

## 大面积单层二硫化钼的制备及其光电性能\*

武鹏<sup>1)</sup> 谈论<sup>2)</sup> 李炜<sup>1)</sup> 曹立伟<sup>1)</sup> 赵俊博<sup>1)</sup> 曲尧<sup>1)</sup> 李昂<sup>1)†</sup>

1) (北京工业大学材料与制造学部, 先进材料微观结构与性能北京市重点实验室, 北京 100124)

2) (湖北大学物理与电子科学学院, 湖北省氢能安全检测与控制工程技术研究中心, 武汉 430062)

(2023 年 2 月 24 日收到; 2023 年 4 月 4 日收到修改稿)

过渡金属硫族化合物 (TMDCs) 材料具有优异的电学和光电性能, 在下一代光电子器件中具有广阔的应用前景. 然而, 大面积均匀生长单层的 TMDCs 仍然具有相当大的挑战. 本工作提出了一种简单而有效的利用化学气相沉积 (CVD) 制备大面积单层二硫化钼 ( $\text{MoS}_2$ ) 的方法, 并通过调整氧化物前驱体的比例, 调整  $\text{MoS}_2$  单晶/薄膜生长. 随后, 利用叉指电极掩膜板制备出单层  $\text{MoS}_2$  薄膜光电探测器. 最后, 在 405 nm 激光激发下, 不同电压和不同激光功率条件下均表现出高稳定和可重复的光电响应, 响应时间可达毫秒 (ms) 量级. 此外, 该光电探测器实现了 405—830 nm 的可见光到近红外的宽光谱检测范围, 光响应度 ( $R$ ) 高达 291.7 mA/W, 光探测率 ( $D^*$ ) 最高达  $1.629 \times 10^9$  Jones. 基于该 CVD 制备的单层  $\text{MoS}_2$  薄膜光电探测器具有成本低、能大规模制备, 且在可见光到近红外的宽光谱范围内具有良好的稳定性和重复性的优点, 为未来电子和光电子器件的应用提供了更多的可能性.

**关键词:**  $\text{MoS}_2$ , 化学气相沉积, 光电探测器, 光电响应**PACS:** 81.07.-b, 81.15.Gh, 81.10.-h, 68.55.A-**DOI:** 10.7498/aps.72.20230273

## 1 引言

二维 (2D) TMDCs 由于其纳米电子器件 (如场效应晶体管<sup>[1–4]</sup>、光电探测器<sup>[5–8]</sup>、记忆元件<sup>[9–11]</sup>) 中的潜在应用而引起了研究人员的极大兴趣<sup>[12,13]</sup>. 然而, TMDCs 器件的光学和电学性能在很大程度上受到晶界<sup>[14]</sup> 和层间材料厚度<sup>[15,16]</sup> 的影响. 因此, 研究人员尝试采用不同的生长制备策略获得 2D TMDCs (如微机械剥离法<sup>[17–21]</sup>、液相剥离法<sup>[22–24]</sup>、分子束外延法<sup>[25,26]</sup>、激光脉冲沉积法<sup>[27–29]</sup> 和化学气相沉积法 (CVD)<sup>[30–35]</sup>), 并对其性能进行研究. 在这些方法中, CVD 已被证明是制备高结晶性 TMDCs 的最有效方法.

$\text{MoS}_2$  作为一种 TMDCs 材料, 因其单层结构具备直接带隙结构而显示出优异的光学性能<sup>[36–41]</sup>

和电学性能<sup>[42–44]</sup>, 因此受到研究人员的青睐. 目前, 研究人员利用 CVD 法, 通过控制反应温度、气体流量、生长时间和用氯化钠 ( $\text{NaCl}$ ) 辅助生长等生长影响因素和衬底工程策略<sup>[45]</sup>, 制备  $\text{MoS}_2$  单晶并进行了广泛的研究<sup>[46,47]</sup>. 然而, 在纳米器件中生长大面积单层  $\text{MoS}_2$  薄膜的研究较少, 这仍然是一个值得关注的挑战.

本文利用一种新型 CVD 装置, 通过改变前驱体三氧化钼 ( $\text{MoO}_3$ ) 的量, 成功获得了大面积单层  $\text{MoS}_2$  薄膜. 以生长的单层  $\text{MoS}_2$  薄膜为基础, 制备单层  $\text{MoS}_2$  薄膜叉指电极光电探测器, 并在 405 nm 激光激发下, 实现稳定、可重复的毫秒 (ms) 量级的快速响应, 响应度高达 291.7 mA/W, 探测率高达  $1.629 \times 10^9$  Jones. 此外, 该探测器实现了 405—830 nm 的可见光到近红外的宽光谱检测范围,  $R$  最高达 227.9 mA/W,  $D^*$  最高达  $1.27 \times 10^9$  Jones.

\* 北京卓越科学家项目 (批准号: BJJWZYJH01201910005018) 和国家重点研发计划 (批准号: 2021YFA1200201) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ang.li@bjut.edu.cn

## 2 实验方法

### 2.1 样品生长

本实验通过 CVD 法制备大面积单层  $\text{MoS}_2$  薄膜. 实验前, 先用金刚石刀将 4 in (1 in = 2.54 cm) 晶圆  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  (300 nm) 切割成若干  $0.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$  的方形小块, 再浸泡在丙酮中 2 h 洗去衬底表面有机物, 然后放入异丙醇中清洗两次, 用洗耳球吹干后备用. 将 50 mg  $\text{MoO}_3$  分散于 10 mL 无水乙醇中, 超声分散 10 min, 得到均匀分散液.

实验装置如图 1(a), (b)(本文所有曲线图均采用 origin 软件绘制) 所示. 将  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  衬底倒置放在滴有前驱体分散液的  $\text{Si}$  片上, 形成  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  生长衬底、生长腔空间、前驱体和  $\text{Si}$  衬底的限域空间. 生长过程中需要以氩气为载气, 保证  $\text{S}$  源能够顺利进入该限域空间. 此外, 狭小的空间能够使得前驱体发生反应后迅速在  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  衬底上生长. 实验前, 将  $\text{S}$  粉放在石英舟内, 置于碳布热源下方, 此时  $\text{S}$  可以获得足够的热量, 达到蒸发温度, 与  $\text{Si}$  衬底上的前驱体氧化物发生化学反应, 最终在最上方的  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  衬底上完成生长. 生长过程中以 10 sccm 氩气 ( $\text{Ar}$ ) 为载气, 生长条件为常压.

生长分为两个阶段, 如图 1(c) 温度曲线所示, 分别对应于硫源蒸发和  $\text{MoS}_2$  形核生长. 第 1 阶段是硫化阶段, 将碳布的温度提高到  $550^\circ\text{C}$ , 并保持

300 s, 使  $\text{S}$  前驱体蒸发, 并确保环境中有足够的  $\text{S}$ . 第 2 阶段是生长阶段, 将碳布温度提高到  $750^\circ\text{C}$ , 保持 900 s, 此时  $\text{MoO}_3$  前驱体也达到蒸发温度,  $\text{S}$  和  $\text{MoO}_3$  在限域空间内发生化学反应. 反应结束后, 碳布逐渐冷却至室温.

### 2.2 样品表征与测试

采用光学显微镜 (OM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 对  $\text{MoS}_2$  的表面形貌进行表征. 在 532 nm 激光模式下使用拉曼系统进行拉曼光谱和相应的拉曼成像测试. 利用原子力显微镜 (AFM) 测定了  $\text{MoS}_2$  的厚度. 使用 KEITHLEY 源表 (2612B) 和 405 nm (OM-12A405-3-G), 505 nm (OM-12A505-3-G), 650 nm (OM-12A650-3-G), 780 nm (OM-12A780-3-G) 以及 830 nm (OM-12A830-3-G) 激光光源测试光电探测器的光电特性. 上述试验均在常温常压环境下完成.

## 3 结果与讨论

为了研究  $\text{MoO}_3$  前驱体量对  $\text{MoS}_2$  产物的影响, 实验中,  $\text{MoO}_3$  用量按  $3 \mu\text{L}$  的梯度依次增大, 其他参数保持一致. 所得样品的 SEM 图像如图 2(a)—(d) 所示. 在图 2(e) 中, 可以明显观察到  $\text{MoS}_2$  在整个衬底中的面积随着  $\text{MoO}_3$  前驱体体积的增大而增大, 直至形成连续的单层膜. 实验表明, 随着

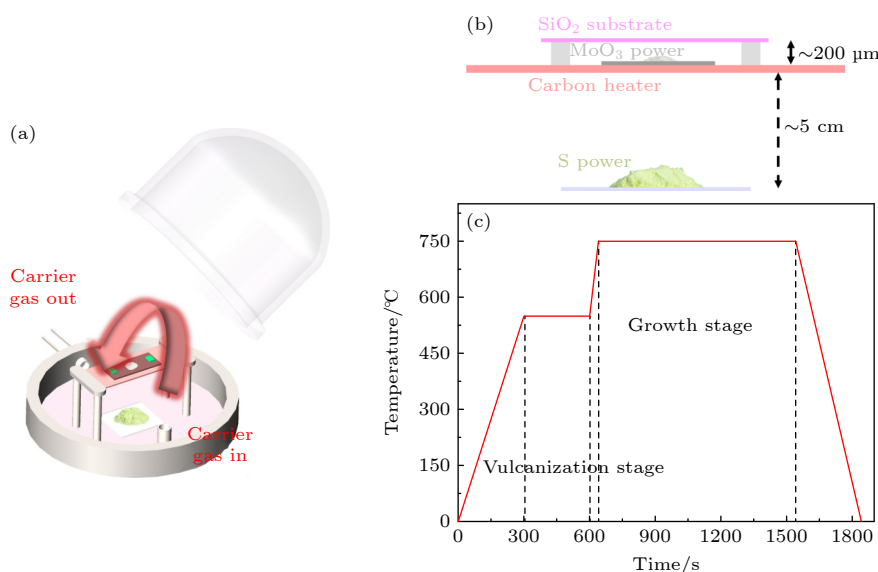


图 1 (a) CVD 生长单层  $\text{MoS}_2$  薄膜实验装置示意图; (b) 化学反应区放大图; (c) CVD 生长过程温度曲线

Fig. 1. (a) CVD experimental equipment for  $\text{MoS}_2$  synthesis; (b) enlarged view of the chemical reaction zone; (c) temperature curve of CVD growth process.

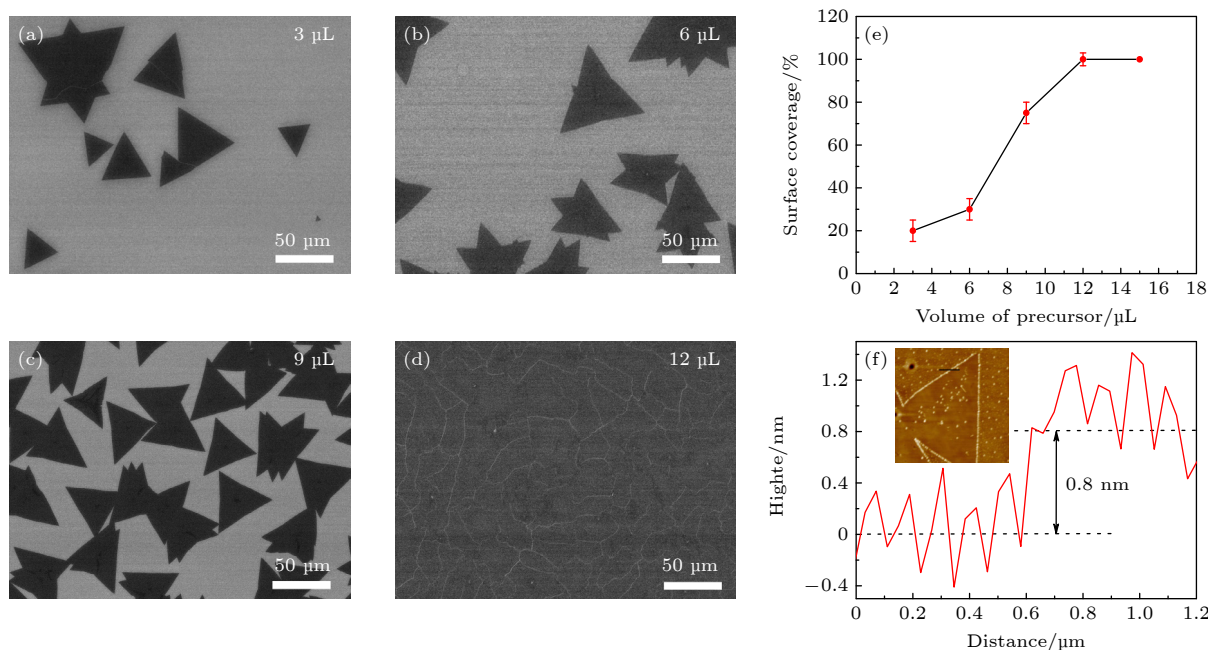


图 2 (a)–(d) 不同 MoO<sub>3</sub> 前驱体量下制备的 MoS<sub>2</sub> 的 SEM 形貌; (e) MoS<sub>2</sub> 覆盖率随前驱体量的变化曲线; (f) MoS<sub>2</sub> 的 AFM 照片 (插图) 和图中黑线高度随位置的变化曲线

Fig. 2. (a)–(d) SEM morphologies of MoS<sub>2</sub> prepared under different volumes of MoO<sub>3</sub> precursor; (e) curve of MoS<sub>2</sub> coverage with precursor volume; (f) the height of MoS<sub>2</sub> as a function of position marked as black line in the inset, inset is AFM photograph of MoS<sub>2</sub>.

MoO<sub>3</sub> 用量的增大, 单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜在衬底上的覆盖率逐渐增大. 当 MoO<sub>3</sub> 量增加到 12 μL 时, 单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜在衬底上的生长趋于饱和, 覆盖率达到 100%. 经测量, 该大面积单层 MoS<sub>2</sub> 的最大尺寸约为 0.2 cm. 结果显示 MoO<sub>3</sub> 前驱体的量对 MoS<sub>2</sub> 单晶生长或薄膜生长起到决定性作用. 利用 AFM 对生长的 MoS<sub>2</sub> 测试, 如图 2(f) 所示, 插图是 AFM 图像, 对应图中黑线位置测试 AFM 谱图, 结果表明该处有 0.8 nm 的高度差, 这正是单层 MoS<sub>2</sub> 的厚度. 这也直接证明了用此 CVD 生长成功获得单层 MoS<sub>2</sub> 材料.

拉曼光谱仪研究了 MoS<sub>2</sub> 在 532 nm 激光激发模式下的光学性质. 如图 3 所示, 图 3(a) 是单晶 MoS<sub>2</sub> 的 OM 图像; 图 3(b) 是在 403 cm<sup>-1</sup> 处的单晶 MoS<sub>2</sub> 拉曼成像图; 图 3(c) 为 520 cm<sup>-1</sup> 处的拉曼成像图, 对应 SiO<sub>2</sub> 特征峰的位置. 分别测量图 3(a) 中随机选取的 5 个点的拉曼光谱, 其对应的 MoS<sub>2</sub> 峰宽间距约为 19 cm<sup>-1</sup>. 理论定义峰宽小于 20 cm<sup>-1</sup> 为单层 MoS<sub>2</sub>. 实验结果表明, 本实验生长的 MoS<sub>2</sub> 单晶为单层单晶材料. 图 3(e) 为 MoS<sub>2</sub> 薄膜的 OM 图像. 图 3(f) 是 MoS<sub>2</sub> 在 403 cm<sup>-1</sup> 处的拉曼成像图. 图 3(g) 为 520 cm<sup>-1</sup> 处的拉曼成像, 对应 SiO<sub>2</sub> 特征峰的位置. 分别测量图 3(e) 中随机选取的 4 个点的拉曼

光谱, 其对应的 MoS<sub>2</sub> 峰宽间距约为 18 cm<sup>-1</sup>, 同样证明本实验所制备的 MoS<sub>2</sub> 薄膜具有单层性质.

基于制备的单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜, 采用掩模板法制备出 MoS<sub>2</sub> 薄膜光电探测器并测试其光电性能. 采用热蒸发镀膜制备了 10 nm 钛 (Ti) 和 80 nm 金 (Au) 的接触电极. 叉指电极装置示意图如图 4(a) 所示. 图 4(b) 表明, 当电极材料只有 Au 时, 该光电探测器的接触电极表现出肖特基接触, 但是优先镀 Ti 接触电极再镀 Au 时, 该光电探测器的接触电极则展现出较好的欧姆接触. 图 4(b) 插图为器件的实物图.

利用电极接触为欧姆接触的光电探测器, 在 405 nm 和 0.13 mW 光功率激发条件下, 测试到不同电压下的光电流每隔 5 s 随时间周期性变化的图像, 如图 5(a) 所示, 该光电探测器具有良好的稳定性和重复性. 固定电压为 0.1 V, 测试到不同光功率下探测器的光电流每隔 5 s 随时间周期性变化的图像, 如图 5(b) 所示, 从图中可以看出, 较高的光功率产生的光电流较大.  $R$ ,  $D^*$  和响应速度是衡量光电探测器的性能两个关键量. 根据公式:

$$R = \frac{I_{\text{ds}} - I_{\text{dark}}}{(P/S_1)S_2}, \quad D^* = \frac{R\sqrt{S_2}}{\sqrt{2e}I_{\text{dark}}},$$

其中,  $I_{\text{ds}}$  是光电流,  $I_{\text{dark}}$  是暗电流,  $P$  是光功率,  $S_1$  是光功率计的受光面积,  $S_2$  是探测器材料的有



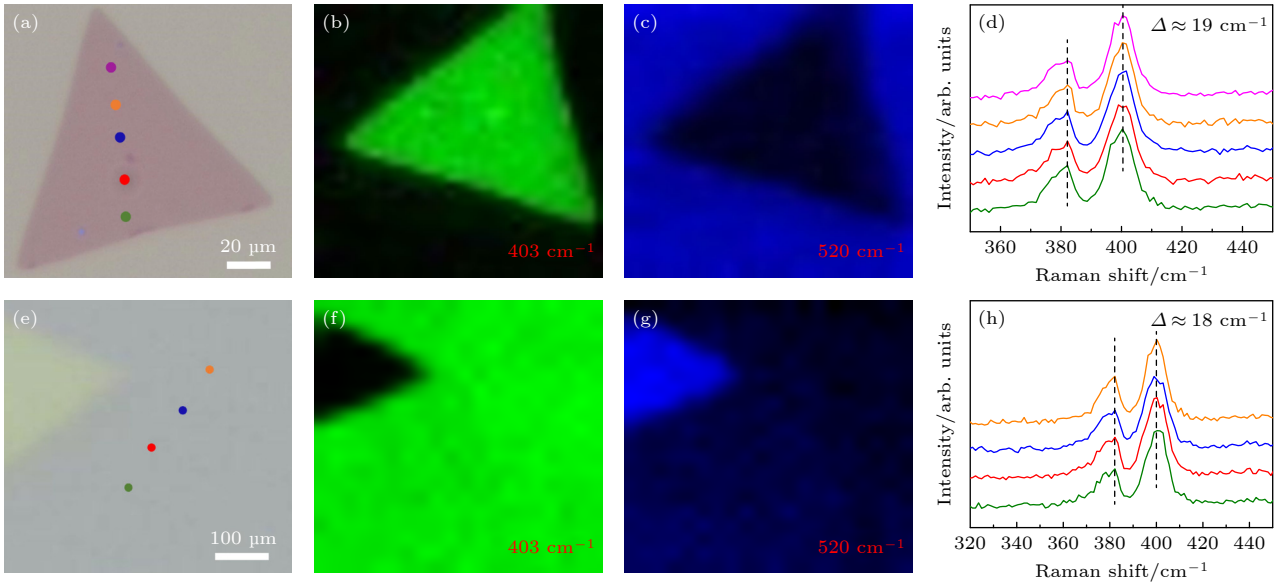


图 3 (a) MoS<sub>2</sub> 单晶光学显微镜图像; (b) 单晶 MoS<sub>2</sub> 的拉曼成像; (c) Si/SiO<sub>2</sub> 基底拉曼成像; (d) 对应图 (a) 中各点的拉曼光谱; (e) MoS<sub>2</sub> 薄膜的光学显微镜图像; (f) MoS<sub>2</sub> 薄膜的拉曼成像; (g) Si/SiO<sub>2</sub> 基底拉曼成像; (h) 图 (e) 各点对应的拉曼光谱

Fig. 3. (a) Optical microscope image of single crystal MoS<sub>2</sub>; (b) Raman mapping of single crystal MoS<sub>2</sub>; (c) Raman mapping of Si/SiO<sub>2</sub> substrate; (d) Raman spectra of each point in Fig. (a); (e) optical microscope image of thin film MoS<sub>2</sub>; (f) Raman mapping of thin film MoS<sub>2</sub>; (g) Raman mapping of Si/SiO<sub>2</sub> substrate; (h) Raman spectra of each point in Fig. (e).

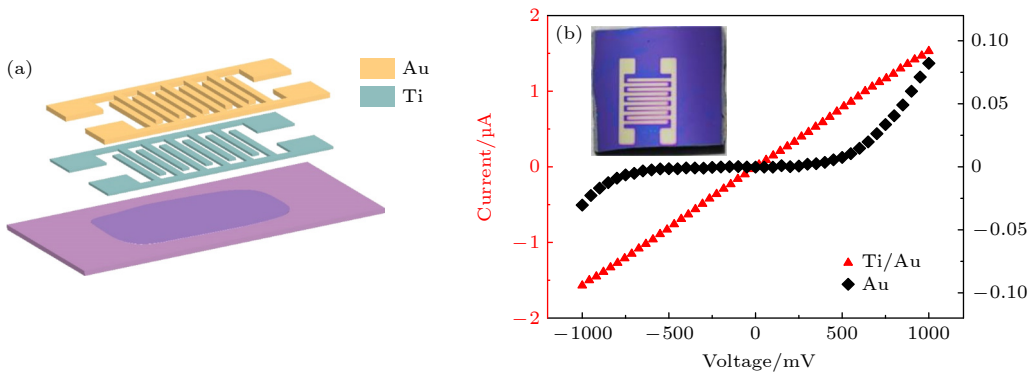


图 4 (a) 叉指电极装置示意图; (b) Au 和 Ti/Au 电极上的电流和电压曲线, 插图是 MoS<sub>2</sub> 叉指器件实物图

Fig. 4. (a) Schematic diagram of interdigital device; (b) the current and voltage curve with Au and Ti/Au electrodes, the inset shows the image of the MoS<sub>2</sub> interdigital device.

效面积,  $e$  是元电荷量. 可以计算出, 薄膜 MoS<sub>2</sub> 光电探测器在不同光波长和不同光功率下激光照射下的  $R$  和  $D^*$ . 图 5(c) 展示了 0.1 V 电压、光功率为 4 mW 条件下,  $R$  和  $D^*$  随波长的变化关系, 图 5(d) 展示了 0.1 V, 405 nm 波长条件下的  $R$  和  $D^*$  随光功率的变化关系. 可以明显看到,  $R$  和  $D^*$  随波长增大先增大后减小, 这可能是因为该薄膜 MoS<sub>2</sub> 光电探测器对 650 nm 的激光光学吸收能力最高, 因此其光吸收能力随波长增大先增大后减小, 这就意味着光生载流子先增大后减小, 因此光电流、响应度和探测率也会随着波长先增大后减小 [48]. 经计算, 4 mW 激光激发下, 改变激光波长, 发现该光

电探测器在 650 nm 可以获得最大响应度, 约为 227.9 mA/W, 相应光探测率为  $1.27 \times 10^9$  Jones, 并且在近红外波段 830 nm 仍有较高的响应度和探测率, 约为 195.5 mA/W 和  $9.06 \times 10^8$  Jones. 在波长为 405 nm 的紫光激发下, 随着激光功率的增大, 该探测器的响应度和探测率降低, 功率值为 0.125 mW 时, 该探测器达到 291.7 mA/W 的高响应度和  $1.629 \times 10^9$  Jones 的高光探测率. 图 5(e), (f) 展示了该探测器上升和下降的响应和恢复时间分别为 50.69 ms 和 50.59 ms, 均在 ms 量级. 该光电探测器具有和当前光电器件相当的响应速度和恢复时间 [44,49].

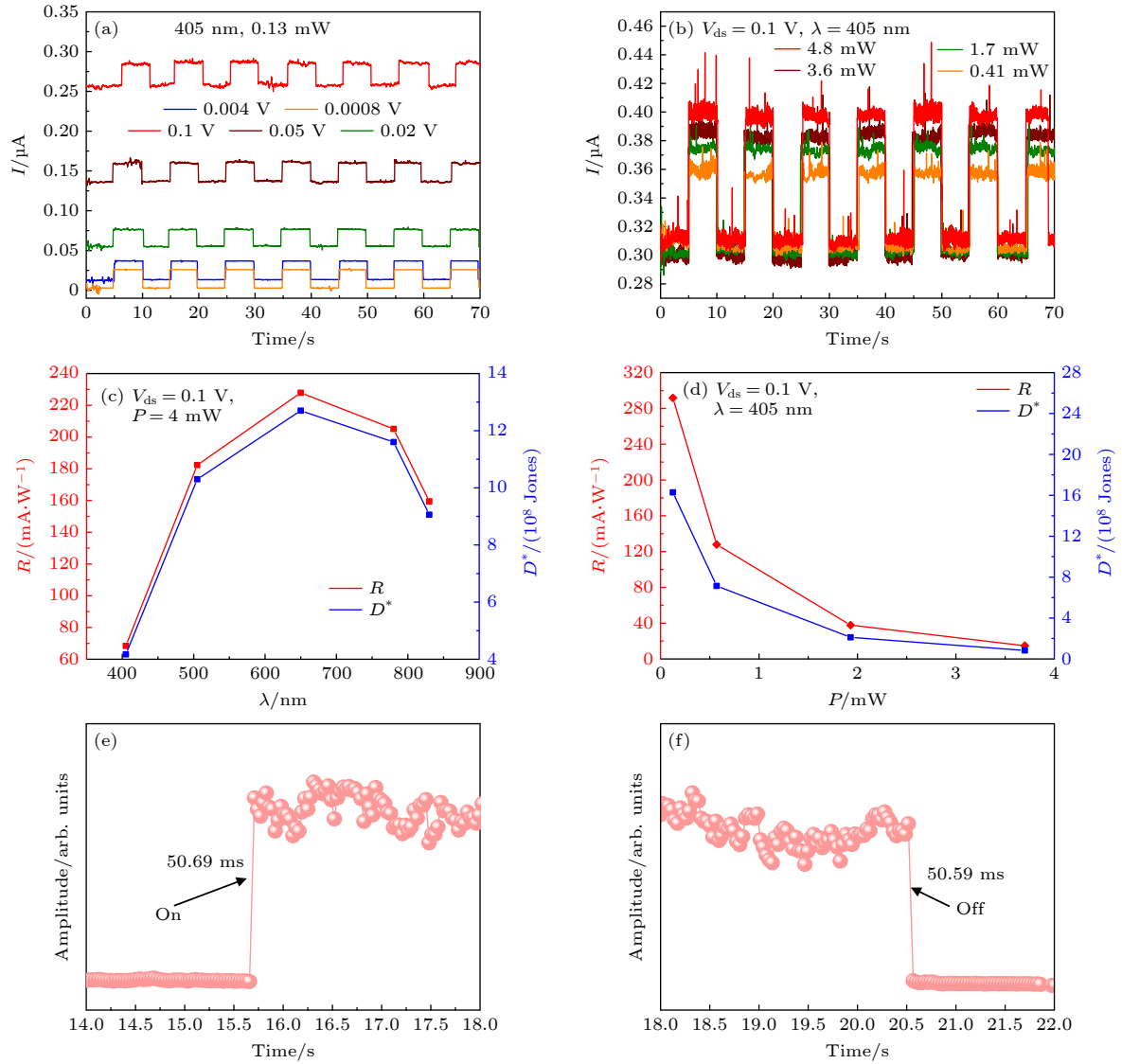


图 5 不同电压 (a) 和光功率 (b) 条件的电流随时间变化关系; 光电探测器件的响应度和探测率随波长 (c) 和光功率 (d) 的变化关系; 器件的响应上升时间 (e) 和下降恢复时间 (f)

Fig. 5. The relation of current with time under different voltage conditions (a) and different optical power conditions (b); the relationship between the responsivity and the detection rate of the photodetector with wavelength (c) and with optical power (d); the rise time (e) and the recovery time (f) of the photodetector.

## 4 总 结

二维  $\text{MoS}_2$  作为一种典型的半导体薄膜材料, 广泛应用于各种高性能光电器件的研究中, 而大面积  $\text{MoS}_2$  薄膜材料的制备是高性能器件的关键. 本工作采用化学气相沉积法在  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  衬底上直接制备了大面积单层  $\text{MoS}_2$  薄膜. 通过改变  $\text{MoO}_3$  前驱体的量, 成功地将单晶  $\text{MoS}_2$  生长成单层  $\text{MoS}_2$  薄膜. 研究发现, 在 S 源充足的条件下, 随着氧化物前驱体用量的增大,  $\text{MoS}_2$  会由单层单晶生长为单层薄膜. 基于此薄膜, 采用掩模板热蒸发镀膜法在薄膜上沉积 Ti 和 Au, 制备了大面积单层  $\text{MoS}_2$

薄膜叉指电极光电探测器, 并对其光电性能进行了研究. 通过测试和计算, 在 405 nm 激光激发下, 测试出不同电压和不同激光功率条件下每隔 5 s 的电流随时间的响应, 且具有毫秒量级的快速响应时间, 图像显示出探测器的高稳定和可重复的光电响应. 此外, 该光电探测器实现了 405—830 nm 的可见光到近红外的宽光谱检测范围, 光响应度 ( $R$ ) 高达 291.7 mA/W, 光探测率 ( $D^*$ ) 最高达  $1.63 \times 10^9$  Jones, 与现有大多数探测器性能相当. 本研究为薄膜材料和薄膜器件的制备提供了可行的方案, 同时, 该  $\text{MoS}_2$  光电探测器能够探测到 830 nm 的近红外光, 被证实为红外探测的候选材料.

## 参考文献

- [1] Gao G Y, Yu J, Yang X X, Pang Y K, Zhao J, Pan C F, Sun Q J, Wang Z L 2018 *Adv. Mater.* **31** 1806905
- [2] Li X F, Yang L M, Si M W, Li S C, Huang M Q, Ye P D, Wu Y Q 2015 *Adv. Mater.* **27** 1547
- [3] Radisavljevic B, Radenovic A, Brivio J, Giacometti V, Kis A 2011 *Nat. Nanotechnol.* **6** 147
- [4] Kaushik V, Ahmad M, Agarwal K, Varandani D, Belle B D, Das P, Mehta B R 2020 *J. Phys. Chem. C* **124** 23368
- [5] Bagot P A J, Silk O B W, Douglas J O, Pedrazzini S, Crudden D J, Martin T L, Hardy M C, Moody M P, Reed R C 2017 *Acta Mater.* **125** 156
- [6] Wang X D, Wang P, Wang J L, Hu W D, Zhou X H, Guo N, Huang H, Sun S, Shen H, Lin T, Tang M H, Liao L, Jiang A Q, Sun J L, Meng X J, Chen X S, Lu W, Chu J H 2015 *Adv. Mater.* **27** 6575
- [7] Huang Z Z, Zhang T F, Liu J K, Zhang L H, Jin Y H, Wang J P, Jiang K, Fan S, Li Q Q 2019 *ACS Appl. Electron. Mater.* **1** 1314
- [8] Furchi M M, Polyushkin D K, Pospischil A, Mueller T 2014 *Nano Lett.* **14** 6165
- [9] Lee J, Pak S, Lee Y W, Cho Y, Hong J, Giraud P, Shin H S, Morris S M, Sohn J I, Cha S, Kim J M 2017 *Nat. Commun.* **8** 14734
- [10] Lee D, Hwang E, Lee Y, Choi Y, Kim J S, Lee S, Cho J H 2016 *Adv. Mater.* **28** 9196
- [11] Choi M S, Lee G H, Yu Y J, Lee D Y, Lee S H, Kim P, Hone J, Yoo W J 2013 *Nat. Commun.* **4** 1624
- [12] Chen Y F, Wang Y, Wang Z, Gu Y, Ye Y, Chai X L, Ye J F, Chen Y, Xie R Z, Zhou Y, Hu Z G, Li Q, Zhang L L, Wang F, Wang P, Miao J S, Wang J L, Chen X S, Lu W, Zhou P, Hu W D 2021 *Nat. Electron.* **4** 357
- [13] Wu P S, Ye L, Tong L, Wang P, Wang Y, Wang H L, Ge H N, Wang Z, Gu Y, Zhang K, Yu Y Y, Peng M, Wang F, Huang M, Zhou P, Hu W D 2022 *Light Sci. Appl.* **11** 6
- [14] Van Der Zande A M, Huang P Y, Chenet D A, Berkelbach T C, You Y, Lee G H, Heinz T F, Reichman D R, Muller D A, Hone J C 2013 *Nat. Mater.* **12** 554
- [15] 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
- [16] Mak K F, Lee C, Hone J, Shan J, Heinz T F 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 136805
- [17] Li H, Wu J B, Ran F R, Lin M L, Liu X L, Zhao Y Y, Lu X, Xiong Q H, Zhang J, Huang W, Zhang H, Tan P H 2017 *ACS Nano* **11** 11714
- [18] 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
- [19] Wang L, Meric I, Huang P Y, Gao Q, Gao Y, Tran H, Taniguchi T, Watanabe K, Campos L M, Muller D A, Guo J, Kim P, Hone J, Shepard K L, Dean C R 2013 *Science* **342** 614
- [20] Yi M, Shen Z G 2015 *J. Mater. Chem. A* **3** 11700
- [21] Ren S, Rong P, Yu Q 2018 *Ceramics Int.* **44** 11940
- [22] Withers F, Yang H, Britnell L, Rooney A P, Lewis E, Felten A, Woods C R, Sanchez Romaguera V, Georgiou T, Eckmann A, Kim Y J, Yeates S G, Haigh S J, Geim A K, Novoselov K S, Casiraghi C 2014 *Nano Lett.* **14** 3987
- [23] Dean C R, Young A F, Meric I, Lee C, Wang L, Sorgenfrei S, Watanabe K, Taniguchi T, Kim P, Shepard K L, Hone J 2010 *Nat. Nanotechnol.* **5** 722
- [24] Sharma M, Singh A, Aggarwal P, Singh R 2022 *ACS Omega* **7** 11731
- [25] Fu D, Zhao X, Zhang Y Y, Li L, Xu H, Jang A R, Yoon S I, Song P, Poh S M, Ren T 2017 *J. Am. Chem. Soc.* **139** 9392
- [26] Lee C H, Zhang Y, Johnson J M, Koltun R, Gambin V, Jamison J S, Myers R C, Hwang J, Rajan S 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 123102
- [27] Jie W J, Yang Z B, Zhang F, Bai G X, Leung C W, Hao J H 2017 *ACS Nano* **11** 6950
- [28] Kodu M, Avarmaa T, Jaaniso R, Leemets K, Mändar H, Nagirnyi V 2016 *Superlattices Microstruct.* **98** 18
- [29] Wang J, Fan L, Wang X M, Xiao T T, Peng L P, Wang X M, Yu J, Cao L H, Xiong Z W, Fu Y J, Wang C B, Shen Q, Wu W D 2019 *Appl. Surf. Sci.* **494** 651
- [30] Gong Y J, Lin J H, Wang X L, Shi G, Lei S D, Lin Z, Zou X L, Ye G L, Vajtai R, Yakobson B I, Terrones H, Terrones M, Tay B K, Lou J, Pantelides S T, Liu Z, Zhou W, Ajayan P M 2014 *Nat. Mater.* **13** 1135
- [31] Hu S, Wang X F, Meng L, Yan X 2017 *J. Mater. Sci.* **52** 7215
- [32] Liu P Y, Luo T, Xing J, Xu H, Hao H Y, Liu H, Dong J J 2017 *Nanoscale Res. Lett.* **12** 558
- [33] Li M G, Yao J D, Wu X X, Zhang S C, Xing B R, Niu X Y, Yan X Y, Yu Y, Liu Y L, Wang Y W 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 6276
- [34] Li J, Yang X D, Liu Y, Huang B L, Wu R X, Zhang Z W, Zhao B, Ma H F, Dang W Q, Wei Z, Wang K, Lin Z Y, Yan X X, Sun M Z, Li B, Pan X Q, Luo J, Zhang G Y, Liu Y, Huang Y, Duan X D, Duan X F 2020 *Nature* **579** 368
- [35] Zhang Z W, Huang Z W, Li J, Wang D, Lin Y, Yang X D, Liu H, Liu S, Wang Y L, Li B, Duan X F, Duan X D 2022 *Nat. Nanotechnol.* **17** 493
- [36] Lopez-Sanchez O, Lembke D, Kayci M, Radenovic A, Kis A 2013 *Nat. Nanotechnol.* **8** 497
- [37] Zhang W, Huang J K, Chen C H, Chang Y H, Cheng Y J, Li L J 2013 *Adv. Mater.* **25** 3456
- [38] Di Bartolomeo A, Genovese L, Foller T, Giubileo F, Luongo G, Croin L, Liang S J, Ang L K, Schleberger M 2017 *Nanotechnology* **28** 214002
- [39] Nie C B, Yu L Y, Wei X Z, Shen J, Lu W Q, Chen W M, Feng S L, Shi H F 2017 *Nanotechnology* **28** 275203
- [40] Han P, St Marie L, Wang Q X, Quirk N, El Fatimy A, Ishigami M, Barbara P 2018 *Nanotechnology* **29** 20LT01
- [41] Pak Y, Park W, Mitra S, Sasikala Devi A A, Loganathan K, Kumaresan Y, Kim Y, Cho B, Jung G Y, Hussain M M, Roqan I S 2018 *Small* **14** 201703176
- [42] Radisavljevic B, Kis A 2013 *Nat. Mater.* **12** 815
- [43] Wang J, Yao Q, Huang C W, Zou X, Liao L, Chen S, Fan Z, Zhang K, Wu W, Xiao X, Jiang C, Wu W W 2016 *Adv. Mater.* **28** 8302
- [44] Li Y N, Li L N, Li S S, Sun J Y, Fang Y, Deng T 2022 *ACS Omega* **7** 13615
- [45] Zhao T G, Guo J X, Li T T, Wang Z, Peng M, Zhong F, Chen Y, Yu Y Y, Xu T F, Xie R Z, Gao P Q, Wang X R, Hu W D 2023 *Chem. Soc. Rev.* **52** 1650
- [46] Suleman M, Lee S, Kim M, Nguyen V H, Riaz M, Nasir N, Kumar S, Park H M, Jung J, Seo Y 2022 *ACS Omega* **7** 30074
- [47] Sun P, Liu Y W, Ma J, Li W, Zhang K L, Yuan Y J 2019 *CrystEngComm* **21** 6969
- [48] Zhao T G, Zhong F, Wang S C, Wang Y K, Xu T F, Chen Y, Yu Y Y, Guo J X, Wang Z, Yu J C, Gao P Q 2022 *Adv. Opt. Mater.* **11** 2202208
- [49] Sinha S, Kumar S, Arora SK, Sharma A, Tomar M, Wu H C, Gupta V 2021 *J. Appl. Phys.* **129** 155304

# Preparation and photoelectric property of large scale monolayer MoS<sub>2</sub><sup>\*</sup>

Wu Peng<sup>1)</sup> Tan Lun<sup>2)</sup> Li Wei<sup>1)</sup> Cao Li-Wei<sup>1)</sup>

Zhao Jun-Bo<sup>1)</sup> Qu Yao<sup>1)</sup> Li Ang<sup>1)†</sup>

1) (*Beijing Key Lab of Microstructure and Properties of Advanced Materials, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

2) (*Hubei Engineering Research Center for Safety Detection and Control of Hydrogen Energy, School of Physics and Electronic Sciences, Hubei University, Wuhan 430062, China*)

( Received 24 February 2023; revised manuscript received 4 April 2023 )

## Abstract

Transition metal dichalcogenide (TMDC) monolayers exhibit enhanced electrical and optoelectrical properties, which are promising for next-generation optoelectronic devices. However, large-scale and uniform growth of TMDC monolayers with large grain size is still a considerable challenge. Presented in this work is a simple and effective approach to fabricating largescale molybdenum (MoS<sub>2</sub>) disulfide monolayers by chemical vapor deposition (CVD) method. It is found that MoS<sub>2</sub> grows from single crystal into thin film with the increase of oxide precursor proportion. The photodetector of large scale monolayer layer MoS<sub>2</sub> film is fabricated by depositing metal electrodes on the interdigital electrode mask through using thermal evaporation coating. Finally, the highly stable and repeatable photoelectric responses under the conditions of different voltages and different laser power are characterized under 405-nm laser excitation, with response time decreasing down to the order of milliseconds (ms). In addition, the photodetector achieves a wide spectral detection range from 405 nm to 830 nm, that is, from visible light to near-infrared light wavelength range, with optical response ( $R$ ) of 291.7 mA/W and optical detection rate ( $D^*$ ) of  $1.629 \times 10^9$  Jones. The monolayer MoS<sub>2</sub> thin film photodetector demonstrated here has the advantages of low cost, feasibility of large-scale preparation, and good stability and repeatability in the wide spectrum range from visible light to near infrared light wavelength, providing the possibilities for future applications of electronic and optoelectronic devices .

**Keywords:** MoS<sub>2</sub>, chemical vapor deposition, photodetector, photoelectric response

**PACS:** 81.07.-b, 81.15.Gh, 81.10.-h, 68.55.A-

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230273

\* Project supported by the Beijing Outstanding Young Scientists Projects, China (Grant No. BJJWZYJH01201910005018) and the National Key Research and Development Program, China (Grant No. 2021YFA1200201).

† Corresponding author. E-mail: [ang.li@bjut.edu.cn](mailto:ang.li@bjut.edu.cn)

## 大面积单层二硫化钼的制备及其光电性能

武鹏 谈论 李炜 曹立伟 赵俊博 曲尧 李昂

### Preparation and photoelectric property of large scale monolayer MoS<sub>2</sub>

Wu Peng Tan Lun Li Wei Cao Li-Wei Zhao Jun-Bo Qu Yao Li Ang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 118101 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230273

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230273>

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

硅基底上二维硒氧化铋的化学气相沉积法合成及其光电探测应用

Synthesis of two-dimensional Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se on silicon substrate by chemical vapor deposition and its photoelectric detection application

物理学报. 2022, 71(16): 166101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220388>

单层二硫化钼的制备及在器件应用方面的研究

Controllable growth of monolayer MoS<sub>2</sub> films and their applications in devices

物理学报. 2022, 71(10): 108102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212447>

高质量单层二硫化钼薄膜的研究进展

Research progress of high-quality monolayer MoS<sub>2</sub> films

物理学报. 2018, 67(12): 128103 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180732>

单层MoS<sub>2</sub>薄膜的NaCl双辅助生长方法

Growth of monolayer MoS<sub>2</sub> films dual-assisted by NaCl

物理学报. 2022, 71(12): 128104 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220273>

基于熔融玻璃的预沉积法生长毫米级单晶MoS<sub>2</sub>及WS<sub>2</sub>-MoS<sub>2</sub>异质结

Millimeter-level MoS<sub>2</sub> monolayers and WS<sub>2</sub>-MoS<sub>2</sub> heterojunctions grown on molten glass by pre-chemical vapor deposition

物理学报. 2022, 71(4): 048101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211735>

化学气相沉积法制备大面积二维材料薄膜: 方法与机制

Chemical vapor deposition growth of large-areas two dimensional materials: Approaches and mechanisms

物理学报. 2021, 70(2): 026802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201398>