

doi:10.3788/gzxb20184712.1231001

# 二维 MoS<sub>2</sub> 以及 Pentacene/MoS<sub>2</sub> 异质结的 光学和电学性质

白志英, 邓金祥, 潘志伟, 张浩, 孔乐, 王贵生

(北京工业大学 应用数理学院, 北京 100124)

**摘 要:**以硫粉末和 MoO<sub>3</sub> 粉末作为原料, 通过化学气相沉积法制备出 MoS<sub>2</sub> 薄膜, 用光学显微镜、原子力显微镜、喇曼光谱以及 X 射线衍射谱对所制备的 MoS<sub>2</sub> 薄膜进行表征。结果表明: 制备得到的二维 MoS<sub>2</sub>, 其晶体形貌为三角形, 尺寸约为 60 μm, 薄膜厚度约为 0.7 nm; 二维 MoS<sub>2</sub> 可以作为理想的表面增强喇曼散射衬底, 促进与有机小分子的电子转移, 因此两者的喇曼光谱强度均增强。在 MoS<sub>2</sub> 薄膜上沉积有机小分子 pentacene 制备出具有良好整流特性的有机-无机 pentacene/MoS<sub>2</sub> 异质结, 通过分析  $\ln(I/V^2)-1/V$  曲线, 发现该异质结存在 Fowler-Nordheim 隧穿现象,  $\log I-\log V$  曲线显示当电压在 0~1 V 时, 电荷传导为欧姆导电, 当电压高于 1 V 时, 电荷传导由空间电荷限制电流机制主导。研究结果可为单层 MoS<sub>2</sub> 与有机小分子 pentacene 结合应用于光电领域提供基础。

**关键词:**二维材料; 异质结; 化学气相沉积法; 喇曼增强; 光电性质

中图分类号: TB383; O475

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)12-1231001-6

## Optical and Electrical Properties of Two-dimensional MoS<sub>2</sub> and Pentacene/MoS<sub>2</sub> Heterojunction

BAI Zhi-ying, DENG Jin-xiang, PAN Zhi-wei, ZHANG Hao, KONG Le, WANG Gui-sheng  
(College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Using sulfur powder and MoO<sub>3</sub> powder as raw materials, the MoS<sub>2</sub> film was synthesized by chemical vapor deposition method, and was characterized by optical microscopy, atomic force microscopy, raman spectroscopy and X-ray diffraction. Results show that the crystal morphology of the MoS<sub>2</sub> is triangle with size of 60 μm and thickness of 0.7 nm; and as one kind of the ideal substrates for surface-enhanced Raman scattering, two-dimensional MoS<sub>2</sub> can promote the charge transfer between the organic molecule and MoS<sub>2</sub>, so the Raman intensity of them are enhanced. The pentacene was adsorbed onto the MoS<sub>2</sub> film by physical vapor deposition method, and the organic-inorganic pentacene/MoS<sub>2</sub> heterojunction with ideal rectifier characteristic was prepared. Analysing the  $\ln(I/V^2)-1/V$  curve, it is seen that the Fowler-Nordheim tunnelling phenomenon occurred through the heterojunction;  $\log I-\log V$  curve shows that charges transport controlled by ohmic conduction at 0~1 V voltages zone, and space-charge-limited currents predominate at over 1 V voltages zone. The research of MoS<sub>2</sub> single-layer film and pentacene film will be contributed to the optoelectronic field.

**Key words:** Two dimensional material; Heterojunction; Chemical vapor deposition method; Raman enhancement; Optical and electrical properties

**OCIS Codes:** 310.6860; 160.4236; 250.0250; 170.5660

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 60876006, 60376007)和北京市教育委员会科技计划重点项目(No. KZ201410005008)资助

第一作者: 白志英(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新型材料物理及应用。Email: 1814334490@qq.com

导师(通讯作者): 邓金祥(1965-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为半导体光电薄膜材料与器件。Email: jdeng@bjut.edu.cn

收稿日期: 2018-07-23; 录用日期: 2018-09-30

## 0 引言

MoS<sub>2</sub> 作为一种典型的类石墨烯二维层状材料,具有原子厚度片状结构,平面内原子由共价键结合而层间由弱的范德华力结合.与石墨烯不同的是,MoS<sub>2</sub> 具有天然带隙,而且带隙宽度随着其层数的减小而增大,单层时由间接带隙转变为直接带隙<sup>[1]</sup>,不仅表现出优异的物理化学稳定性和机械柔韧性,而且具有良好的光电特性和半导体特性,因此在储氢析氢、超级电容器、锂离子电池正极材料、晶体管等领域有着广泛的应用<sup>[2-5]</sup>.

由于 MoS<sub>2</sub> 自由表面无束缚,因此其不仅可以与其他二维材料构成异质结,而且可以通过范德华力与任何维度的纳米材料构成混合维范德华异质结,开辟了范德华异质结研究的新领域<sup>[6]</sup>.作为一种现代电子产品的重要部件,pn 异质结就是将 p 型、n 型层通过范德华力叠加而成<sup>[7-10]</sup>.大多数研究表明二维 MoS<sub>2</sub> 是典型的 n 型半导体材料,具有超过 200 cm<sup>2</sup> V<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> 的场效应迁移率<sup>[2]</sup>,很多零维有机小分子材料是典型的 p 型半导体材料<sup>[11]</sup>,具有柔韧性高、低成本生产、低温加工以及缺少悬挂键的特点,可以作为理想的范德华异质结材料,所以有机-无机混合维 pn 异质结成为研究者们关注的课题<sup>[12-14]</sup>.但关于 pentacene 与 MoS<sub>2</sub> 构成的 pn 异质结的研究还不是很多,JARIWALA D 等<sup>[15]</sup>报道了 pentacene/MoS<sub>2</sub> 异质结反双极性的不对称控制及其光伏效应;BETTIS S H 等<sup>[16]</sup>利用瞬态吸收光谱研究了 pentacene/MoS<sub>2</sub> 异质结的激发载流子的动力学过程,其超快电荷转移(6.7 ps)和长寿命(5.1 ns)电荷分离态满足高性能光伏设备的要求;DONG J 等<sup>[17]</sup>采用 pentacene 单晶而非多晶薄膜与 MoS<sub>2</sub> 制成 pn 异质结,优化了其反双极性特点,并且证实范德华异质结有空间电荷区的存在;REN Q 等<sup>[18]</sup>报道了基于 pentacene/MoS<sub>2</sub> 有机-无机异质结的高性能光敏场效应晶体管,在 655 nm 光照下,达到 103 A/W 的超高光响应;KIM J K 等<sup>[19]</sup>对 pentacene/MoS<sub>2</sub> 异质结中与电荷俘获相关的电子输运机制给出全面的解释.

这些关于 pentacene 与 MoS<sub>2</sub> 异质结的研究报道中,MoS<sub>2</sub> 都是通过机械剥离法所得,耗时长、可重复性差,而化学气相沉积(Cheical Vapor Deposition, CVD)法操作简单方便、可重复性好,另外关于 pentacene 沉积在单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜上之后,两者光学性质的变化的研究鲜有报道,如光吸收、喇曼光谱等的变化.本文采用 CVD 法制备出 60 μm 左右的大尺寸单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜,研究了 pentacene 薄膜、单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜和 pentacene/MoS<sub>2</sub> 双层膜的光学特性,以及 pentacene/MoS<sub>2</sub> 异质结的电流-电压(I-V)特性,并分析了其电荷传输机制.

## 1 实验

实验样品的制备分三部分,图 1 为实验装置示意图.第一部分利用双温区管式真空炉(合肥科晶公司)制备单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜,如图 1(a),I 区温度设置为 190 °C,S 粉末(纯度 99.5%)质量为 1.5 g,II 区温度设置为 800 °C,MoO<sub>3</sub> 粉末(纯度 98%)质量为 5 mg,反应时间为 10 min,Ar 气流量为 150 sccm,衬底有 SiO<sub>2</sub>/Si 衬底、石英衬底;第二部分利用真空镀膜设备(沈阳慧宇仪器厂)蒸镀 pentacene 薄膜,如图 1(b),将 pentacene 粉末放入加热器中,将衬底(SiO<sub>2</sub>/Si 衬底、生长有单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜的 SiO<sub>2</sub>/Si 衬底、石英衬底)固定在基板上,加热器温度设置为 230 °C,基板温度设置为 60 °C,腔室真空度为 5 × 10<sup>-4</sup> Pa;第三部分是在生长在 SiO<sub>2</sub>/Si 衬底上的 pentacene/MoS<sub>2</sub> 双层膜上蒸镀 Al 电极,制备 pentacene/MoS<sub>2</sub> 异质结,如图 1(c).样品测

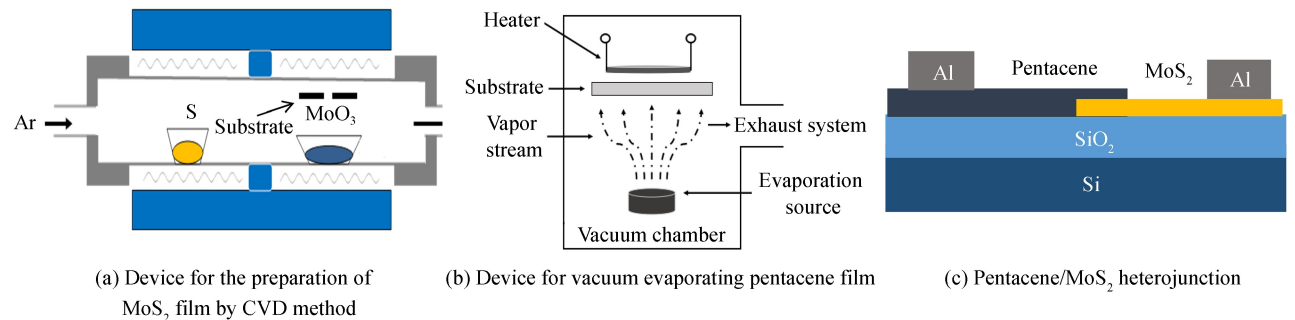


图 1 实验示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental part

试仪器有光学显微镜、原子力显微镜(Atomic Force Microscopy, AFM)、喇曼光谱仪(532 nm 激光源)、X 射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)仪、紫外-可见-近红外光分光光度计、半导体参数分析仪.

## 2 结果与讨论

通过 CVD 法在 SiO<sub>2</sub>/Si 衬底上制备出二维 MoS<sub>2</sub> 薄膜.如图 2(a),用光学显微镜观测其形貌为三角形,且三角形尺寸达 60 μm 左右;图 2(b)XRD 图谱显示在  $2\theta = 14.44^\circ$ 、 $35.80^\circ$ 、 $39.52^\circ$ 、 $68.88^\circ$  处存在特征峰,与标准比对尺比较,其分别对应 2H 型 MoS<sub>2</sub> 的(002)晶面、(102)晶面、(103)晶面以及(201)晶面,图中无其他明显杂峰,可见制备过程中 MoO<sub>3</sub> 被完全硫化为 MoS<sub>2</sub>;图 2(c)AFM 测得薄膜厚度约为 0.7 nm;图 2(d)喇曼散射图谱中,其 E<sub>2g</sub><sup>2</sup>(平面内振动模式)与 A<sub>1g</sub>(平面外振动模式)两个振动模式的峰位分别在  $386.0\text{ cm}^{-1}$  与  $403.9\text{ cm}^{-1}$  处,波数差  $\Delta$  为  $17.9\text{ cm}^{-1}$ .这些表征充分说明实验所得 MoS<sub>2</sub> 薄膜为单层膜<sup>[20]</sup>.

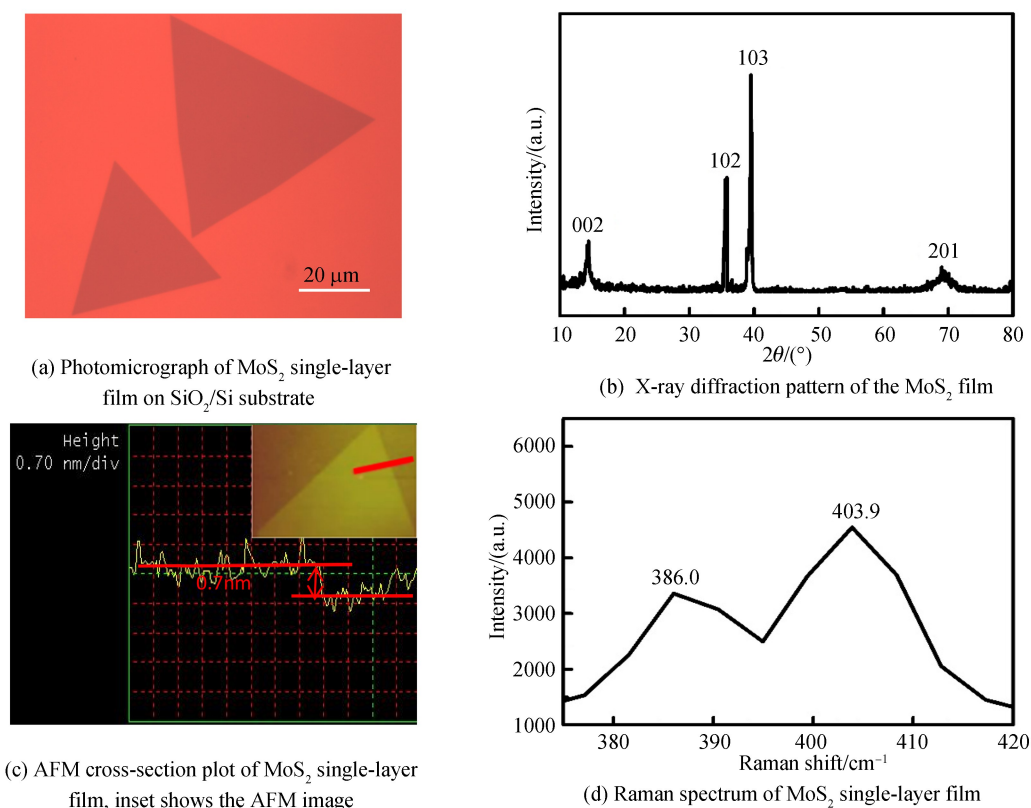


图 2 MoS<sub>2</sub> 薄膜的表征  
Fig.2 Characterizations of MoS<sub>2</sub> film

图 3 为石英衬底上生长的 MoS<sub>2</sub> 薄膜的紫外-可见吸收光谱,吸收峰位置分别在 439 nm、623 nm 和 672 nm 处,其中 623 nm 和 672 nm 处的两个吸收峰是激子在布里渊区 K 点从价带到导带的直接跃迁所致,能量不同是由于价带自旋轨道耦合的能级劈裂形成的<sup>[21]</sup>,439 nm 处的吸收峰是由来自深层价带到导带的直接激子跃迁形成的<sup>[21]</sup>;另外,在干净石英衬底上与长有 MoS<sub>2</sub> 薄膜的石英衬底上同时真空蒸镀 pentacene,再次分别测试其紫外-可见吸收光谱,结果显示:pentacene 薄膜的吸收峰位位于 665 nm、630 nm、583 nm、540 nm、275 nm 和 230 nm 处,其中 630 nm 和 665 nm 处的双峰结构归于 S<sub>0</sub>-S<sub>1</sub> 跃迁的 Davydov 分裂<sup>[22]</sup>,相似地,540 nm 和 583 nm 的两个峰对应于 T<sub>0</sub>-T<sub>1</sub> 跃迁的 Davydov 分裂<sup>[22]</sup>,紫外区的两个峰 230 nm 和 275 nm 则对应着 S<sub>1</sub>-S<sub>n</sub> 跃迁<sup>[23]</sup>;而 pentacene/MoS<sub>2</sub> 双层膜的吸收光谱中,MoS<sub>2</sub> 薄膜 456 nm 处的吸收峰仍存在,且峰位更明显,pentacene 薄膜 230 nm 和 275 nm 处的吸收峰也存在,而 MoS<sub>2</sub> 薄膜的 623 nm 和 672 nm 处的吸收峰以及 pentacene 薄膜 540 nm、583 nm、630 nm 和 665 nm 处的吸收峰由于峰位相距太近形成一个包络,且吸收强度的变化不明显,即 pentacene 薄膜与 MoS<sub>2</sub> 薄膜的光吸收互不影响.

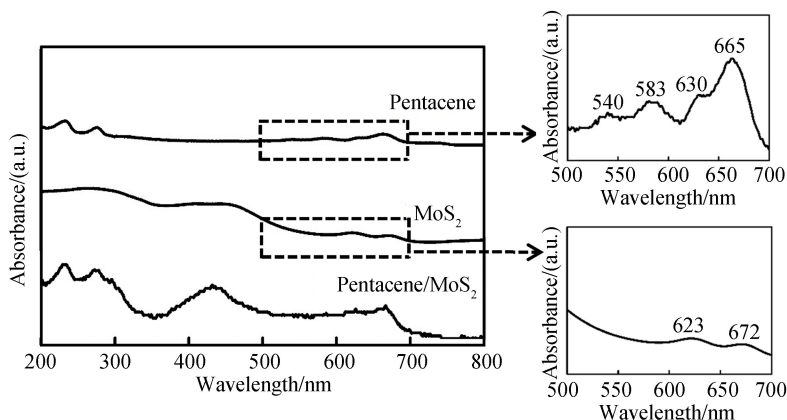


图3 石英衬底上的 pentacene 薄膜、MoS<sub>2</sub> 薄膜以及其双层薄膜的紫外-可见吸收光谱  
Fig.3 UV-visible absorption spectra of pentacene film, MoS<sub>2</sub> film and the double-layer film in quartz substrate

图 4(a)中,曲线 I 为 pentacene 薄膜沉积在单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜上的喇曼散射图谱,其特征峰位置分别为 1 158.3 cm<sup>-1</sup>, 1 178.8 cm<sup>-1</sup>和 1 375.7 cm<sup>-1</sup>;曲线 II 为 pentacene 薄膜沉积在 SiO<sub>2</sub>/Si 衬底上的喇曼散射图谱,其特征峰位置分别为 1 158.3 cm<sup>-1</sup>, 1 178.6 cm<sup>-1</sup>和 1 375.7 cm<sup>-1</sup>.两者相比较, pentacene 的喇曼光谱特征峰位置无变化,说明 pentacene 结构未发生变化,而对于喇曼强度,沉积在单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜上的明显高于沉积在 SiO<sub>2</sub>/Si 衬底上的,这是由于 MoS<sub>2</sub> 这种类石墨烯二维材料作为理想的化学增强喇曼散射衬底,促进了与有机小分子的层间电子转移<sup>[24]</sup>,并且随着 MoS<sub>2</sub> 层数的增加,其对有机小分子的喇曼增强作用减小<sup>[25]</sup>.对于单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜来说,如图 4(b),其与 pentacene 之间的电荷转移也使得其喇曼散射强度增强,但是两个特征峰的位置都发生了红移,而波数差 Δ 为 17.8 cm<sup>-1</sup>,几乎不变,这一现象还未得到合理的解释,需要在将来的工作中进一步研究.

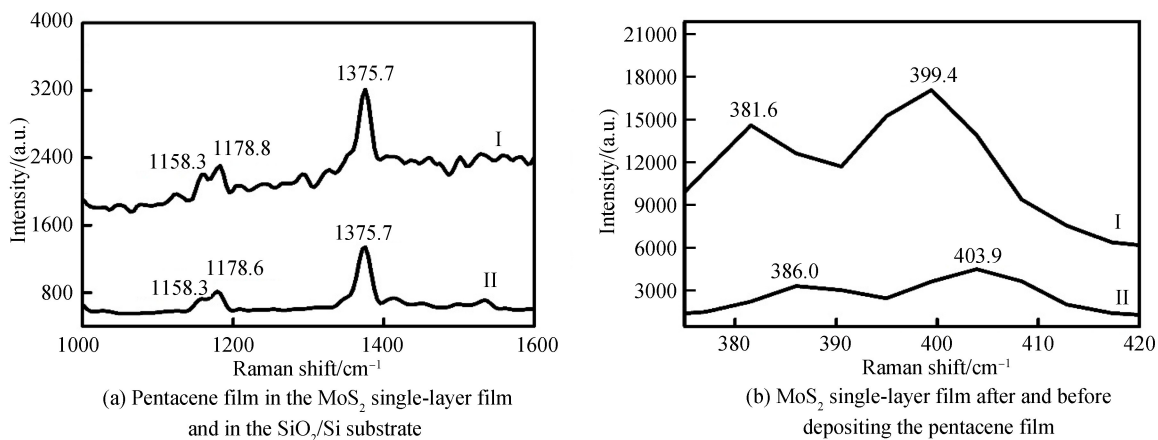


图4 Pentacene 薄膜与单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜的喇曼光谱图  
Fig.4 Raman spectra of the pentacene film and the MoS<sub>2</sub> single-layer film

制备异质结之前,分别测试了 Al/MoS<sub>2</sub>/Al 与 Al/pentacene/Al 的 I-V 特性曲线,以确保其都为欧姆接触,如图 5(a),两者都接近欧姆接触.图 5(b)为 pentacene/MoS<sub>2</sub> 异质结在室温下测试的 I-V 特性曲线,加正向电压时电流指数上升,加反向电压时电流几乎为零,说明其具有良好的整流特性,整流比在 ±4 V 处达 81.由于肖特基热电子发射,加正向电压时,异质结的理想 I-V 关系可以通过式(1)进行分析,即

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) \right] \quad (1)$$

式中, I<sub>s</sub> 为饱和电流, q 为单位电荷, V 为外加电压, n 为理想因子, k<sub>B</sub> 为玻尔兹曼常数, T 为开尔文温度.图 5(b)插图为加正向电压时,实验所得 I-V 特性曲线的拟合,其很好地拟合于

$$I = A \exp\left(-\frac{1}{k}V\right) \quad (2)$$

式中,  $A$  和  $k$  均为常数.拟合率显示为 98%,算得室温下理想因子  $n$  为 47.较高的理想因子是范德华异质结的一个共有特征,因为两种不同材料之间容易形成范德华带隙,相当于一种绝缘体,从而产生隧穿现象<sup>[26]</sup>.采用 Fowler-Nordheim 图,即  $\ln(I/V^2) - 1/V$  曲线来分析,如图 5(c),在正向电压下, $\ln(I/V^2) - 1/V$  曲线线性减小,表明隧穿现象是 Fowler-Nordheim 隧穿主导<sup>[19]</sup>.另外,陷阱态也会对载流子的输运有很大影响,为了研究 pentacene/MoS<sub>2</sub> 异质结的电荷传导机制,正向偏压  $I-V$  以双对数标出,如图 5(d),曲线被分成两个不同的区域,而且两条直线斜率不同,意味着两个区域的电荷传导机制有所不同:在  $0 \sim 1$  V 电压区,直线斜率约 1.11,近似为欧姆导电,这几乎完全由热激发载流子主导,深陷阱大多是空的;在电压大于 1 V 区,  $I \propto V^{3.35}$ ,满足  $I \propto V^{m+1}$  ( $m > 2$ ),所以电荷传导由指数分布陷阱控制的空间电荷限制电流(Space Charge Limited Current, SCLC)机制主导<sup>[27]</sup>,即由费米能级附近的捕获载流子组成的空间电荷产生电场,从而影响电荷传导.

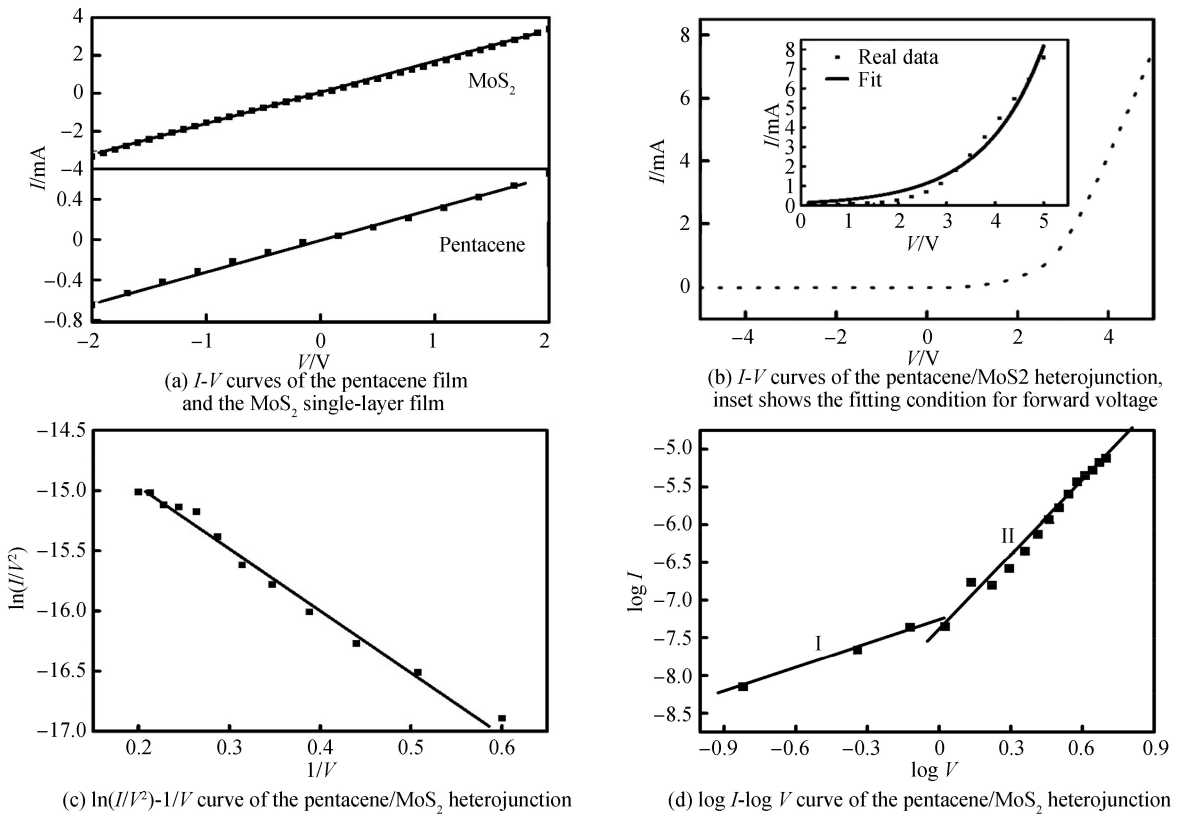

 图 5 Pentacene/MoS<sub>2</sub> 异质结的电流-电压分析

 Fig.5  $I-V$  analysis for pentacene/MoS<sub>2</sub> heterojunction

### 3 结论

本文通过 CVD 法成功制备出二维 MoS<sub>2</sub> 薄膜,光学显微镜显示其三角形形貌尺寸达  $60 \mu\text{m}$ ,AFM 测得薄膜厚度为  $0.7 \text{ nm}$ ,喇曼光谱图显示  $E_{2g}^*$  与  $A_{1g}$  两个振动模式波数差为  $17.9 \text{ cm}^{-1}$ ,表明所制备的 MoS<sub>2</sub> 为单层;由于 MoS<sub>2</sub> 作为特殊衬底促进与有机小分子的电子转移,因此其与 pentacene 薄膜互相增强彼此的喇曼散射强度;pentacene 薄膜与 MoS<sub>2</sub> 薄膜的紫外-可见光吸收互不影响.pentacene/MoS<sub>2</sub> 异质结具有较好的整流特性,异质结间存在 Fowler-Nordheim 隧穿现象,这导致其理想因子过高;在  $0 \sim 1$  V 电压区,此异质结间的电荷传导完全由热激发载流子主导,即为欧姆导电,而在大于 1 V 电压区,电荷传导由 SCLC 机制主导.

#### 参考文献

- [1] SPLENDIANI A, SUN L, ZHANG Y B, *et al.* Emerging photoluminescence in monolayer MoS<sub>2</sub>[J]. *Nano Letters*, 2010, **10**(4): 1271-1275.
- [2] RADISAVLJEVIC B, RADENOVIC A, BRIVIO J, *et al.* Single-layer MoS<sub>2</sub> transistors[J]. *Nature Nanotechnology*,



- 2011, **6**(3): 147-150.
- [3] LEE C, YAN H, BRUS L E, *et al.* Anomalous lattice vibrations of single-and few-layer MoS<sub>2</sub>[J]. *American Chemical Society Nano*, 2010, **4**(5): 2695-2700.
- [4] O'NEILL A, KHAN U, COLEMAN J N. Preparation of high concentration dispersions of exfoliated MoS<sub>2</sub> with increased flake size[J]. *Chemistry of Materials*, 2012, **24**(12): 2414-2421.
- [5] EDA G, YAMAGUCHI H, VOIRY D, *et al.* Photoluminescence from chemically exfoliated MoS<sub>2</sub>[J]. *Nano Letters*, 2011, **11**(12): 5111-5116.
- [6] JARIWALA D, MARKS T J, HERSAM M C. Mixed-dimensional van der Waalsheterostructures[J]. *Nature Materials*, 2017, **16**(2): 170-181.
- [7] CHENG R, LI D H, ZHOU H L, *et al.* Electroluminescence and photocurrent generation from atomically sharp WSe<sub>2</sub>/MoS<sub>2</sub> heterojunction p-n diodes[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(10): 5590-5597.
- [8] FURCHI M M, POLYUSHKIN D K, POSPISCHIL A, *et al.* Mechanisms of photoconductivity in atomically thin MoS<sub>2</sub>[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(11): 6165-6170.
- [9] DENG Y X, LUO Z, CONRAD N J, *et al.* Black phosphorus-monolayer MoS<sub>2</sub> van der Waals heterojunction p-n diode[J]. *American Chemical Society Nano*, 2014, **8**(8): 8292-8299.
- [10] JARIWALA D, SANGWAN V K, WU C C, *et al.* Gate-tunable carbon nanotube-MoS<sub>2</sub> heterojunction p-n diode[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**(45): 18076-18080.
- [11] WANG C L, DONG H L, HU W P, *et al.* Semiconducting  $\pi$ -conjugated systems in field-effect transistors: a material odyssey of organic electronics[J]. *Chemical Reviews*, 2011, **112**(4): 2208-2267.
- [12] LIU F C, CHOW W L, HE X X, *et al.* Van der Waals p-n junction based on an organic-inorganic heterostructure[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, **25**(36): 5865-5871.
- [13] HE D W, PAN Y M, NAN H Y, *et al.* A van der Waals pn heterojunction with organic/inorganic semiconductors[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **107**(18): 183103.
- [14] GÜLLÜ Ö, TÜRÜT A, ASUBAY S. Electrical characterization of organic-on-inorganic semiconductor Schottky structures[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, **20**(4): 045215.
- [15] JARIWALA D, HOWELL S L, CHEN K S, *et al.* Hybrid, gate-tunable, van der Waals p-n heterojunctions from pentacene and MoS<sub>2</sub>[J]. *Nano Letters*, 2015, **16**(1): 497-503.
- [16] BETTIS H S, SANGWAN V K, BALLA I, *et al.* Ultrafast exciton dissociation and long-lived charge separation in a photovoltaic pentacene-MoS<sub>2</sub> van der Waals heterojunction[J]. *Nano Letters*, 2016, **17**(1): 164-169.
- [17] DONG J, LIU F J, WANG F, *et al.* Configuration-dependent anti-ambipolar van der Waals p-n heterostructures based on pentacene single crystal and MoS<sub>2</sub>[J]. *Nanoscale*, 2017, **9**(22): 7519-7525.
- [18] REN Q, XU Q S, XIA H Q, *et al.* High performance photoresponsive field-effect transistors based on MoS<sub>2</sub>/pentacene heterojunction[J]. *Organic Electronics*, 2017, **51**: 142-148.
- [19] KIM J K, CHO K, KIM T Y, *et al.* Trap-mediated electronic transport properties of gate-tunable pentacene/MoS<sub>2</sub> pn heterojunction diodes[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 36775.
- [20] LATE D J, RAO C N R, DRAVID V P. Rapid Characterization of Ultrathin Layers of Chalcogenides on SiO<sub>2</sub>/Si Substrates[J]. *Advanced Functional Materials*, 2012, **22**(9): 1894-1905.
- [21] WILCOXON J P, NEWCOMER P P, SAMARA G A. Synthesis and optical properties of MoS<sub>2</sub> and isomorphous nanoclusters in the quantum confinement regime[J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, **81**(12): 7934-7944.
- [22] BLANCHET G B, FINCHER C R, MALAJOVICH I. Laser evaporation and the production of pentacene films[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, **94**(9): 6181-6184.
- [23] JUNDT C, KLEIN G, SIPP B, *et al.* Exciton dynamics in pentacene thin films studied by pump-probe spectroscopy[J]. *Chemical Physics Letters*, 1995, **241**(1-2): 84-88.
- [24] YU S H, LEE Y B, JIANG S K, *et al.* Dye-sensitized MoS<sub>2</sub> photodetector with enhanced spectral photoresponse[J]. *American Chemical Society Nano*, 2014, **8**(8): 8285-8291.
- [25] LEE Y, KIM H, LEE J, *et al.* Enhanced Raman scattering of Rhodamine 6G films on two-dimensional transition metal dichalcogenides correlated to photoinduced charge transfer[J]. *Chemistry of Materials*, 2015, **28**(1): 180-187.
- [26] PADILHA J E, FAZZIO A, DA S A J R. Van der Waals heterostructure of phosphorene and graphene: tuning the Schottky barrier and doping by electrostatic gating[J]. *Physical Review Letters*, 2015, **114**(6): 066803.
- [27] ÇALDIRAN Z, DENİZ A R, AYDOĞAN S, *et al.* The barrier height enhancement of the Au/n-Si/Al Schottky barrier diode by electrochemically formed an organic Anthracene layer on n-Si[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2013, **56**: 45-54.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (Nos. 60876006, 60376007), Funding for the Development Project of Beijing Municipal Education Commission of Science and Technology (No. KZ201410005008)

引用格式: BAI Zhi-ying, DENG Jin-xiang, PAN Zhi-wei, *et al.* Optical and Electrical Properties of Two-dimensional MoS<sub>2</sub> and Pentacene/MoS<sub>2</sub> Heterojunction[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1231001

白志英, 邓金祥, 潘志伟, 等. 二维 MoS<sub>2</sub> 以及 Pentacene/MoS<sub>2</sub> 异质结的光学和电学性质[J]. *光子学报*, 2018, **47**(12): 1231001