8eV), high mobility and strong photo-electric interactions. However, the unique interlayer van der Waals gap of 2D materials makes it impossible to achieve uniform and stable doping by conventional semiconductor doping methods, such as diffusion and injection, and cannot effectively modulate the performance of their associated electronic devices. The traditional "3D" semiconductor-based p-n junction is the fundamental blocks of modern electronic devices, integrating 2D layered MoS_2 into conventional semiconductor materials has become one of

收稿日期:2022-11-27;　　**修订日期**:2023-02-09
基金项目:河南工业大学引进人才科研启动项目(No.31401263,No.31401262).
作者简介:尚续衡(1998-)男,河南工业大学理学院 (E-mail: 1363642157@qq.com).
通信作者:樊志琴(1970-)女,博士,教授,河南工业大学理学院(E-mail: lihd@haut.edu.cn).

the strategies to enhance device performance and explore new functionalities. The semiconductor ZnO, with 3.37eV bandgap and superior optoelectronic properties, has been widely used in high efficiency short wavelength detection, light emitting and laser devices as well as smart devices. In recent years, the study of heterojunction structures with MoS_2 and ZnO has become an attractive topic, and many studies have been reported that the MoS_2/ZnO heterostructures can effectively improve the photoresponsivity, response range and response speed of photodetectors, demonstrating good performance. This paper reviews various methods of preparing MoS_2/ZnO heterojunction structures, physical mechanisms of carries transport at the heterojunction interfaces, and the research progress in photodetectors.

Key words: MoS_2; ZnO; Van Der Waals Heterostructure; Interfacial Transport; Photodetector

0 引言

过渡金属硫族化合物(TMDs)因其带隙可调、具有良好的光电特性等特点成为二维材料中的研究热点[1-3]。对于单层或少层 TMDs 材料来说,由于电子在某一维方向上的活动受到限制,库仑屏蔽作用减弱,使得激子效应增强,为 TMDs 材料在光伏与光电器件领域的发展提供了基础[3]。其中,二硫化钼(MoS_2)在自然界中具有辉泪矿的性质,是 TMDs 中被广泛研究的一种材料。块材 MoS_2为间接带隙,其带隙值为 1.3eV,当 MoS_2厚度由块体向单层转变时,带隙会随之由间接带隙转变为直接带隙,单层 MoS_2的带隙值变为 1.8eV[4]。随着带隙的变化,MoS_2也表现出许多独特的性质,MoS_2的载流子迁移率在室温下随层数的增加而增加,而当层数逐渐减小到单层后,MoS_2导带和价带间电子的弛豫速度变慢,使得光致发光峰的强度变大,半高宽较小,荧光效率提升。相对体相,单分子层的 MoS_2的荧光效率提升了10^4倍以上[5]。将 MoS_2与 WSe_2结合成异质结,通过调节点击接触和材料层数,可以获得超高的外量子效率(61%)和超快的响应速度(4.1μs)[6]。

但是基于 MoS_2的光电探测器,由于 MoS_2材料本身的原因导致光吸收效率低、光生载流子寿命长,致使光响应率低、响应时间慢,光吸收效率仍然受到入射光在薄层二硫化钼中短透射路径的限制,严重影响了检测性能[7-8]。为了进一步提高 MoS_2光电探测器的性能,将二硫化钼与其他具有不同带隙的半导体结合,制备基于二硫化钼的异质结光电探测器成为现如今的研究热点,异质结界面上的内置电场可以促进光生载流子的分离与迁移,有利于提高基于 MoS_2的光电探测器的响应率和响应速度[9-10]。将二维层状材料和传统的三维半导体结合,制备混合维度异质结器件是近年来研究的热点问题[11]。氧化锌(ZnO)是第三代宽禁带半导体的典型代表,禁带宽度为 3.37eV,具有六方纤锌矿结构室温下的激子束缚能高达 60meV,在室温下 ZnO 材料的光电器件也能实现高效的激子复合发光[12]。自 Mallow 首次发现氧化锌对紫外光存在光响应以来,基于 ZnO 材料制备而成的发光二极管,紫外光电探测器以及激光器等一直广受科研工作者的关注[12]。构建 ZnO 与 MoS_2异质结构的天然优势在于两者之间的晶格失配度仅有 3%,有助于 MoS_2的外延生长,因此 ZnO 可作为典型半导体与 MoS_2形成的异质结构,探索二维材料和三维半导体和的奇特性能。近几年关于 MoS_2与 ZnO 异质结构的研究也越来越多[9-10, 13-15],本文从异质结的制备方法出发,综述了 MoS_2/ZnO 异质结的形貌结构,光电特性以及在光电器件领域的研究进展,重点论述了 MoS_2/ZnO 异质结的制备、表征及其在光电器件中的应用。

1 正文

1.1 MoS_2/ZnO 异质结的制备方法

制备高质量的材料是实现器件高性能的基础。ZnO 作为一种传统半导体材料,目前已经可制备具有从原子级平整的薄膜结构到各种形态的纳米结构[12],其制备方法也多种多样,较为成熟的制备方法主要为物理沉积(磁控溅射,原子层沉积,分子束外延等)和化学合成(水热法,溶胶凝胶法和化学气相沉积等)。制备二维材料 MoS_2的最简单常用的方法为机械剥离法,此方法既没有引入其他杂质,也不会破坏晶体质量,并且可以制备出具有较高晶体质量的二维材料,但其尺寸一般较小,仅适合在研究领

域,还不能满足应用上的需求。因此又衍生出很多其他制备 MoS_2 的方法,例如液相超声分散剥离法[16]、化学气相沉积法[17]和磁控溅射法[14]等。在制备异质结构时,可单独制备两种材料,然后再通过转移构筑异质结构,也可以直接在一种材料上制备另外一种材料,但其制备过程不能破坏基底材料的结构和性能。目前已报道的 MoS_2/ZnO 异质结的制备工艺主要有湿法转移[18]、原子层沉积法[17]、旋涂法[10]、电子束蒸镀法[19]磁控溅射法[14]等。

1. 转移法。目前报道的转移二维材料的方法有湿法转移[20]和干法转移[21]技术。由 Dean 等[22]人开创的 PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)辅助的湿法转移技术是目前最为常用的转移二维材料的方法之一,转移效率高,可实现大面积二维材料的转移。Liu 等人[18]利用 PMMA 辅助的湿法转移技术,通过精准转移平台将单层 MoS_2转移到 ZnO 纳米柱上,实现了周期性应变的 ZnO/ MoS_2异质结阵列构筑,其转移流程示意图如表 1 所示。通过这种方法他们制备出了具有周期性应变分布的 ZnO/MoS_2异质结阵列,对应变调控的 ZnO/ MoS_2异质界面载流子行为机理进行了细致研究。转移法是实验室研究中制备二维材料相关异质结的多种方法中最为常用的方法之一,然而这种方式构筑异质结构过程繁琐且复杂,非常容易由于其中一个环节失误而造成异质结不理想,因此越来越多的课题组尝试采用其他方法制备二维材料的异质结。

2. 原子层沉积法。原子层沉积 ALD 是基于表面控制的薄膜沉积技术。在使用 ALD 镀膜过程中,两种或更多的化学气相前驱体依次在基底表面化学吸附发生化学反应,将物质以单原子膜的形式一层一层沉积,从而产生固态的薄膜。在使用原子层沉积法制备 MoS_2/ZnO 薄膜时,可以得到厚度均匀一致的薄膜,由于原子层沉积的速率缓慢且反应周期可控,还可以在沉积薄膜时控制膜厚[23]。Lv 等人[17]通过原子层沉积法制备了 MoS_2/ZnO 薄膜,其制备流程如表 1 所示。Kang[24]等用$(NH_4)_2MoS_4$作为单源前驱体,通过水热法在石英衬底上合成 MoS_2,然后以 DEZ 和 H_2O 分别作为锌源和氧源,通过原子层沉积法在 MoS_2 上沉积 ZnO,并通过调控原子层沉积的重复次数对 ZnO 膜的厚度进行调节。

3. 溶胶-凝胶旋涂层法。通过溶胶凝胶法制备的薄膜可以在较低的温度下进行,且因为制备的原料首先混合在溶剂中形成低黏度的溶液,所以在形成凝胶时成分混合比较均匀。Kim[10]等使用含有 MoS_2的前驱体溶液,采用溶胶-凝胶旋涂层法制备 MoS_2/ZnO 薄膜,该研究组的制备步骤分为两步,他们首先采用水热法制备出 MoS_2粉末;然后将含有不同质量分数的 MoS_2粉末的前驱体溶液用旋涂法涂覆在 ZnO 薄膜上,制备出 MoS_2/ZnO 薄膜。Putritama 等[25]也使用旋涂法制备出 MoS_2包裹 ZnO 的异质结结构,制备流程如表 1 所示。

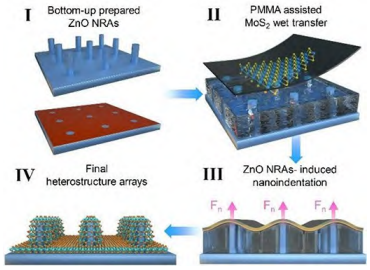
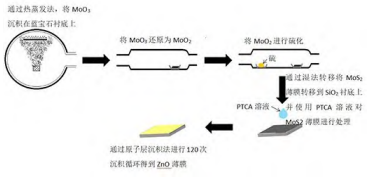
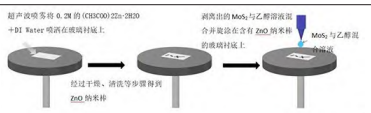
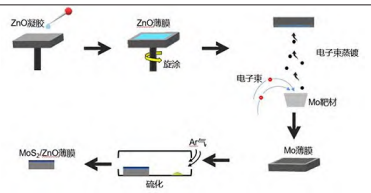
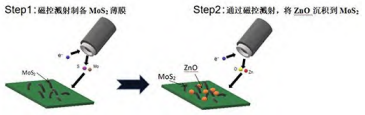
4. 电子束蒸镀法。电子束蒸镀法制备薄膜是利用高能电子轰击靶材,电子的动能转化为热能使镀膜材料加热蒸发转为气态,最后覆盖在衬底上成膜,属于物理气相沉积的一种[26]。电子束蒸镀法可以为镀膜材料提供较大的热能,所以成膜效率更高。Hsu 等人[19]通过溶胶-凝胶法制备出 ZnO 薄膜后,利用电子束蒸镀法在 ZnO 表面镀了一层 Mo 薄膜,最后在高温氩气环境中进行硫化,合成 MoS_2/ZnO 复合薄膜。

5. 磁控溅射法。磁控溅射利用电子在电场的作用中加速,在飞向基板的过程中与 Ar 原子发生碰撞,使其电离出 Ar^+和一个二次电子 e,电子飞向基片,Ar^+在电场作用下加速飞向阴极靶,并以高能量轰击靶材表面,使靶材发生溅射,溅射出来的粒子则沉积在衬底表面形成薄膜[27]。采用磁控溅射法制备 MoS_2/ZnO 的复合纳米结构的优点是两种材料容易制成靶材,解决了溅射源难以获取的问题;溅射所得到的薄膜与基片和两种材料间的结合较好;溅射所获得的薄膜纯度高、致密性好、成膜均匀性好。Liu[14]等通过磁控溅射法在石英衬底上制备了 MoS_2/ZnO 薄膜,他们在石英衬底低温溅射 MoS_2,然后再以相同的气体环境、压力以及衬底温度继续沉积 ZnO 薄膜,形成 MoS_2/ZnO 异质结,制备流程如表 1所示。采用磁控溅射法制备 MoS_2/ZnO 异质结时,在整个制备过程中没有将样品从真空腔室中取出,保证两种材料的界面处没有其他可能的污染物的影响。同时,在制备过程中,改变功率、溅射时间和沉积压强等因素调节成膜质量和薄膜厚度。巩晨阳等人[28]通过改变溅射过程中的压强制备了一系列不同厚度的 MoS_2薄膜。他们的测试结果显示,随着沉积压强的增大,薄膜的沉积速率开始减小,压强为 1.2Pa 时沉积速率达到最小值,当沉积压强继续增大,沉积速率开始增大,薄膜沉积速率和厚度的变

化趋势一致。产生这一变化的主要原因是当沉积压强较小时,晶粒间堆积间距较大,因此薄膜厚度较大;当压强增大时(不超过 1.2Pa),薄膜会越来越致密,厚度也会随之减小;压强继续增大到 1.4Pa 时,晶粒尺寸对薄膜厚度起作用,导致薄膜的厚度最大。

表 1 多种制备 MoS_2/ZnO 异质结方法的过程

Table 1 Details of the approaches to prepare MoS_2/ZnO heterostructure

制备方法	制备流程示意图
PMMA 辅助的湿法转移技术[18]	
原子层沉积法[17]	
溶胶-凝胶旋涂层法[25]	
电子束蒸镀法[19]	
磁控溅射法[14]	

1.2 MoS_2/ZnO 异质结的性能表征

在制备纳米材料时,通常会因为制备方式和参数设置的不同,而使纳米结构表现出不同特性。下面我们将从材料的表面形貌、晶体结构、光学和电学性质几方面对 MoS_2/ZnO 异质结的性能进行分析。

1.2.1 MoS_2/ZnO 异质结的表面形貌

MoS_2/ZnO 复合纳米结构表面形貌和微观结构是研究二维材料异质结的重要参数。常用的表征表面形貌的仪器有扫描电子显微镜(SEM),透射电子显微镜(TEM)和原子力显微镜(AFM)。SEM 可以直观地观察样品表面形貌,多用于观察微区形貌,而 AFM 具有纵向的高分辨率,因此它也经常被用作单层和少层膜厚的测量[2]。也有一些非常用的方法,例如拉曼扫描成像和发光成像,用来观测纳米结构的形貌[18]。MoS_2/ZnO 复合结构存在多种纳米形态,如图 1 所示。不同纳米结构的 MoS_2/ZnO 异质结的物理化学特性有非常大的不同,可分别满足光催化、水分解、光电信号增强等多种需求。图 1(a)[1]为在单层 MoS_2表面构筑了 ZnO 纳米柱的结构图,ZnO 纳米柱的光天线效应会增强 MoS_2单分子层的拉曼和光致发光强度。图 1(b)[18]是在 ZnO 纳米柱上覆盖了单层 MoS_2结构的模型图和 SEM 图,此结构下的 MoS_2薄膜在纳米柱的顶部和侧面受到了不同强度的拉应力,在应变最强处 MoS_2薄膜中的荧光淬灭现象最为显著。图 1(c)[29]为氧化锌纳米颗粒自组装在二硫化钼纳米花上的复合纳米结构。图 1(c)上方的 SEM 图显示在 MoS_2纳米花片间均匀分布着 ZnO 颗粒,从图 1(c)下方的 TEM 图中可以看出 ZnO 纳米颗粒的尺寸分布在 16~25nm,相比纯 MoS_2,此复合结构具有更强的吸附能力、光催化活性和场发射特性。图 1(d)[30]为表面包裹了 ZnO 颗粒的蒲公英状的 MoS_2纳米片,ZnO 纳米颗粒填充在 MoS_2纳米片之间,此结构的 MoS_2/ZnO 具有增强的紫外吸收光和本征 PL 发射。图 1(e)[15]为二维 ZnO 纳米片表面覆盖了 MoS_2量子点的 TEM 图,所构建的 0D/2D 异质结可以有效地提高光生载流子的分离效率和电荷转移,从而提高其光催化活性,该异质结可用作水处理和空气污染的双功能0D/2D异质结光催化剂。图 1(f)[14]为 MoS_2/ZnO 复合结构的 SEM 图,其结构为磁控溅射沉积了 MoS_2膜后原位地在 MoS_2上溅射了 ZnO 粒子层,SEM 结果显示当氧化锌粒子沉积在 MoS_2薄膜上时,原本蠕虫状二硫化钼薄膜的表面形貌和边缘变得更加规则和光滑,从对应的 AFM 结果显示,大量氧化锌纳米颗粒沉积在蠕虫状二硫化钼的缝隙中。

1.2.2 MoS_2/ZnO 异质结的晶体结构

X 射线衍射和电子衍射是常用的材料物相分析和结晶度测定的方法。MoS_2和 ZnO 均有多种晶型[31],常温常压下的稳定结构分别为三棱柱型 MoS_2和纤锌矿结构 ZnO,两者均为六角对称结构,且面内晶格常数分别为 0.316nm 和 0.324nm,失配度

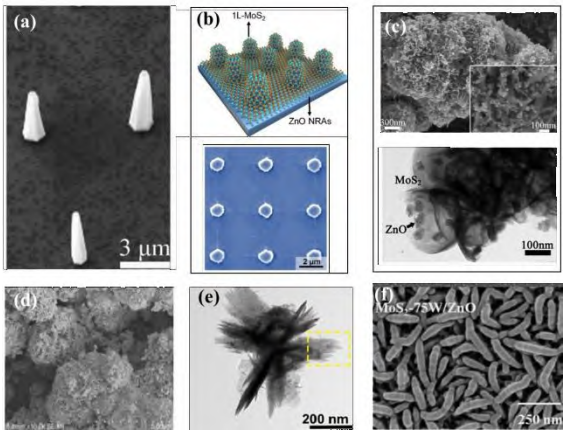


图 1　各种形态下的纳米 MoS_2/ZnO 复合结构图：(a) ZnO 纳米柱均匀分布在 MoS_2 层的 SEM 图[1]；(b) 为规则 ZnO 纳米柱上覆盖了一层 MoS_2 膜[18]，上图为模型图，下图为 SEM 图；(c) MoS_2 纳米花上面均匀分布自组装的 ZnO 颗粒[29]，上图为 SEM，下图为放大后的 TEM；(d) 蒲公英状 MoS_2/ZnO 复合结构 SEM 图[30]，MoS_2 纳米花表面分布着 ZnO 纳米颗粒；(e) MoS_2/ZnO 复合结构 TEM 图[15]，二维 ZnO 纳米片表面覆盖了零维 MoS_2 量子点；(f) 蠕虫状 MoS_2 膜表面溅射了 ZnO 层的 SEM 图[14]

Fig.1 Various morphologies of MoS_2/ZnO heterostructures: (a) SEM image of ZnO nanorods uniformly distributed in the MoS_2 layer[1]; (b) ZnO nanorod arrays covered with MoS_2 monolayer[18], the upper image is the model structure and the lower image is the SEM result; (c) Self-assembled ZnO nanoparticles were uniformly formed on MoS_2 nano flowers[29], the upper and the lower parts of the image are the results of SEM and enlarged TEM respectively; (d) SEM image of dandelion flower-like MoS_2@ZnO nanocomposites[30], ZnO nanoparticles were deposited on the surface as well as within the sheets of MoS_2; (e) TEM image of MoS_2/ZnO nanocomposite[15], 2D ZnO nanosheets were covered with 0D MoS_2 quantum dots; (f) ZnO layers were sputtered on the surface of worm-like MoS_2 layers[14]

仅为 3%，在 XRD 图中两者在多个晶格取向上的衍射峰是非常接近的，如图 2(a) 所示[32]。由于存在周期性排列，通常块材和剥离后的 MoS_2 样品在沿着 (002) 平面都表现出很强的取向性，然而在生长后的单层或者少层 MoS_2 却很难检测到 (002) 峰。Liu 等人[2] 对三层 MoS_2 薄膜进行掠入射 X 射线衍射 (GIA-XRD) 和面内 X 射线衍射 (in-plane XRD)，如图 2(b) 所示[2]。结果显示，虽然 GIA-XRD 中的 (002) 衍射峰虽然较弱，但 (105) 和 (106) 都较强，而这两个峰与高阶 (00l) 平面的衍射是相关的。在 in-plane XRD 图中的两个较强的衍射峰分别对应 (100) 和 (110) 取向，这两个衍射峰在其他 MoS_2 纳米结构，以及 MoS_2/ZnO 异质结中的强度也是较强的，如图 2(c) 和图2(d) 所示[29]。Mahnoosh 等人[33] 指出 (103) 平面为表面能最低排列最紧密的平面，他们通过 CVD 方法制备的单层 MoS_2 在温度升高到 850℃ 后，其结晶性大大提高，并显示出优越的 (103) 取向。

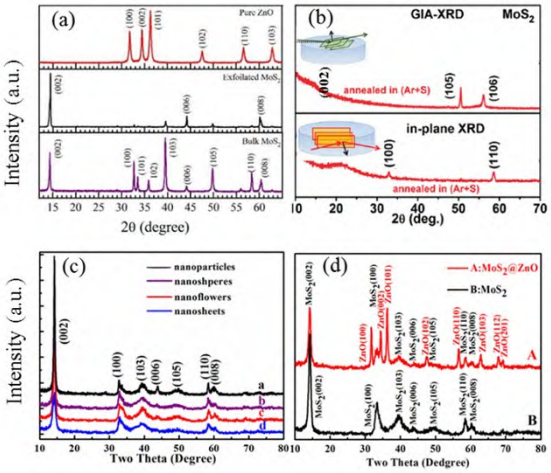


图 2　MoS_2 以及 MoS_2/ZnO 异质结的 XRD 图

(a) 从下到上分别为 MoS_2 块材，剥离后的 MoS_2 以及 ZnO 粉末的 XRD 图[32]；(b) 三层 MoS_2 的掠入射和面内入射的 XRD 图[2]；(c) 各种纳米形态的 MoS_2 的 XRD 图[29]；(d) MoS_2 和 MoS_2/ZnO 异质结的 XRD 图[29]

Fig.2 XRD results of MoS_2, ZnO and MoS_2/ZnO heterojunctions: (a) XRD patterns of bulk MoS_2, exfoilated MoS_2 and pure ZnO[32]; (b) Glancing incidence angle X-ray diffraction and in-plane X-ray diffraction patterns of the MoS_2 trilayers[2]; (c) XRD patterns of MoS_2, nanoparticles, nanospheres, nanoflflowers and nanosheets[29]; (d) XRD patterns of the MoS_2 nanoflflowers and MoS_2@ZnO nano-heterojunctions[29]

拉曼光谱是表征二维材料及其相关异质结最为常用的工具之一，其工作原理是通过晶格振动的深入来表征二维材料的分子结构、声子能量散射以及电声子耦合。二维材料的晶格振动，特别是在表征层间振动的低频区，会随着其层数的变化而发生明显改变。MoS_2 的晶格振动峰主要为 Mo-S 键沿着层方向的平面内振动模式对应的 E^1_{2g} 峰，与 Mo-S 键沿着垂直于层随间方向的平面外振动模式对应的 A_{1g}

峰,如图 3(a)所示[14]。Lee 等人[1]对 CVD 合成的单层、双层和其他少层 MoS_2的拉曼测试结果显示随着厚度的增加,A_{1g}和 E_{2g}模式之间的峰值频率差 Δ 不断增加,单层对应的峰位分别为 403.8 cm^{-1}(A_{1g})和 385.8 cm^{-1}(E^1_{2g}),频率差为 18 cm^{-1},双层和三层 MoS_2对应的频率差分别为 20 cm^{-1}和22 cm^{-1},如图 3(b)中所示。Liu 等人[2]在他们的结果中也验证了这一结论。随着厚度的继续增加,层数减少时,分子层间的耦合作用力增强,A_{1g}模的振动频率增大(蓝移),而 E^1_{2g}模的振动频率则减小(红移),这就导致 E^1_{2g}和 A_{1g}两个模式之间的频率差减小。Putritama 等人[25]探究 MoS_2纳米片层数对 MoS_2/ZnO 异质结的影响时通过控制剥离 MoS_2的时间来制备不同层数的 MoS_2/ZnO 异质结。在图 3(c)中剥离 4h 和 8h 的 MoS_2纳米片的两个峰的频率差分别为 24cm^{-1}和 19cm^{-1},可以得出剥离 4h 和 8h 的 MoS_2纳米片对应的层数分别为 11 层和3 层。文献[2]中指出拉曼峰的半高宽可用来预测薄膜的结晶质量,随着退火温度的增加,MoS_2薄膜的结晶质量不断提高,通过机械剥离出的单层 MoS_2的 E^1_{2g}的半高宽约为 4cm^{-1},当剥离出的层数为 4~5 时,其半高宽稳定在 5cm^{-1}。通过磁控溅射方法在 MoS_2薄膜上溅射 ZnO 层,构筑成异质结后其振动峰的位置和强度都有轻微的偏移[14],如图 3(d)所示。Lloyd[34]指出,在不同程度的应变下,单层 MoS_2的晶格振动会发生红移,其中 E^1_{2g}峰位置有较大红移,A_{1g}峰位置有较小红移,除此之外,E^1_{2g}与 A_{1g}的强度比也随着应变的增加而增强,如图 3(e)所示。在此基础上,Liu 等人[18]的研究将单层 MoS_2贴合到 ZnO 纳米柱上后,位于纳米柱不同位置处的 MoS_2层收到不同程度的应力,在纳米柱边缘处收到的应力最大,在纳米柱底部平坦处几乎不受应力作用,他们测试的拉曼结果如图 3(f)所示,明显可以看出在应变下 MoS_2的两个拉曼峰发生了不同程度的红移现象。然而 Zhang 等人[35]将 ZnO 纳米棒构筑在单层 MoS_2上时,其 z 轴扫描的 ZnO 和 MoS_2的拉曼谱几乎没有变化,如图 3(g)所示,即单分子层厚度的 MoS_2对氧化锌纳米棒的晶体结构基本没有影响。

1.2.3MoS_2/ZnO 异质结的光学特性

二维材料 MoS_2的发光特性与层数有密切联系[1-2]。如图 4(a)所示[1],单层 MoS_2的光致发光谱

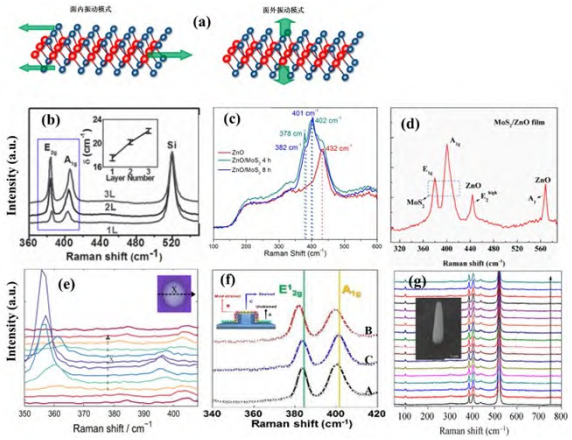


图 3 MoS_2和 MoS_2/ZnO 异质结 Raman 图

(a)MoS_2面内和面外晶格振动原子模型图[14];(b)单层到少层 MoS_2的 Raman 图[1];(c)不同剥离时间 MoS_2与 ZnO 构筑的异质结的 Raman 图[25];(d)磁控溅射的厚层 MoS_2和 ZnO 异质结的 Raman 图[14];(e)单层 MoS_2在不同应变下的 Raman 图[34];(f)MoS_2/ZnO 异质结中不同应变下单层 MoS_2(A、B、C)区域的拉曼光谱,插图为单层 MoS_2在氧化锌纳米柱不同区域的应变分布示意图[18];(g)单层 MoS_2上构筑 ZnO 纳米柱的 z 轴扫描 Raman 图(箭头为从 ZnO 的底部到顶部),插图为对应纳米结构的扫描电镜图[35]

Fig. 3 Ramanspectra of MoS_2 and MoS_2/ZnO heterojunctions: (a) in-plane and put-plane vibration modes[14]; (b) Raman spectra of the monolayer, bilayer and trilayer MoS_2 sheets[1]; (c) Raman spectra of ZnO, ZnO/MoS_2 with MoS_2 nanosheets exfoliated for 4 h and 8 h[25]; (d) Raman spectrum of MoS_2/ZnO heterojunction prepared by magnetron sputtering[14]; (e) Raman spectra of monolayer MoS_2 with different strains[34]; (f) Raman spectra of 1L-MoS_2 at region (A, B, C) under different strain, the insert image is the schematic of strain distribution of 1L-MoS_2 at different regions of the ZnO nanorod substrate[18]; (g) Micro-zone Raman spectra in the z-axial scanning mode from bottom to top for a single hybrid nanostructure (the arrow points from the bottom to the top of the ZnO nanorod), the insert image is the SEM result of nanostructure[35]

(PL)中在 627 nm 和 677 nm 处有两个显著的发光峰,对应着 A_1和 B_1的直接激子跃迁,且此发光峰强度明显随层数的增加而减小。发光峰的急剧降低也说明了其光学带隙从直接带隙转变为了间接带隙。Liu 等人[18]通过对比在 532nm 激光激发下的 Al_2O_3和 ZnO 衬底上单层 MoS_2的 PL 谱,发现在 ZnO 衬底上单层 MoS_2的发光强度比 Al_2O_3衬底上单层 MoS_2的发光强度弱得多,如图 4(b)所示。他们用325 nm

激光测试 ZnO 的 PL 发光峰,结果显示在约 3.37 eV 处的紫外发射峰在覆盖了一层 MoS_2后强度大大降低,如图 4(c)所示[18]。ZnO 和单层 MoS_2形成异质结后 PL 发光强度的淬灭都验证了单层 MoS_2和 ZnO 之间存在电荷转移,使电子-空穴对的复合较纯 MoS_2和纯 ZnO 样品中减少,进而说明了 MoS_2/ZnO 异质结之间形成了 II 型能带排列,有利于电荷在两者之间的有效转移。Selvaraj 等人[32]还通过 PL 衰变谱估计了光生载流子的衰变寿命,ZnO 和 MoS_2/ZnO 复合结构品的平均寿命分别为 25 ns 和 29 ns,即复合结构比纯 ZnO 样品具有更长的寿命载流子。

在 MoS_2/ZnO 异质结中,由于载流子浓度梯度使 ZnO 中的电子在界面处扩散到 MoS_2中,形成正电区域,同样的空穴从 MoS_2扩散到 ZnO 中,其内建电场方向如图 4(g)所示[32]。当激发光照射到异质结上时,会产生激发的电子和空穴,MoS_2导带上的激发电子会在内建电场的作用下转移到 ZnO 上,同样地,ZnO 上的激发空穴会转移到 MoS_2上,即光生电子和空穴在界面上有效地分离,从而增加了载流子寿命,并且导致异质结的 PL 谱中 MoS_2和 ZnO 的发光强度相对本征材料都大大降低。除了界面电荷转移会导致 MoS_2的发光峰降低外,Liu[18]等人的工作还指出应变使 MoS_2/ZnO 界面处的光生载流子更有效地分离了,进而使 MoS_2的发光强度进一步降低,如图 4(d)所示。然而,在 Zhang 等人[35]的报道中 MoS_2/ZnO 异质结中的 MoS_2的 PL 却增强了,他们把单层 MoS_2作为基底,在上面垂直耦合 ZnO 纳米棒,发现与 ZnO 相接触区域的 MoS_2的 PL 发射增强了,如图 4(e)所示,他们把这种增强的现象归因于 ZnO 纳米棒的光天线效应,使此异质结捕获光子的能力增强,从而使与 ZnO 接触部分的 MoS_2的 PL 峰增强。文献[10, 14]中也指出 MoS_2/ZnO 纳米复合结构中的发光性能受其表面结构的影响。随着氧化锌表面 MoS_2颗粒尺寸的增加,表面结构可为光子提供更多的吸收表面,从而使复合结构的光吸收能力明显增强,如图 4(f)所示[10]。Liu 等人[14]对不同波长激发光下的异质结界面电子转移机制做出了解释,如图 4(h)所示。①λ<375nm, ZnO 和 MoS_2价带中电子都可直接激发到导带。在电子转移过程中,具有较大比表面积的 MoS_2薄膜将作为电子接收区域,光生电子与空穴的分离降低了载流子复合率,增强了材料的吸收能力;② 375nm<λ< 507nm,电子从 MoS_2的价带被激发到导带,然后转移到 ZnO 的缺陷能级,在这个过程中 MoS_2在可见光波段起主要吸收作用;③ λ >507nm 时,电子仍可被激发到 MoS_2的导带上,ZnO 的缺陷能级对电子-空穴对的分离起重要作用。MoS_2/ZnO 复合结构可由两种不同能带宽度半导体的协同吸附捕获大部分波段的太阳光谱,使其在光伏器件中的应用性能增加。

1.2.4 MoS_2/ZnO 异质结在光电探测器中的应用

光电探测器在生物和化学分析、通信、导弹探测和天文研究等多个领域都有潜在的应用前景。当探测器表面有光照射时,如果材料禁带宽度小于入射光光子的能量,即 $Eg<h\nu$,则价带电子可以跃迁到导带形成光电流。光电探测器的基本工作机理包括三个过程:①光生载流子在光照下产生;②载流子扩散或漂移形成电流;③光电流在放大电路中放大并转换为电压信号。

光电探测器性能的表征参数主要有以下 4 个参数:①响应度 R,也称为灵敏度或光响应率,定义为光电探测器的输出信号,即光生电流 I_P与输入光的功率 P 之比;②响应时间 τ,响应时间反映了光电探测器对光信号的响应速度,分为上升时间(响应从峰值的 10%上升到 90%的所需时间)和下降时间(响应从峰值的 90%衰减至 10%所用时间);③量子效率 Q_E,在某一特定波长上,每秒钟内产生的光电子数与入射光量子数之比。量子效率是描述光电转换器件光电转换能力的一个重要参数,分为外量子效率和内量子效率。外量子效率 E_{QE}为收集到的电子数与入射光子数之比;内量子效率 I_{QE}为流过器件的电子数目与入射在器件表面上的光子数之比。④光谱响应,基于不同材料制备出的光电探测器对特定的波长或者一定范围内的光谱长度反应。光谱响应反应的是光电探测器对不同波长入射辐射的响应。

21 世纪以来,随着二维材料研究的深入,二维材料由于超薄的厚度、强的光-物质相互作用、宽范围的光谱敏感性等优点,使其成为发展下一代室温、宽波段、超灵敏、柔性的高性能光电探测器的理想候选材料[36]。二硫化钼的可调带隙(1.3~1.8eV)使其具有优异的和广泛可调的光电性能[3-5],特别适合于从可见到近红外(NIR)范围内的光传感。高迁移率(~500$cm^2V^{-1}s^{-1}$)和高吸收系数(2×10^5cm^{-1})使 MoS_2成为高灵敏度可见光检测的热门光电材料。

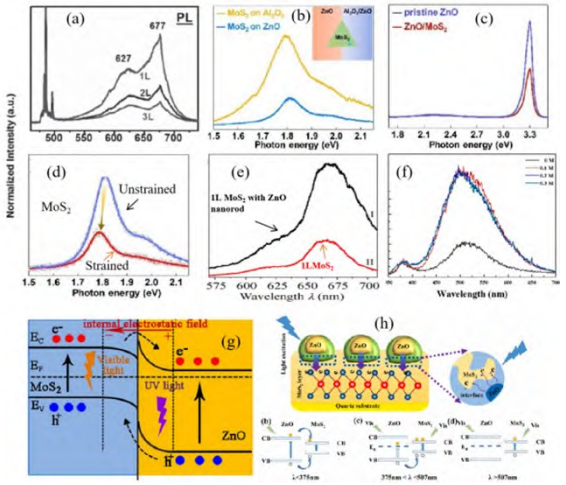


图 4 (a)单层,双层和三层 MoS_2 的 PL 谱[1];(b)在 ZnO 和 Al_2O_3 衬底上制备的单层 MoS_2 的 PL 光谱,插图为 MoS_2 在两种衬底上生长的示意图[18];(c)325nm 激发光下的纯 ZnO 和 ZnO/MoS_2 异质结的 PL 光谱[18];(d)非应变和应变下的单层 MoS_2 的 PL 光谱[18];(e)单层 MoS_2 和在 ZnO 纳米柱覆盖下的 MoS_2 的 PL 光谱[35];(f)不同 MoS_2 浓度下制备的 MoS_2/ ZnO 异质结(随浓度的增加,ZnO 表面的 MoS_2 颗粒尺寸增大)的 PL 光谱[10];(g)MoS_2/ZnO 纳米异质结在紫外-可见光作用下的电荷产生和转移过程示意图[32];(h)MoS_2/ZnO 异质结在不同波长激发光下的多种电荷转移过程示意图[14]

Fig.4 (a) Photoluminescence of the monolayer, bilayer and trilayer MoS_2 sheets[1]; (b) The PL spectra of 1L-MoS_2 on the ZnO and Al_2O_3 substrates. Inset: The schematic of the 1L-MoS_2 on the different substrates (ZnO and Al_2O_3[18]; (c) The PL spectra of ZnO with MoS_2 and pristine ZnO under 325 nm excitation[18]; (d) PL spectra of unstrained 1L-MoS_2 and strained 1L-MoS_2[18]; (e) PL spectra of the MoS_2 covered and uncovered with ZnO nanorods [35]; (f) PL spectra of MoS_2/ZnO thin films with increasing MoS_2 concentration (the particle size increases with the MoS_2 concentration)[10]; (g) Schematic diagram of the charge generation and transfer process under the UV-vis light in MoS_2/ZnO nano-heterojunctions[32]; (h) Possible electron transfer diagrams of MoS_2/ZnO junctions under different irradiation wavelength intervals [14]

在过去的几年里,基于 2D MoS_2 的各种光电探测器被制作出来并对其进行了深入的研究[7-8]。刘阳等人[31]在对单层 MoS_2 的光电测试中发现,在暗室、室内自然光和钠灯光源照射下,单层 MoS_2 构建的器件显现出良好的电流对称性和光电响应特性。Lee 等人[37]利用 MoS_2 带隙随材料厚度的变化而变化的特点设计了不同波长对应的光电探测器。但由于 MoS_2 晶体的光吸收低、载流子寿命长,几乎所有 MoS_2 基光电探测器都存在光响应率低、响应时间慢的问题,严重影响了检测性能。为解决这些问题,研究人员尝试将 MoS_2 与其他材料相结合来提高光电探测器的性能。面对这一困难,ZnO 基光电探测器可实现无源工作模式[38],在 Krivchenko 等人[39]的工作中 ZnO 基光电探测器也显示了 18%的外量子效率和超低暗电流。但由于氧化锌内存在锌空位以及氧空位,所以暴露在空气中的 ZnO 会捕捉空气中的氧气,产生大量俘获态,这个过程十分缓慢,使得器件的响应时间和恢复时间变得缓慢。于是通过构建 MoS_2/ZnO 异质结构来实现高性能光电探测器有望在紫外-可见光波段展现更好的性能。

朱芸等人[40]构建的 ZnO/MoS_2 异质结的 I-V 曲线显示了良好的整流性和光伏性。Kim[10]等人通过简单的水热和溶胶-凝胶自旋涂层方法,成功地合成了具有 II 型能带排列的 MoS_2/ZnO 异质结构,并研究了在多个 MoS_2 浓度下的异质结特性,结果显示异质结暗电流低于 ZnO 薄膜的暗电流。Lv[17]等人的结果也显示在波长为 220 nm 的深紫外光照射下,在所有测试的不同栅极电压下,ZnO/MoS_2 探测器中的光电流和光响应值都高于氧化锌基探测器。Xue[41]等人对 MoS_2 进行 SF6 掺杂实现了由 n 型向 p 型的转变,将掺杂后的 MoS_2 与 ZnO 结合形成异质结后,显示了良好的整流性。在 365nm 光照下显示出了 52.7%的外量子效率。与此同时,在施加 23MPa 压力时,在压电-光电作用下,探测器光电流增强了 4 倍。

Ning 等人[42]通过磁控溅射将薄层 MoS_2 沉积在 ZnO 纳米柱阵列上,利用 ZnO 纳米柱阵列的光捕获效应来增强薄层二硫化钼的光吸收,其器件结构和性能表现如图 5(ai)-(aiii)所示。通过此结构制备出了可以从紫外到可见光和近红外的宽带光谱响应的光电探测器。与 ZnO 和 MoS_2 平面异质结相比,ZnO/MoS_2 核壳阵列的光电流显著增加了约 60 倍。Zhang[9]等人通过旋涂法将 ZnO 纳米线与 MoS_2 薄片结合制备了 ZnO/MoS_2 异质结光电探测器,结构如图 5(ci)所示,此探测器显示出 300nm~700nm 波段的出色宽带光响应。他们分别在 365 nm 和 532 nm 光照下对器件进行测试,器件都能表现出良好的光响

应稳定性和响应速度,如图 5(ci)和(ciii)所示[9]。

当氧化锌基紫外光探测器暴露在黑暗中时,氧原子会通过与氧化锌表面附近的自由电子结合,从而被吸附到氧化锌表面,氧化锌表面附近自由电子数量的减少导致一个耗尽区的形成,从而降低了 ZnO 基紫外光电探测器的电导率。因此,MoS_2/ZnO 薄膜的暗电流(低于氧化锌薄膜)是由于在氧化锌表面吸附了更多的氧原子。此外 MoS_2/ZnO 薄膜的表面积越大,导致吸附的氧原子数增加,暗电流值减小[10]。当 ZnO 基紫外光探测器暴露在紫外光下时,通过吸收光子能量产生电子-空穴对。此时光电子就会在偏置电压的作用下向电极移动,从而增加光电流。此外,光生空穴向吸附在氧化锌表面的氧原子移动,并与氧离子结合,从而减小了耗尽区域的宽度。从吸附的氧中释放的自由电子移动到电极,并促进光电流的增加。考虑表面积对光电性能的影响,混合维度的 MoS_2/ZnO 异质结探测器相比平面结构的探测器显示出更优越的性能。

由于在二硫化钼和氧化锌的界面上形成了 II 型能带,如图 5(e)所示[10],加入二硫化钼粒子大大提高了光电流的增量。当 MoS_2/ZnO 异质结暴露在紫外光下时,在氧化锌和二硫化钼中产生了电子-空穴对。其中,二硫化钼中的光生电子从二硫化钼的导带移动到氧化锌的导带,而氧化锌中的光生空穴从氧化锌的价带移动到二硫化钼的价带。电子和空穴流动的改变导致光电流增加的自由电子数增加了,从而使 MoS_2/ZnO 薄膜比氧化锌薄膜具有更高的光电流[10]。

II 型能带结构可以有效地分离载流子,从而增强光电流,但载流子的复合时间也会延长,导致响应时间较慢。Nazir 等人[43]和 Zhou 等人[44]通过在单层 MoS_2上装饰一层薄层的 ZnO 量子点,实现了二硫化钼光电探测器的高光响应率。结果显示,单层 MoS_2上修饰了 ZnO 量子点后,在多个入射光波长下,异质结探测器的响应度和响应时间都优于 MoS_2探测器的性能,如图 5(di-dii)所示[43-44]。MoS_2与 ZnO 异质结之间形成了 n-n 型的 I 型能带,电子从 ZnO 量子点中注入到 MoS_2中,从而增强了载流子迁移率。当这些异质结构在紫外光下照射时,ZnO 量子点和二硫化钼都强烈吸收光子,电子从价带移动到导带,从而发生了“I”过程。然后,电子从 ZnO 导带注入二硫化钼导带,通过热搅拌形成“V”过程,同

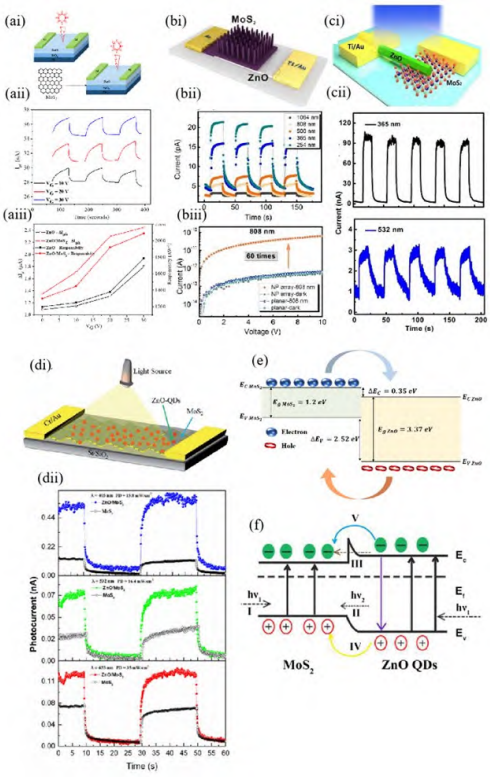


图 5　MoS_2/ZnO 异质结光电探测器结构及性能

(ai) ZnO 和 ZnO/MoS_2探测器结构示意图;(aii)和(aiii):不同栅压下 ZnO 和 ZnO/MoS_2探测器光电流随时间的变化[17];(bi) ZnO/MoS_2核壳纳米阵列探测器结构示意图;(bii) ZnO-MoS_2核壳纳米阵列在 808nm 光照下随光照强度增加而产生的时间响应;(biii) ZnO-MoS_2核壳纳米阵列和平面异质结在黑暗和 808nm 光照下测量的 I-V 曲线[42];(ci) p-MoS_2/n-ZnO 异质结探测器结构示意图;(cii) p-MoS_2/n-ZnO 异质结光电探测器在 365 nm 和 532 nm 光照下的瞬态光响应[9];(di) ZnO 量子点修饰的 MoS_2探测器结构示意图[43];(dii) ZnO 量子点修饰的 MoS_2基探测器在不同光照下的光电流[44];(e) ZnO/MoS_2异质结形成的 II 型能带示意图[10];(f) ZnO/MoS_2异质结形成的 I 型能带结构示意图[44]

Fig.5 Schematics and performance of MoS_2/ZnO heterojunction photodetectors (ai) Schematics of ZnO and ZnO/MoS_2 photodetectors; (aii) and (aii): Photocurrent over time under different V_G in ZnO (aii) and ZnO/MoS_2 (aiii) photodetectors[17]; (bi) Schematic illustration of the ZnO-MoS_2 core-shell nanopillars array-based photodetector;); (bii) Temporal response of the ZnO-MoS_2 core-shell NP array with increasing light intensities under 808 nm light illumination; (biii) I-V curves of ZnO-MoS_2 core-shell nanopillars array heterojunction and planar heterojunction measured in the dark and under light illumination (808 nm); (ci-cii)[9]: (ci) Schematic diagram of p-MoS_2/n-ZnO heterostructure photodetector; (cii) Transient photoresponse of p-MoS_2/n-ZnO heterostructure photodetector under 365 nm and 532 nm light irradiations; (di) Schematic of ZnO-quantum dots decorated MoS_2 photodetector[43]; (dii) Photocurrent of pristine device and ZnO-quantum dots/MoS_2 photodetector illuminated under different wavelength[44]; (e) Schematic diagram of type-II band alignment at the interface between ZnO and MoS_2[10]; (f) Type I band diagram of MoS_2/ZnO heterojunction[44]

时,ZnO 量子点导带中的部分电子进入二硫化钼导带,形成“III”过程。然后,ZnO 量子点价带中的空穴向二硫化钼中相应的价带移动,如“IV”过程所示。同时,自发发射可以使 ZnO 的导带中的一些电子产生,并回到价带发射光子,将二硫化钼价带中的电子激发到导带,形成“II”过程。另一方面,当混合器件被可见光照亮时,也发生了类似的过程,此时被激发的电子来自 ZnO 量子点的缺陷能级,这种情况下,激发光的能量可大大降低。因此,这些激发态电子-空穴对从氧化锌量子点转移到二硫化钼,与 MoS_2 器件相比,可显著增强光电流。

3 总结

MoS_2/ZnO 异质结在光电探测器应用上取得了优异的性能表现。在探测范围,光响应度、响应速度和稳定性上都表现出了领先的优势。但是目前对于异质结的制备,探测器结构的设计制备和性能的有效控制还处在研究阶段。除此之外 ZnO 与 MoS_2 异质界面间电子结构的控制和载流子输运的调控方法还有待深入研究,从而进一步优化 MoS_2/ZnO 异质结在光电探测器和其他电子器件中的应用。

参考文献:

[1] Lee Y H, Zhang X Q, Zhang W, et al. Synthesis of large-area MoS_2 atomic layers with chemical vapor deposition[J]. Advanced Materials, 2012, 24(17): 2320-2325.

[2] Liu K K, Zhang W J, Lee Y H, et al. Growth of large area and highly crystalline moS_2 thin layers on insulating substrates[J]. Nano Letters, 2012, 12(3): 1538-1544.

[3] Yang R, Fan J N, Sun M T. Transition metal dichalcogenides (TMDCs) heterostructures: Optoelectric properties [J]. Frontiers of Physics, 2022, 17(4): 1-16.

[4] Ganatra R, Zhang Q. Few layer MoS_2: a promising layered semiconductor[J]. ACS Nano, 2014, 8(5): 4074-4099.

[5] Mak K F, Lee C, Hone J, et al. Atomically thin MoS_2: a new direct-gap semiconductor[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(13): 136805.

[6] Xiao J W, Zhang Y, Chen H J, et al. Enhanced performance of a monolayer MoS_2/WSe_2 heterojunction as a photoelectrochemical cathode[J]. Nano-Micro Letters, 2018, 10(4): 1-9.

[7] Li N N, Yao W, Cheng R Q, et al. Strongly coupled van der Waals heterostructures for high-performance infrared phototransistor[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114 (10): 103501.

[8] Lin T, Wang J Z. Strategies toward high-performance solution-processed lateral photodetectors[J]. Advanced Materials, 2019, 31(35): 1901473.

[9] Zhang J, Liu Y T, Zhang X L, et al. High-performance ultraviolet-visible light-sensitive 2D-MoS_2/1D-ZnO heterostructure photodetectors[J]. Chemistry Select, 2020, 5 (11): 3438-3444.

[10] Kim D, Leem Y J. Modified interfaces of ZnO thin films through MoS_2 addition in precursor solution for MoS_2/ZnO heterojunctions and their enhanced ultraviolet photodetection properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 905: 164168.

[11] Deep J, Marks J, Mark C H. Mixed-dimensional van der Waals heterostructures[J]. Nature materials, 2017, 16 (2): 170-181.

[12] 申德振, 梅增霞, 梁会力,等. 氧化锌基材料, 异质结构及光电器件[J]. 发光学报, 2014, 35(1): 1.

[13] Gautam C, Arpit V, Priyanka C, et al. Development of 2D based ZnO-MoS_2 nanocomposite for photodetector with light-induced current study[J]. Optical Materials, 2022, 123: 111860.

[14] Liu H Q, Yao C B , Jiang C H, et al. Preparation, modification and nonlinear optical properties of semiconducting MoS_2 and MoS_2/ZnO composite film[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 138: 106905.

[15] Gang R, Xu L, Xia Y, et al. Fabrication of MoS_2 QDs/ZnO nanosheet 0D/2D heterojunction photocatalysts for organic dyes and gaseous heavy metal removal[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2020, 579: 853-861.

[16] Coleman J, Mustafa L, Arlene O, et al. Two-dimensional nanosheets produced by liquid exfoliation of layered materials[J]. Science, 2011, 331(6017): 568-571.

[17] Lv W Q, Liu J, He Y, et al. Atomic layer deposition of ZnO thin film on surface modified monolayer MoS_2 with enhanced photoresponse [J]. Ceramics International, 2018, 44(18): 23310-23314.

[18] Liu B S, Liao Q L, Zhang X K, et al. Strain-engineered van der waals interfaces of mixed-dimensional heterostructure arrays[J]. ACS Nano, 2019, 13(8): 9057-9066.

[19] Hsu H P, Lin D Y, Lu G T, et al. Optical and electrical transport properties of ZnO/MoS_2 heterojunction p-n structure[J]. Materials Chemistry and Physics, 2018, 220: 433-440.

[20] Frisenda R, Efrén N, Patricia G, et al. Recent progress

in the assembly of nanodevices and van der Waals heterostructures by deterministic placement of 2D materials[J]. Chemical Society Reviews, 2018, 47(1): 53-68.

[21] Andres C G , Michele B, Rianda M, et al. Deterministic transfer of two-dimensional materials by all-dry viscoelastic stamping[J]. 2D Materials, 2014, 1(1): 011002.

[22] Dean C R, Andrea F Y, Inanc M, et al. Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics[J]. Nature nanotechnology, 2010, 5(10): 722-726.

[23] 廖　荣, 康唐飞, 邓世杰,等. 原子层沉积技术的应用现状及发展前景[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(10): 5.

[24] Kang M A, Kim S, Jeon I S, et al. Highly efficient and flexible photodetector based on MoS_2-ZnO heterostructures[J]. RSC Advances, 2019, 9(34): 19707-19711.

[25] Putritama V, Vivi F, Azzuliani S. The effect of the layer number of MoS_2 nanosheets on the photocatalytic efficiency of ZnO/MoS_2[J]. Surfaces and Interfaces, 2020, 21: 100745.

[26] Dam S, Thakur A, Amarendra G, et al. Synthesis and characterisation of MoS_2 thin films by electron beam evaporation[J]. Thin Solid Films, 2019, 681(JUL.1): 78-85.

[27] 王　俊, 郝　赛. 磁控溅射技术的原理与发展[J]. 科技创新与应用, 2015(2): 1.

[28] 巩晨阳. 磁控溅射制备二硫化钼薄膜的结构与性能研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020.

[29] Tan Y H, Ke Y, Li J Z , et al. MoS_2@ZnO nano-heterojunctions with enhanced photocatalysis and field emission properties[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(6): 064305.

[30] Khan S A, Khan T, Z, et al. Enhanced photoluminescence performance of MoS_2 nanostructures after amalgamation with ZnO NPs[J]. Optik, 2020, 220: 165201.

[31] 刘　阳, 李梦轲, 李　旺,等. 二维单层 MoS2 半导体材料的制备及光电特性研究[J]. Material Sciences, 2022, 12: 136.

[32] Selvaraj R, Kavi R K, Vijayarangamuthu K. A type-II MoS_2/ZnO heterostructure with enhanced photocatalytic activity[J]. Materials Letters, 2019, 243: 183-186.

[33] Ardahe M, Mohammad R H, Mahmood G. Effect of growth temperature on physical properties of MoS_2 thin films synthesized by CVD[J]. Journal of Electronic Materials, 2019, 49(2): 1002-1008.

[34] David L, Liu X H, Jason W C, et al. Band gap engineering with ultralarge biaxial strains in suspended monolayer MoS_2[J]. Nano Letters, 2016, 16(9): 5836-5841.

[35] Zhang K N, Zhang Y, Zhang T N, et al. Vertically coupled ZnO nanorods on MoS_2 monolayers with enhanced Raman and photoluminescence emission[J]. Nano Research, 2014, 8(3): 743-750.

[36] Yin J B, Tan Z J, Hao H, et al. Ultrafast and highly sensitive infrared photodetectors based on two-dimensional oxyselenide crystals[J]. Nature communications, 2018, 9(1): 1-7.

[37] Lee H S, Min S W, Chang Y G, et al. MoS_2 nanosheet phototransistors with thickness-modulated optical energy gap[J]. Nano Letters, 2012, 12(7): 3695-3700.

[38] Shen H, Shan C X, Li B H, et al. Reliable self-powered highly spectrum-selective ZnO ultraviolet photodetectors [J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(23): 232112.

[39] Krivchenko V A, Lopaev D V, Pashchenko P V, et al. UV detectors based on nanocrystalline ZnO films[J]. Technical Physics, 2008, 53(8): 1065-1069.

[40] 朱　芸, 米文俊, 马金楼,等.MoS_2/ZnO 异质结的光电特性[J]. 物理实验, 2015(10): 1-5.

[41] Xue F, Chen L, Chen J, et al. p-Type MoS_2 and n-type ZnO diode and its performance enhancement by the piezo-phototronic effect[J]. Advanced Materials, 2016, 28(17): 3391-3398.

[42] Ning, L, Jiang T, Shao Z, et al. Light-trapping enhanced ZnO-MoS_2 core-shell nanopillar arrays for broadband ultraviolet-visible-near infrared photodetection[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(26): 7077-7084.

[43] Nazir G, Khan M F, Imtisal A, et al. Enhanced photoresponse of ZnO quantum dot-decorated MoS_2 thin films [J]. RSC Advances, 2017, 7(27): 16890-16900.

[44] Zhou Y H,Zhang Z B, Xu P, et al. UV-visible photodetector based on I-type heterostructure of ZnO-QDs/monolayer MoS_2[J]. Nanoscale Research Letters, 2019, 14(1): 364.