

激光与光电子学进展

高响应度光电检测器件石墨烯-MoS₂
垂直异质结的制备

姚杰, 缪鑫, 王帅, 顾嫣芸, 高铭良, 万茜*

江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122

摘要 石墨烯(Gr)及其他类石墨烯的二维(2D)材料,包括六方氮化硼(h-BN)、过渡金属硫族化合物(TMDCs)等,自发现以来便以其独特的物理性质受到了研究人员的青睐。由这些二维层状材料相互堆叠形成的范德瓦尔斯异质结(vdW)因具有很多优异的性质而成为最近的研究热点。本课题组首先制备了大面积、高质量单层石墨烯及二硫化钼(MoS₂),然后将石墨烯薄膜利用光刻及等离子体刻蚀技术制作成石墨烯条带,最后将MoS₂转移至石墨烯条带上构成石墨烯-MoS₂垂直异质结(Gr-MoS₂)。测试后发现,基于Gr-MoS₂垂直异质结的光电探测器的光电流为单层MoS₂器件的250倍,光响应度为单层MoS₂器件的750倍。光电性能的提高证明了这种由石墨烯和MoS₂堆叠而成的异质结在将来的光电器件及光电子集成电路中具有广阔的应用前景。

关键词 材料; 光电探测器; 石墨烯-MoS₂垂直异质结; MoS₂; 石墨烯; 二维材料

中图分类号 O472

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1516024

Preparation of Graphene-MoS₂ Vertical Heterojunction for
High-Responsivity Photodetectors

Yao Jie, Miao Xin, Wang Shuai, Gu Yanyun, Gao Mingliang, Wan Xi*

Internet of Things Engineering Institute, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122

Abstract Graphene (Gr) and other Gr-like two-dimensional (2D) materials, including hexagonal boron nitride and transition metal chalcogenides, have been widely investigated by researchers owing to their unique physical properties. Accordingly, the van der Waals heterojunctions formed by stacking these 2D layered materials have become a research hotspot because of their unique and excellent physical properties. Here, a large-area and high-quality single-layer Gr film and a molybdenum disulfide (MoS₂) monolayer were synthesized. The Gr film was patterned into microstrips using photolithography and plasma etching techniques. Finally, the MoS₂ monolayer was transferred onto the Gr strips to form the Gr-MoS₂ vertical heterojunction. Compared with that of the photodetectors based on the MoS₂ monolayer, the performance of the photodetectors based on the Gr-MoS₂ vertical heterojunctions significantly increase. The photocurrent and photoresponsivity of the photodetector based on the Gr-MoS₂ vertical heterojunction are 250 and 750 times those of the MoS₂ monolayer, respectively. The improved photoelectric performance proves that this heterojunction formed by stacking Gr and MoS₂ has broad application prospects in future optoelectronic devices and optoelectronic integrated circuits.

收稿日期: 2021-01-13; 修回日期: 2021-01-21; 录用日期: 2021-01-22

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61804067)、江苏省自然科学基金青年项目(BK20170193)、江苏省“双创博士”资助项目(1256010241180240)、江苏省“六大人才高峰”资助-第十五批(DZXX-021)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JUSRP11746, JUSRP51726B)、江南大学新进人员科研启动基金(1255210322161270)

通信作者: *xwan@jiangnan.edu.cn

Key words materials; photodetector; graphene-molybdenum disulfide vertical heterojunction; molybdenum disulfide; graphene; two-dimensional materials

OCIS codes 160.4236; 160.6000; 250.0040

1 引言

石墨烯(Gr)自 2004 年被发现以来就以其独特的物理性质成为研究的热点。作为一种二维层状材料,石墨烯由一层碳原子按照六方晶格排列而成,其超高的载流子迁移率、良好的机械柔韧性和透明度使其在透明电极^[1]、石墨烯场效应晶体管(FET)^[2]、气体传感器^[3]、激光器件^[4]、可穿戴器件等^[5]方面具有广阔的应用前景。然而,石墨烯的零带隙限制了它在半导体光电器件上的应用^[6]。二维过渡金属硫族化合物,如二硫化钼(MoS_2)、二硫化钨(WS_2)、二硒化钨(WSe_2)等,由于具有可调的禁带宽度而在光电器件上具有很大的应用优势^[7],这使其作为与石墨烯互补的新兴二维材料被广泛应用于光催化及 FET、太阳能电池等光电器件中^[8]。与此同时,自 Dean 等^[9]在 2010 年将石墨烯与 h-BN 垂直堆叠,首次制备出二维垂直异质结以来,这种基于二维材料的垂直异质结构就一直是研究的热点^[10],而其中将石墨烯与 MoS_2 垂直堆叠构成各种不同结构的垂直异质结更是受到了最为广泛的关注。2013 年, Yu 等^[11]采用微机械剥离将 MoS_2 转移至石墨烯上,然后将两个金属电极中的漏极制作在 MoS_2 上,将源极制作在石墨烯上,制造出了垂直场效应晶体管(VFET),其开关比大于 10^3 ,电流密度高达 5000 A/cm^2 。同年,他们采用相同的方法制造出了 Gr- MoS_2 -Gr 的三明治结构^[12],即 MoS_2 在底层石墨烯和顶层石墨烯中间,金属电极制作在底层和顶层石墨烯上;基于此种结构的光电转换器件的外量子效率和内量子效率分别可达到 55% 和 85%。2014 年, Zhang 等^[13]利用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)辅助转移技术将石墨烯转移到底层 MoS_2 上面,并将两个金属电极都制作在顶层石墨烯上;基于此种结构的光电探测器的光响应度高达 10^7 A/W 。同年, Lee 等^[14]利用玻璃/聚二甲基硅氧烷辅助转移方法将 MoS_2 转移至两片分开的石墨烯上,其中, MoS_2 作为沟道,两个金属电极制作在两旁的石墨烯上;基于此种结构的 MoS_2 场效应晶体管的开关比为 10^7 ,迁移率高达 $31.34 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 。

本文制备的 Gr- MoS_2 垂直异质结的结构与制作

工艺皆与以上四种结构有所不同。首先采用低压化学气相沉积法制备大面积、高质量的石墨烯薄膜,然后利用光刻掩模和等离子体刻蚀工艺将石墨烯薄膜制作成形状规则的石墨烯条带,之后将生长得到的高质量单层 MoS_2 通过 PMMA 辅助转移技术转移至石墨烯条带上,最后将两个金属电极制作在下层石墨烯条带上。相比于机械剥离法,本文制备的 Gr- MoS_2 垂直异质结的面积更大;同时,利用光刻掩模和等离子体刻蚀工艺可以对底层石墨烯进行裁剪,得到规则的形状,有利于材料的堆叠及光电器件的制造。实验结果显示,与单纯的 MoS_2 器件相比,基于此种 Gr- MoS_2 垂直异质结的光电探测器的光电流和光响应度都提高了两个以上数量级,为将来集成光电子的发展提供了更多可能性。

2 实验部分

2.1 单种二维材料的生长

石墨烯卓越的性质及应用前景激励着人们探索出各种各样的方法来制备大面积、高质量的石墨烯薄膜^[15]。其中,在铜(Cu)表面生长石墨烯的低压化学气相沉积法由于操作相对简单、成本较低等优势成为目前的主要方法^[16]。本文即采用此方法制备单层石墨烯薄膜。首先将厚度为 $30 \mu\text{m}$ 、纯度为 99.999% 的工业级铜箔放置在一块石英板上,并把石英板置于化学气相沉积(CVD)熔炉的第二个温区,温度升至 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$,在 30 mL/min 的氢气(H_2)气氛下保持 1 h,将多晶铜退火成(111)晶相的单晶铜箔。然后将熔炉温度降至 $1035 \text{ }^\circ\text{C}$,保持 15 min,与此同时通入 35 mL/min 的甲烷(CH_4)和 10 mL/min 的 H_2 ,在单晶铜表面生长石墨烯薄膜。生长结束后将 CVD 熔炉迅速降至室温。

单层 MoS_2 的制备采用常压化学气相沉积(APCVD)法。用石英舟装载 $1\sim 2 \text{ g}$ 硫粉放置于第一温区的中心,温度保持在 $150\sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$ 。将 $3\sim 5 \text{ mg}$ 三氧化钼(MoO_3)放置于陶瓷舟内,并把 300 nm 厚的 SiO_2/Si 衬底的光滑一面朝向 MoO_3 粉末放于陶瓷舟上方,将整个样品置于 CVD 熔炉的第二温区。先通入 500 mL/min 的氩气(Ar) 15 min,排空管内的空气,在整个生长过程中氩气流量始终保持在

50 mL/min。将第二温区在 30 min 内升至 750 °C，保持 10 min，生长结束后自然冷却至室温。MoS₂ 生长装置如图 1 所示。

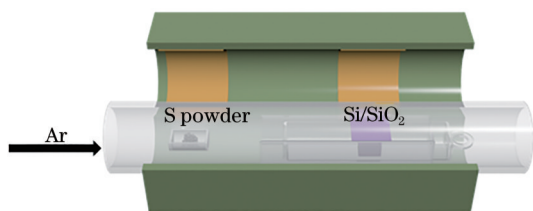


图 1 基于 APCVD 的 MoS₂ 生长装置图

Fig. 1 Experimental setup for the growth of MoS₂ based on APCVD

2.2 石墨烯-MoS₂垂直异质结的制备

得到大面积、高质量的石墨烯薄膜以及单层 MoS₂ 之后，采用 PMMA 辅助转移技术制备石墨烯-MoS₂ 垂直异质结，制备过程如图 2 所示。

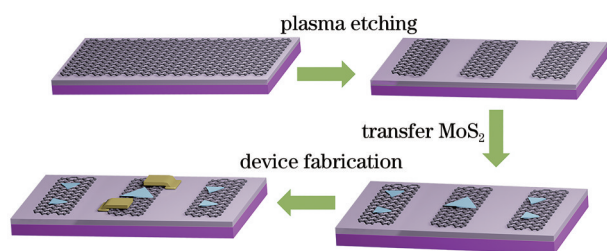


图 2 Gr-MoS₂ 垂直异质结制备流程图

Fig. 2 Schematic illustration of the synthesis of Gr-MoS₂ vertical heterojunction

采用光刻掩模和等离子体刻蚀技术将石墨烯薄膜刻蚀成 100 μm 宽的石墨烯条带，然后将单层 MoS₂ 转移到石墨烯条带上。具体转移过程如下：首先将 PMMA 旋涂在 MoS₂ 样品上，在 120 °C 下烘烤 10 min，然后将样品浸没在 20% HF 溶液中刻蚀掉 SiO₂ 层，接着将悬浮的样品在去离子水中清洗，再用事先准备好的石墨烯条带将样品捞起，然后在真空烤箱中烘烤 60 min，接着用丙酮去除掉 PMMA，用异丙醇 (IPA) 清洗后再用氮气吹干。至此，就得到了 Gr-MoS₂ 垂直异质结。

2.3 材料表征与光电器件制造

为确定生长出的材料的质量以及成功制备出了 Gr-MoS₂ 垂直异质结，本课题组对材料进行了表征。利用 Renishaw 显微共焦拉曼光谱仪对材料进行 Raman (拉曼)、PL (光致发光) 表征。采用波长为 532 nm、功率为 0.24 mW 的激光轰击样品，曝光时间为 10 s。使用 NT-MDT 原子力显微镜 (AFM) 对材料的表面形貌进行分析。

采用光刻技术制造光电器件。在样品上旋涂光刻胶后在 100 °C 下烘烤 1 min，然后采用无掩模紫外光刻工艺曝光，之后进行显影，处理完成后就会在光刻胶上留下源极与漏极的图案。采用热蒸发技术在样品上沉积 5 nm 厚的铬 (Cr) 层和 50 nm 厚的金 (Au) 层。去除多余的光刻胶，光电器件即制备完成。器件的测试在 CGO-4 型低温真空探针台上进行。电流-电压曲线使用 Keithley 2636B 源表进行测量，并通过 LabVIEW 程序采集数据。

3 分析与讨论

3.1 单层 MoS₂ 的表征

为评估通过 APCVD 生长得到的 MoS₂ 晶体的质量，对其进行了表征，结果如图 3 所示。图 3(a) 是 MoS₂ 的光镜图，图 3(b) 为 MoS₂ 的拉曼光谱和荧光光谱。拉曼光谱显示 MoS₂ 的两个显著特征峰 A_{1g} 和 E_{2g} 分别位于 403 cm⁻¹ 和 385 cm⁻¹ 处，峰间距为 18 cm⁻¹ 表明其为单层，荧光光谱显示其荧光峰位于 675 nm 处，证明其为直接带隙半导体。图 3(c) 为 MoS₂ 的原子力显微镜 (AFM) 形貌图，在边界处的线扫显示其厚度为 0.8 nm，与以前的报道一致^[17]，进一步证明其为单层。图 3(d)~(f) 为 MoS₂ 的拉曼和荧光 mapping (面扫描)，均匀的颜色证明其厚度一致并且质量均匀。

3.2 石墨烯与 Gr-MoS₂ 垂直异质结的表征

首先将在铜箔上生长的石墨烯薄膜转移至 SiO₂/Si 衬底上，如图 4(a) 所示，得到大面积石墨烯薄膜，而后通过光刻及氧气等离子体刻蚀工艺将石墨烯薄膜刻蚀成石墨烯条带，如图 4(b) 所示，再通过 PMMA 辅助转移技术将 MoS₂ 转移到石墨烯条带上即可得到如图 4(c) 所示的 Gr-MoS₂ 垂直异质结结构。

对石墨烯及 Gr-MoS₂ 结构进行拉曼和荧光光谱分析。如图 4(d) 所示，在 1580 cm⁻¹ 和 2680 cm⁻¹ 处有两个特征峰，分别为石墨烯的 G 峰和 2D 峰，并且 2D 峰的强度是 G 峰的两倍，证明该样品是高质量的单层石墨烯^[18]。图 4(e) 所示是图 4(c) 中的 Gr-MoS₂ 的拉曼光谱，可以发现 4 个显著的特征峰，其中 383 cm⁻¹ 和 403 cm⁻¹ 对应 MoS₂ 的 E_{2g} 峰和 A_{1g} 峰，此外还有石墨烯的两个特征峰，即 1580 cm⁻¹ 处的 G 峰和 2680 cm⁻¹ 处的 2D 峰，表明在这里有两种材料。图 4(f) 为 Gr-MoS₂ 垂直异质结的荧光光谱，可以发现：在波长 675 nm 处有一个高峰对应

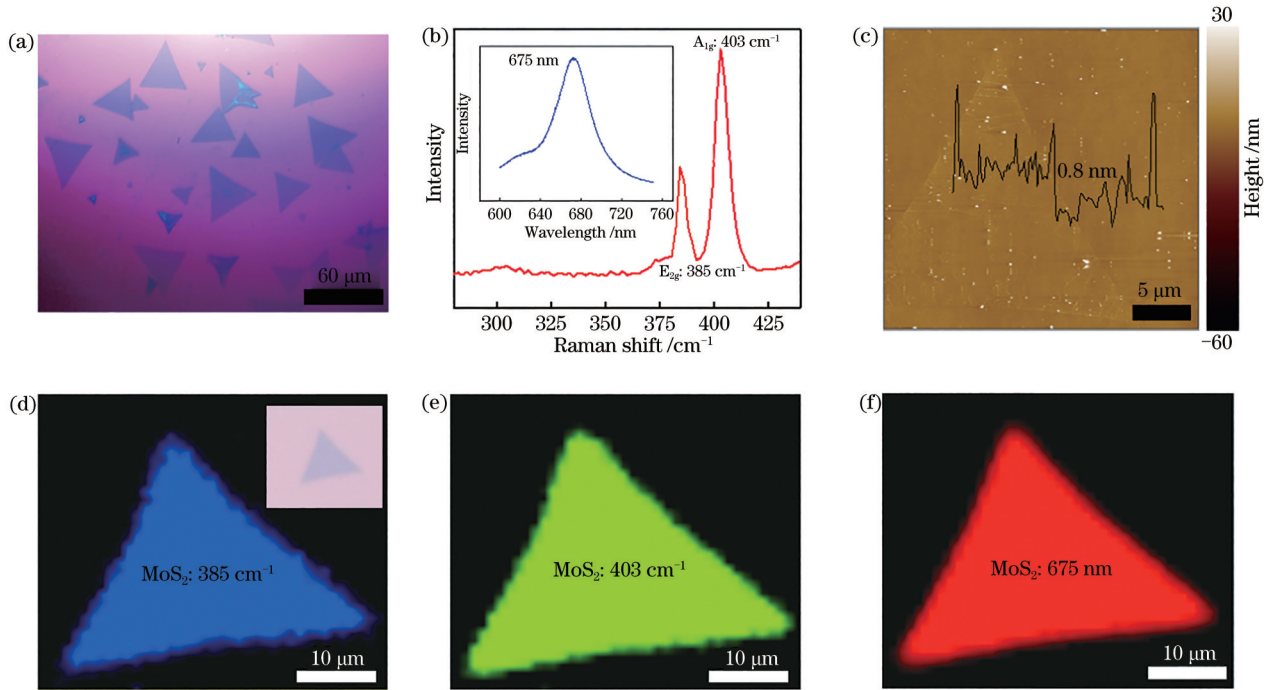


图 3 单层 MoS₂ 的表征。(a) 单层 MoS₂ 的光镜图；(b) MoS₂ 的拉曼光谱图，内插图为 MoS₂ 的荧光光谱；(c) MoS₂ 的 AFM 形貌图，内插图为单层 MoS₂ 的高度轮廓图；(d) (e) MoS₂ 的拉曼 mappings；(f) MoS₂ 的荧光 mapping

Fig. 3 Characterizations of monolayer MoS₂. (a) Optical image of monolayer MoS₂ triangles; (b) Raman spectrum of MoS₂, and the inset shows photoluminescence spectrum of MoS₂; (c) AFM topography of MoS₂, and the inset shows height profile for typical monolayer MoS₂; (d) (e) Raman peak intensity mappings of MoS₂ triangle; (f) PL peak intensity mapping of MoS₂ triangle

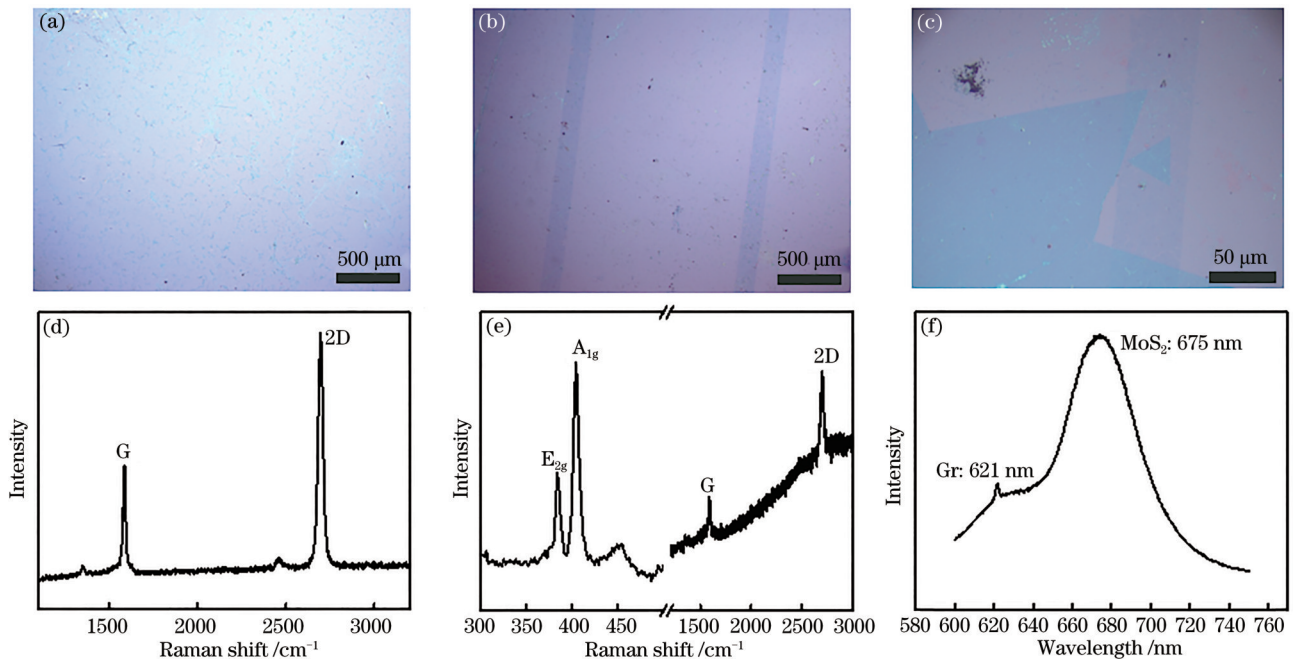


图 4 Gr-MoS₂ 垂直异质结的表征。(a) 单层石墨烯薄膜的光镜图；(b) 等离子体刻蚀后的石墨烯条带；(c) Gr-MoS₂ 垂直异质结的光镜图；(d) 石墨烯的拉曼光谱图；(e) Gr-MoS₂ 垂直异质结的拉曼光谱图；(f) Gr-MoS₂ 垂直异质结的荧光光谱图

Fig. 4 Characterizations of Gr-MoS₂ vertical heterojunction. (a) Optical image of monolayer graphene film; (b) graphene strips after plasma etching; (c) optical image of Gr-MoS₂ vertical heterojunction; (d) Raman spectrum of graphene; (e) Raman spectrum of Gr-MoS₂ vertical heterojunction; (f) photoluminescence spectrum of Gr-MoS₂ vertical heterojunction

MoS₂的荧光峰,同时注意到在 621 nm 处有一个小峰,此为石墨烯的 2D 峰^[19],进一步证明了 Gr-MoS₂ 垂直异质结的形成。

3.3 单层 MoS₂与石墨烯的电学性质

为了评估材料的电学性质,制造了相应的 FET 器件,并计算了其迁移率。图 5(a)为 MoS₂在不同漏源电压(V_{ds})下的转移特性曲线,图 5(b)为 MoS₂在不同栅压(V_{gs})下的输出特性曲线,内插图为 MoS₂器件的光镜图。器件的沟道长度(L)为 30 μm ,宽度(W)为 10 μm 。迁移率的计算公式为

$$\mu = \frac{dI_{ds}}{dV_{gs}} \times \frac{L}{W} \times \frac{1}{C_{ox} \times V_{ds}}, \quad (1)$$

式中: I_{ds} 为漏源电流; C_{ox} 为栅介质电容,取值 11.5 nF/cm²。采用(1)式可得到 MoS₂的迁移率为 2.1 cm²/(V·s),可与之前的报道相媲美^[20]。图 5(c)为石墨烯 FET 在不同 V_{ds} 下的转移特性曲线,相比于 MoS₂高达 10⁶ 的开关比,石墨烯的开关比较低,但石墨烯的导电性明显高于 MoS₂,显示出半金属性质。图 5(d)为石墨烯在不同 V_{gs} 下的输出特性曲线,图右下角为此石墨烯器件的光镜图。

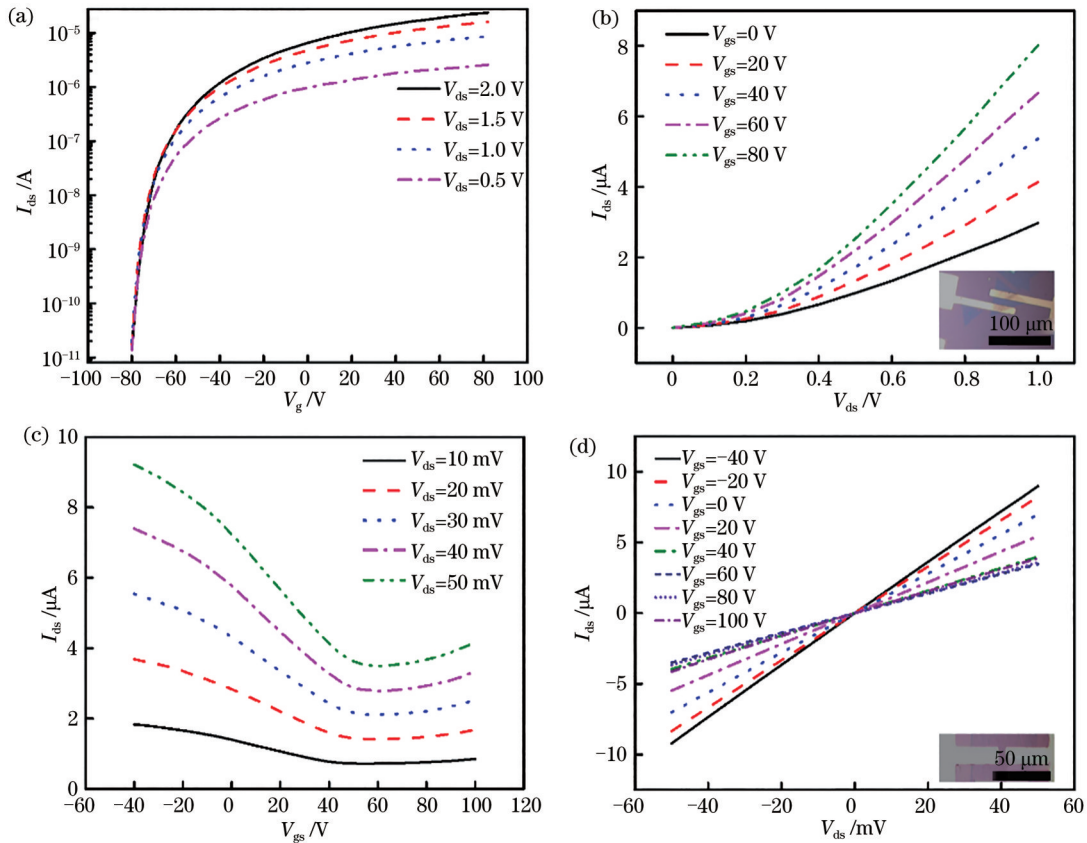


图 5 MoS₂和石墨烯的电学性质。(a) MoS₂在不同 V_{ds} 下的转移特性曲线;(b) MoS₂在不同栅压下的输出特性曲线,内插图为 MoS₂器件的光镜图;

Fig. 5 Electrical properties of MoS₂ and monolayer graphene. (a) Transfer curves under different V_{ds} of MoS₂ device; (b) output curves of the MoS₂ device under different V_{gs} values, and the inset shows an optical image of the MoS₂ device; (c) transfer curves of the graphene device under different V_{ds} values; (d) output curves of the graphene FET device under different V_{gs} values, and the inset shows an optical image of this graphene FET device

3.4 基于 Gr-MoS₂垂直异质结的光电探测器

基于二维材料的合成异质结通常都会产生一些独特的物理性质。在生长得到大面积石墨烯薄膜及高质量的单层 MoS₂之后,将 MoS₂转移到石墨烯上构成 Gr-MoS₂垂直异质结,并基于此制造光电探测器。图 6(a)为此类光电探测器的示意图,即将两个电极制作在石墨烯上,MoS₂在石墨烯上面位

于两个电极之间。

图 6(b)对比了单层 MoS₂与 Gr-MoS₂异质结的光电流与激光开关时间的关系,其中栅压 $V_{gs}=0$ V,漏源电压 $V_{ds}=3$ V,激光波长 $\lambda=532$ nm,功率 $P=38.5$ μW 。MoS₂的光电流约为 8 nA,Gr-MoS₂异质结产生的光电流约为 2 μA ,后者为前者的 250 倍,但其光响应噪声增加明显,这是由于石墨烯的导电性

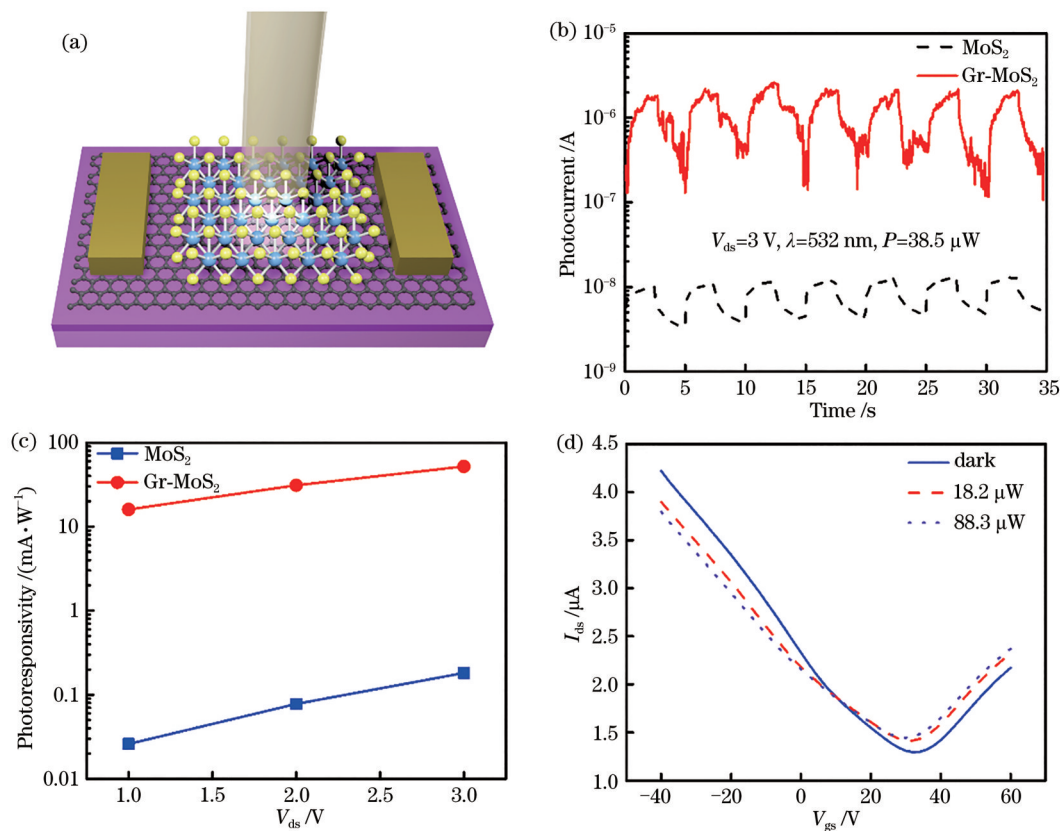


图 6 Gr-MoS₂垂直异质结与单层 MoS₂光电探测器。(a) Gr-MoS₂垂直异质结光电探测示意图;(b) Gr-MoS₂与 MoS₂光电流的开关特性;(c) Gr-MoS₂与 MoS₂的光响应度;(d) Gr-MoS₂垂直异质结的漏源电流(I_{ds})与栅压(V_{gs})在无光以及不同激光功率下的关系

Fig. 6 Photodetector based on vertical Gr-MoS₂ heterostructure and monolayer MoS₂. (a) Schematic illustration of the photodetector based on vertical Gr-MoS₂ heterostructure; (b) photocurrent switching operation of MoS₂ and Gr-MoS₂; (c) photoresponsivity of monolayer MoS₂ and Gr-MoS₂; (d) source-drain current (I_{ds}) versus backgate voltage (V_{gs}) for Gr-MoS₂ in the absence of light and in the presence of light with various illumination powers

比 MoS₂大得多,导致暗电流增大,因此噪声增加。图 6(c)给出了单层 MoS₂与 Gr-MoS₂光电探测器在不同漏源电压 V_{ds} 下的光响应度,可见,随着 V_{ds} 的增大,光响应度逐渐增大,但在同一漏源电压下,Gr-MoS₂垂直异质结光电探测器的光响应度远高于单层 MoS₂器件:当 $V_{ds}=1$ V 时,单层 MoS₂器件的光响应度为 0.02 mA/W,Gr-MoS₂光电探测器的光响应度为 15 mA/W(为前者的 750 倍)。这主要是因为,在石墨烯与 MoS₂的界面处会产生三种电场,包括外加静电场、内建电场、由带电杂质和物质吸附产生的电场,其中内建电场的形成是由于石墨烯与 MoS₂接触时,石墨烯中的电子转移到 MoS₂上,使得石墨烯带正电,MoS₂带负电,电场方向由石墨烯指向 MoS₂。这三种电场相互叠加形成最终的有效电场,其方向也始终是由石墨烯指向 MoS₂。当光照射 MoS₂时会产生电子-空穴对,光电子在有效电

场的作用下更倾向于流入石墨烯中,进一步提高了光生电子和空穴的分离效率^[21]。除了电子-空穴对的分离之外,由于电子在石墨烯中有很高的迁移率而空穴在 MoS₂中有很长的电荷束缚寿命,因此电子在石墨烯中发生多次再循环,使得光电流增大、响应度提高。图 6(d)是 Gr-MoS₂垂直异质结在不同激光功率下的漏源电流 I_{ds} 与栅压 V_{gs} 的关系曲线,其形状与上文单层石墨烯器件的转移特性曲线相似,表明在 Gr-MoS₂垂直异质结中载流子的传输主要在石墨烯中,这是因为石墨烯的导电能力比 MoS₂大得多^[13]。与无光照时相比,随着激光功率的增大,石墨烯的狄拉克点逐渐向左移动,从 34 V 左移到 32 V 再左移到 30 V,呈现出 n 型掺杂的特点,证明了当激光照射 MoS₂产生电子-空穴对时,电子进入下层的石墨烯中,而空穴则被束缚在了 MoS₂中。石墨烯在狄拉克点左边时为空穴导电,在狄拉克点

右边时为电子导电。图 6(d)也证明了激光功率越大,产生的电子越多,越多的电子进入石墨烯,使得空穴导电的电流越来越小而电子导电的电流越来越大。

4 结 论

本文主要研究了 Gr-MoS₂垂直异质结的制备及其光电性能测试。首先通过化学气相沉积法生长得到大面积石墨烯薄膜和高质量单层 MoS₂,通过 Raman、AFM 对其成分、表面结构进行表征。通过光刻和等离子体刻蚀技术将石墨烯薄膜制作成石墨烯条带,分别制造了石墨烯、MoS₂的 FET 器件,并研究了它们的电学性能。而后将单层 MoS₂转移至石墨烯条带上,制备出 Gr-MoS₂垂直异质结,研究后发现基于这种 Gr-MoS₂垂直异质结的光电探测器的光电流和光响应度相比单层 MoS₂光电器件提高了两个数量级以上,在今后的光电子器件中具有很大的应用潜力。此外,此类基于垂直异质结的光电探测器也适用于其他过渡金属硫族化合物材料与石墨烯的结合中,如 Gr-MoSe₂、Gr-WS₂等,进一步拓宽了其应用范围。

参 考 文 献

- [1] Li X S, Zhu Y W, Cai W W, et al. Transfer of large-area graphene films for high-performance transparent conductive electrodes[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(12): 4359-4363.
- [2] Bolotin K I, Sikes K J, Jiang Z, et al. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene[J]. *Solid State Communications*, 2008, 146(9/10): 351-355.
- [3] Yuan W J, Shi G Q. Graphene-based gas sensors[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, 1(35): 10078-10091.
- [4] Tan T, Yuan Z Y, Chen Y F, et al. Graphene-based fiber functional sensors and laser devices[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170613.
谭腾,袁中野,陈远富,等.基于石墨烯的光纤功能化传感器件和激光器件[J].*激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170613.
- [5] Woong J J, Uk L J, Ho J W, et al. Graphene-based electrodes for flexible electronics[J]. *Polymer International*, 2015, 64(12): 1676-1684.
- [6] Jie W, Hao J. Graphene-based hybrid structures combined with functional materials of ferroelectrics and semiconductors[J]. *Nanoscale*, 2014, 6(12): 6346-6362.
- [7] Zhang W, Huang J K, Chen C H, et al. High-gain phototransistors based on a CVD MoS₂ monolayer[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(25): 3456-3461.
- [8] Lopez-Sanchez O, Lembke D, Kayci M, et al. Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS₂[J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(7): 497-501.
- [9] Dean C R, Young A F, Meric I, et al. Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics[J]. *Nature Nanotechnology*, 2010, 5(10): 722-726.
- [10] Lu F Y, Yan X B, Lin W, et al. Control of Goos-Hanchen shift based on graphene/hexagonal boron nitride heterostructure[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 131601.
卢方圆,闫兴彬,林威,等.石墨烯-六方氮化硼异质结构的古斯-汉欣位移调控[J].*激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 131601.
- [11] Yu W J, Li Z, Zhou H, et al. Vertically stacked multi-heterostructures of layered materials for logic transistors and complementary inverters[J]. *Nature Materials*, 2013, 12(3): 246-252.
- [12] Yu W J, Liu Y, Zhou H, et al. Highly efficient gate-tunable photocurrent generation in vertical heterostructures of layered materials[J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(12): 952-958.
- [13] Zhang W, Chuu C P, Huang J K, et al. Ultrahigh-gain photodetectors based on atomically thin graphene-MoS₂ heterostructures[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 3826.
- [14] Lee Y T, Choi K, Lee H S, et al. Graphene versus ohmic metal as source-drain electrode for MoS₂ nanosheet transistor channel[J]. *Small*, 2014, 10(12): 2356-2361.
- [15] Wei R X, Wang Y W, Jiang L W, et al. Detection of chemical vapor deposition-prepared graphene by surface plasmon polariton imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1124002.
魏茹雪,王延伟,江丽雯,等.利用表面等离激元成像检测化学气相沉积法生长石墨烯[J].*光学学报*, 2019, 39(11): 1124002.
- [16] Yu Q K, Jauregui L A, Wu W, et al. Control and characterization of individual grains and grain boundaries in graphene grown by chemical vapour deposition[J]. *Nature Materials*, 2011, 10(6): 443-449.
- [17] Lee Y H, Zhang X Q, Zhang W J, et al. Synthesis of large-area MoS₂ atomic layers with chemical vapor deposition[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(17): 2320-2325.
- [18] Xu X Z, Zhang Z H, Dong J C, et al. Ultrafast epitaxial growth of metre-sized single-crystal graphene

- on industrial Cu foil[J]. Science Bulletin, 2017, 62 (15): 1074-1080.
- [19] Piccinini G, Forti S, Martini L, et al. Deterministic direct growth of WS₂ on CVD graphene arrays[J]. 2D Materials, 2019, 7(1): 014002.
- [20] Najmaei S, Liu Z, Zhou W, et al. Vapour phase growth and grain boundary structure of molybdenum disulphide atomic layers[J]. Nature Materials, 2013, 12(8): 754-759.
- [21] Wan X, Chen K, Chen Z F, et al. Controlled electrochemical deposition of large-area MoS₂ on graphene for high-responsivity photodetectors[J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(19): 1603998.