

# 大面积单层二硫化钼的制备及其光电性能研究\*

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)

## 摘要

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 仍然是相当大的挑战。在这项工作中, 我们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, 利用叉指电极掩模板制备出单层  $\text{MoS}_2$  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 nm ~ 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:  $\text{MoS}_2$ ; CVD; 光电探测器; 光电响应

PACS: 81.07.-b, 81.15.Gh, 81.10.-h,<sup>2</sup> 68.55.A-

基金: 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）。

† 通讯作者.E-mail: ang.li@bjut.edu.cn

第一作者.E-mail: s202026015@emails.bjut.edu.cn

## 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<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。

MoS<sub>2</sub> 作为一种 TMDCs 材料，因其单层结构具备的直接带隙结构而显示的优异光学性能<sup>[36-41]</sup>和优异的电学性能<sup>[42-44]</sup>而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（NaCl）辅助生长等生长影响因素和衬底工程策略<sup>[45]</sup>，制备 MoS<sub>2</sub> 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 MoS<sub>2</sub> 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（MoO<sub>3</sub>）的量，成功获得了大面积单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜。以生长的单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜为基础，制备单层 MoS<sub>2</sub> 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 nm ~ 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。

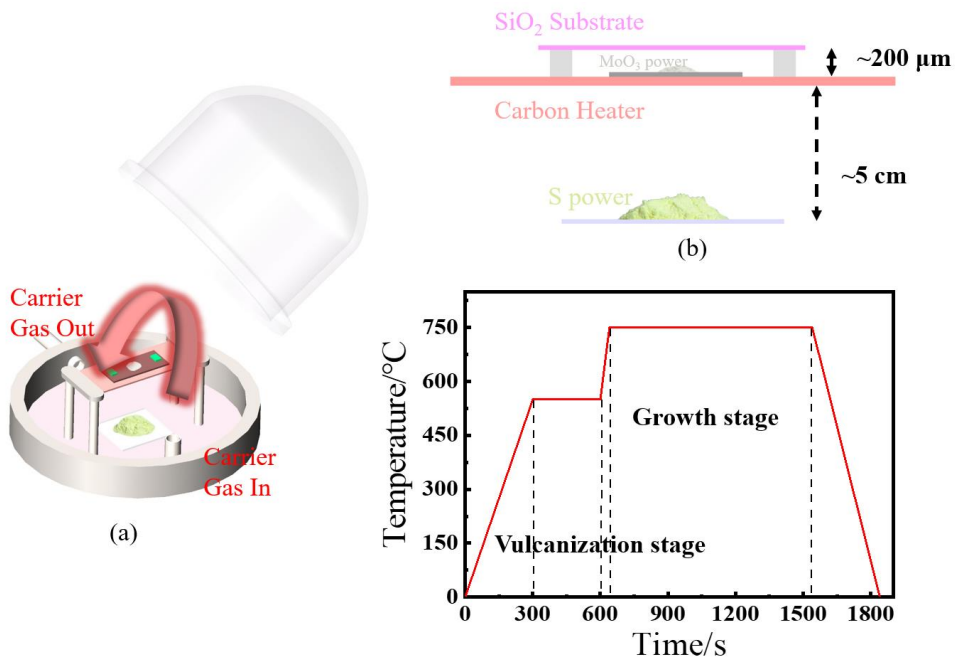
## 2 实验方法

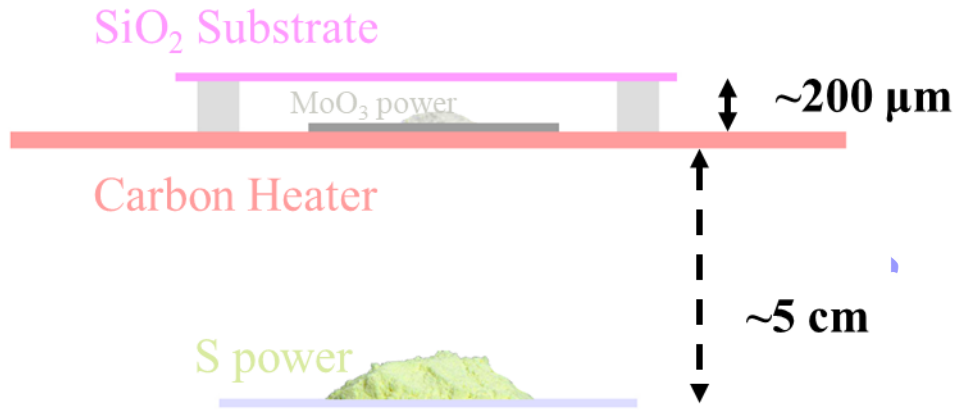
### 2.1 样品生长

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 英寸晶圆  $\text{Si/SiO}_2$  (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 分钟,得到均匀分散液。

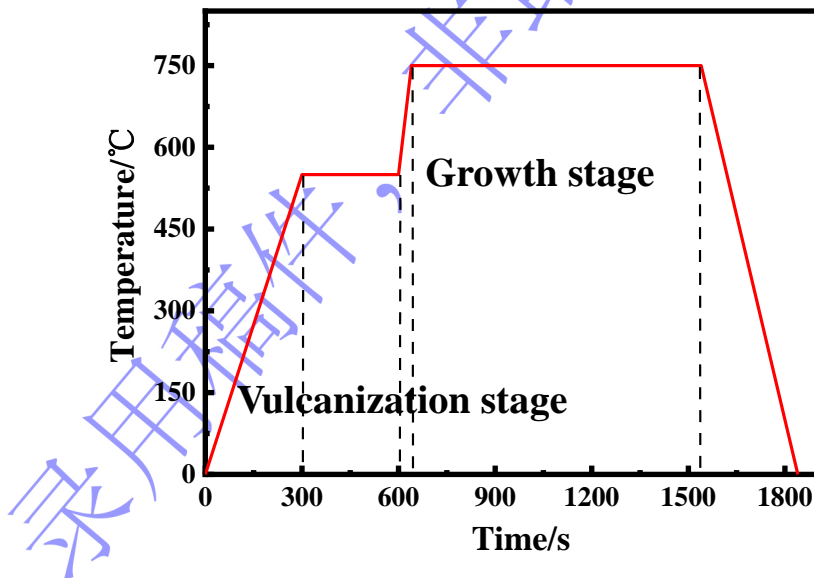
实验装置如图 1 (a) 和图 1 (b) 所示。将  $\text{Si/SiO}_2$  衬底倒置放在滴有前驱体分散液的 Si 片上,形成  $\text{Si/SiO}_2$  生长衬底、生长腔空间、前驱体和 Si 衬底的限域空间。生长过程中需要以氩气为载气,保证 S 源能够顺利进入该限域空间。此外,狭小的空间能够使得前驱体发生反应后迅速在  $\text{Si/SiO}_2$  衬底上生长。实验前,将 S 粉放在石英舟内,置于碳布热源下方,此时 S 可以获得足够的热量,达到蒸发温度,与 Si 衬底上的前驱体氧化物发生化学反应,最终在最上方的  $\text{Si/SiO}_2$  衬底上完成生长。生长过程中以 10 sccm 氩气 (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。在第一阶段是硫化阶段,将碳布的温度提高到  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ ,并保持 300 秒,使 S 前驱体蒸发,并确保环境中有足够的 S。第二阶段是生长阶段,将碳布温度提高到  $750 \text{ }^\circ\text{C}$ ,保持 900 秒,此时  $\text{MoO}_3$  前驱体也达到蒸发温度, 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。





(图 (a) (b) 是 powerpoint 软件处理的图片，图 (c) origin 软件绘制的插图)



(c) (origin软件绘制的插图)

图 1 (a) CVD 生长单层 MoS<sub>2</sub> 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 MoS<sub>2</sub> synthesis. (b) Enlarged view of the chemical reaction zone. (c) Temperature curve of CVD growth process.

2

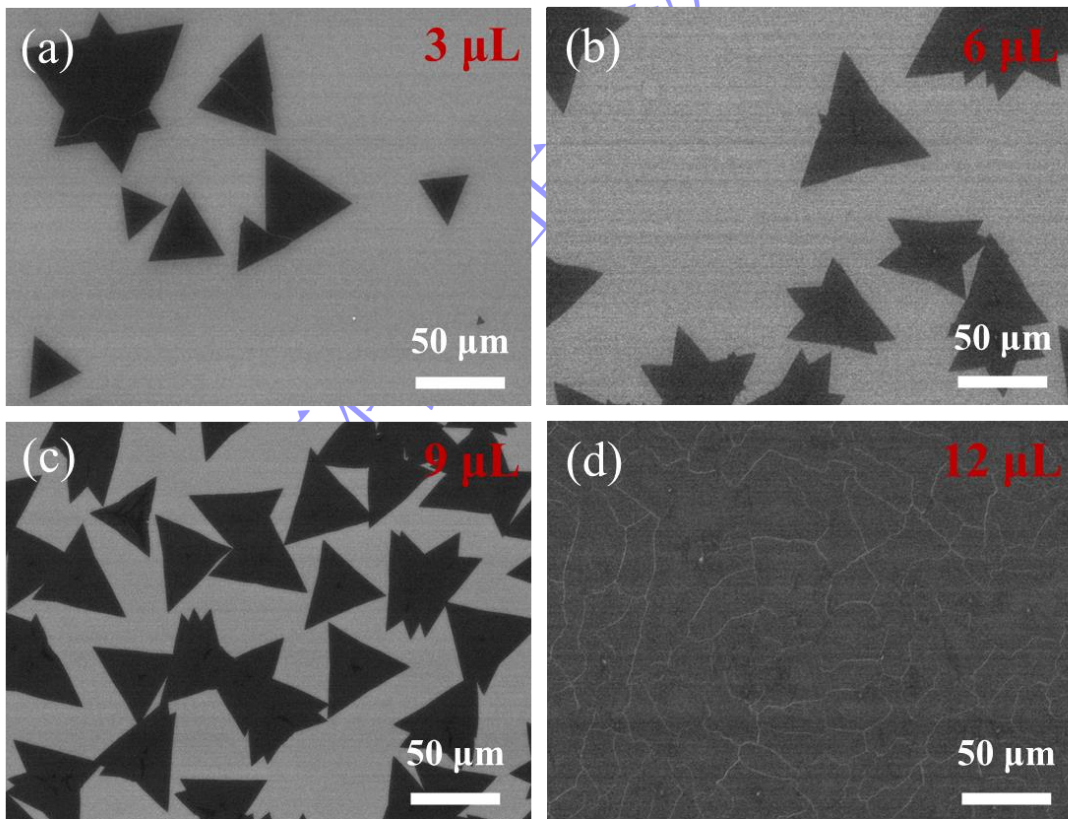
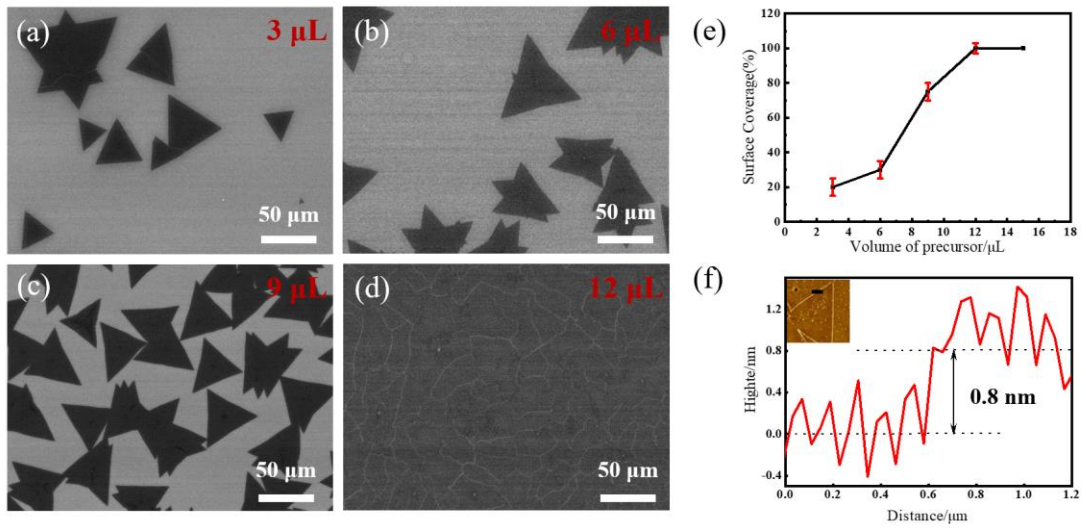
## 2.2 样品表征及测试

采用光学显微镜 (OM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 对 MoS<sub>2</sub> 的表面形貌进

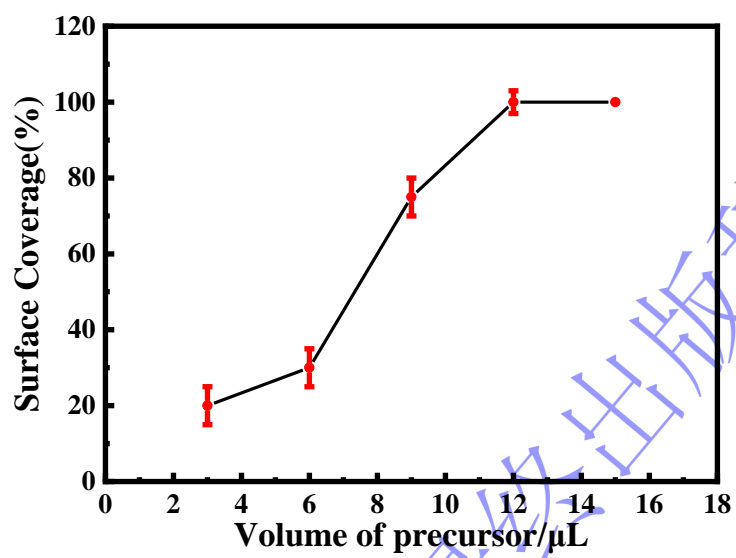
行了表征。在 532 nm 激光模式下使用拉曼系统进行拉曼光谱和相应的拉曼成像测试。利用原子力显微镜 (AFM) 测定了 MoS<sub>2</sub> 的厚度。使用 KEITHLEY 源表 (2612B) 和 405 nm (OM-12A405-3-G)、505 nm (OM-12A505-3-G)、650 nm (OM-12A650-3-G)、780 nm (OM-12A780-3-G) 以及 830 nm (OM-12A830-3-G) 激光光源测试光电探测器的光电特性。上述试验均在常温常压环境下完成。

### 3 结果与讨论

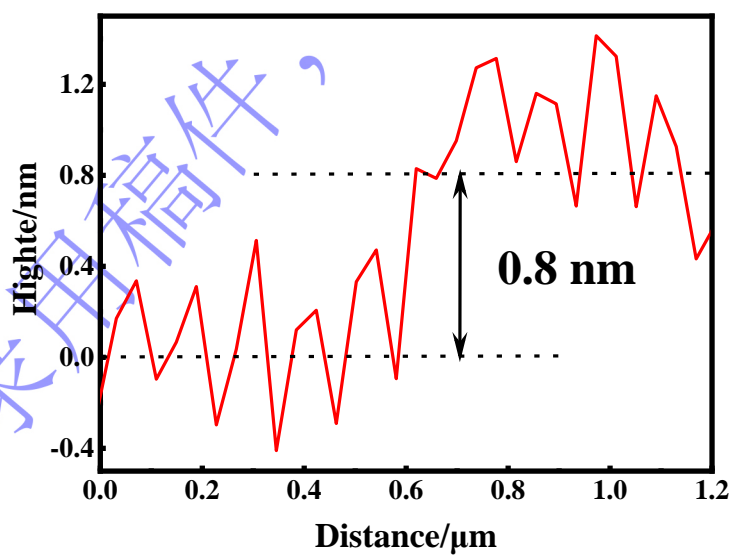
为了研究 MoO<sub>3</sub> 前驱体量对 MoS<sub>2</sub> 产物的影响, 实验中, MoO<sub>3</sub> 量按 3 微升的梯度依次增大, 其他参数保持一致。所得样品的 SEM 图像如图 2 (a) ~ (d) 所示。在图 2 (e) 中, 可以明显观察到 MoS<sub>2</sub> 在整个衬底中的面积随着 MoO<sub>3</sub> 前驱体体积的增加而增加, 直至形成连续的单层膜。实验表明, 随着 MoO<sub>3</sub> 量增加, 单层 MoS<sub>2</sub> 薄膜在衬底上的覆盖率逐渐增加。当 MoO<sub>3</sub> 量增加到 12 微升时, 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。



(图 (a) (b) (c) (d) 是 powerpoint 软件处理的图片，图 (e) (f) origin 软件绘制的插图)



(e) (origin 软件绘制的插图)



(f) (origin 软件绘制的插图)



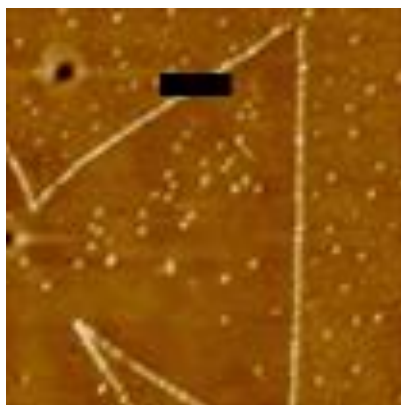
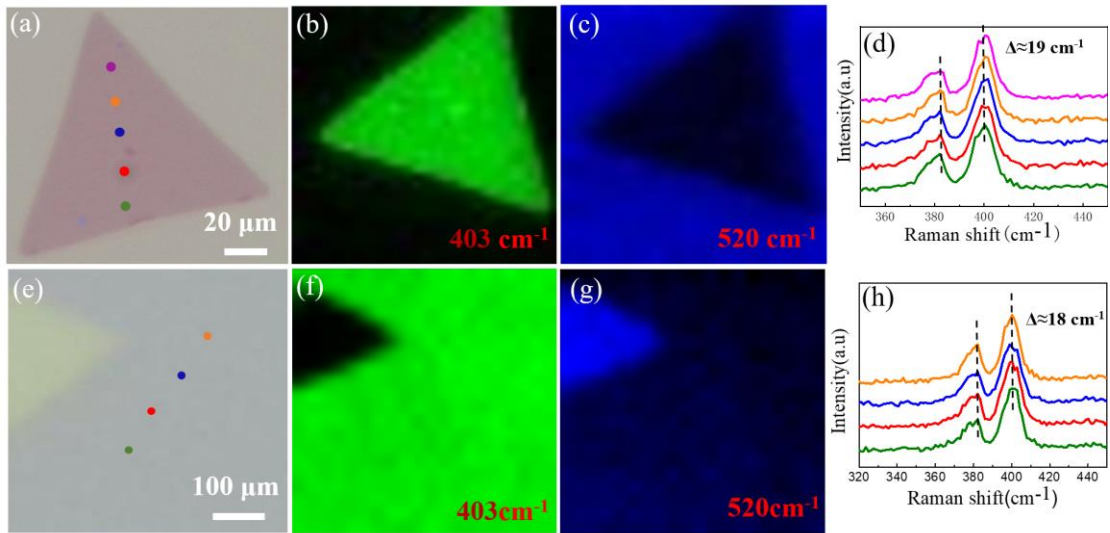


图 2 (a) ~ (d) 不同  $\text{MoO}_3$  前驱体量下制备的  $\text{MoS}_2$  的 SEM 形貌; (e)  $\text{MoS}_2$  覆盖率随前驱体量的变化曲线; (f)  $\text{MoS}_2$  的 AFM 照片 (插图) 和图中黑线高度随位置的变化曲线

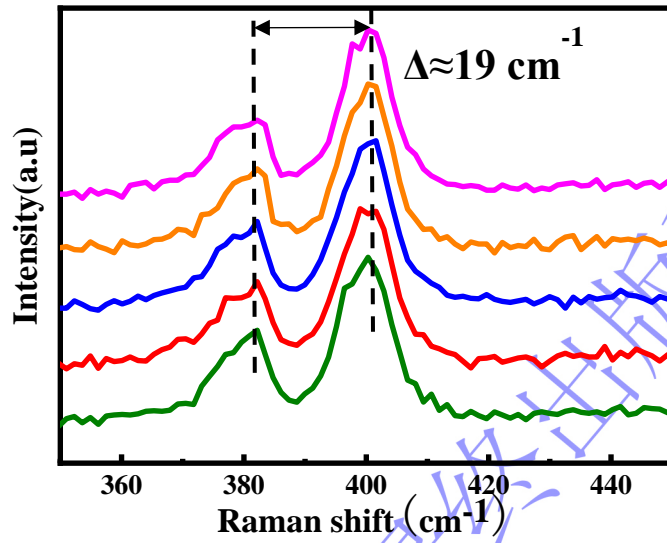
Fig. 2 (a) ~ (d) SEM morphologies of  $\text{MoS}_2$  prepared under different volumes of  $\text{MoO}_3$  precursor.

(e) Curve of  $\text{MoS}_2$  coverage with precursor volume. (f) The height of  $\text{MoS}_2$  as a function of position marked as black line in the inset. (Inset: AFM photograph of  $\text{MoS}_2$ .)

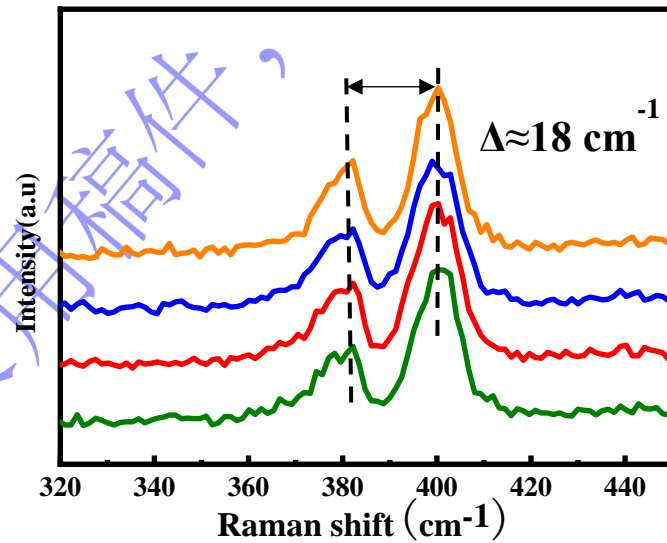
拉曼光谱仪研究了  $\text{MoS}_2$  在 532 nm 激光激发模式下的光学性质。如图 3 所示, 图 3 (a) 是单晶  $\text{MoS}_2$  的 OM 图像; 图 3 (b) 是在  $403 \text{ cm}^{-1}$  处的单晶  $\text{MoS}_2$  拉曼成像图。图 3 (c) 为  $520 \text{ cm}^{-1}$  处的拉曼成像图, 对应  $\text{SiO}_2$  特征峰的位置。分别测量图 3 (a) 中随机选取的 5 个点的拉曼光谱, 其对应的  $\text{MoS}_2$  峰宽间距约为  $19 \text{ cm}^{-1}$ 。理论定义峰宽小于  $20 \text{ cm}^{-1}$  为单层  $\text{MoS}_2$ 。实验结果表明, 本实验生长的  $\text{MoS}_2$  单晶为单层单晶材料。图 3 (e) 为  $\text{MoS}_2$  薄膜的 OM 图像。图 3 (f) 是  $\text{MoS}_2$  在  $403 \text{ cm}^{-1}$  处的拉曼成像图。图 3 (g) 为  $520 \text{ cm}^{-1}$  处的拉曼成像, 对应  $\text{SiO}_2$  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  $\text{MoS}_2$  峰宽间距约为  $18 \text{ cm}^{-1}$ , 同样证明本实验所制备的  $\text{MoS}_2$  薄膜具有单层性质。



(图 (a) (b) (c) (e) (f) (g) 是 powerpoint 软件处理的图片，图 (d) (h) 是 origin 软件绘制的插图)



(d) (origin 软件绘制的插图)



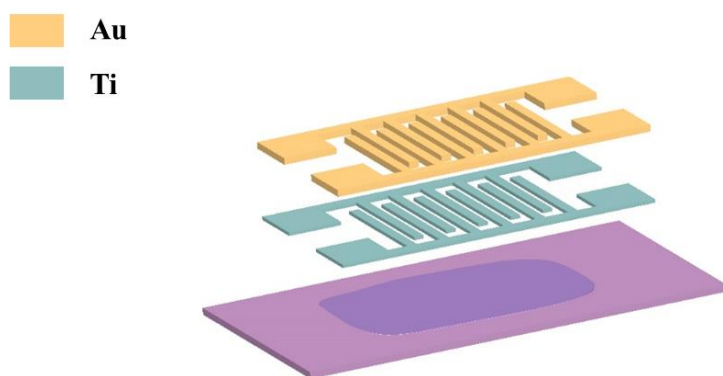
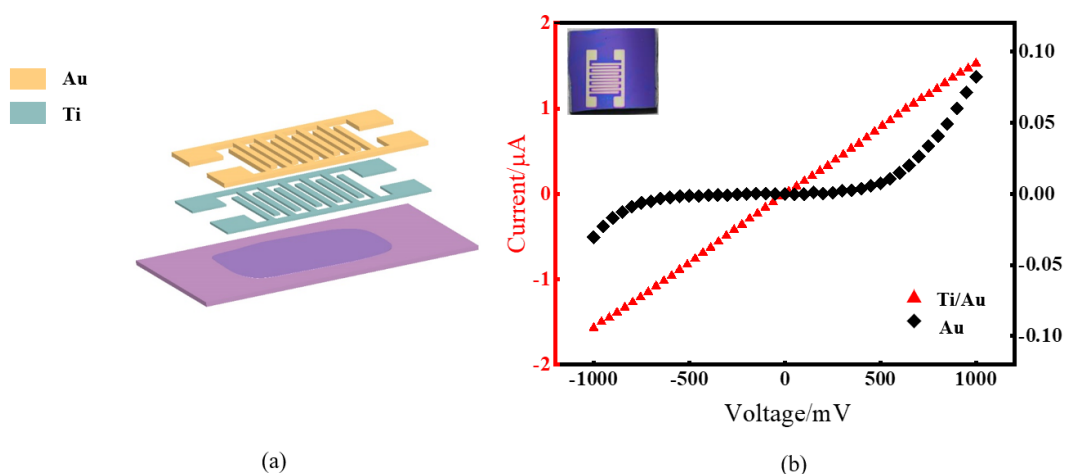
(h) (origin 软件绘制的插图)

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

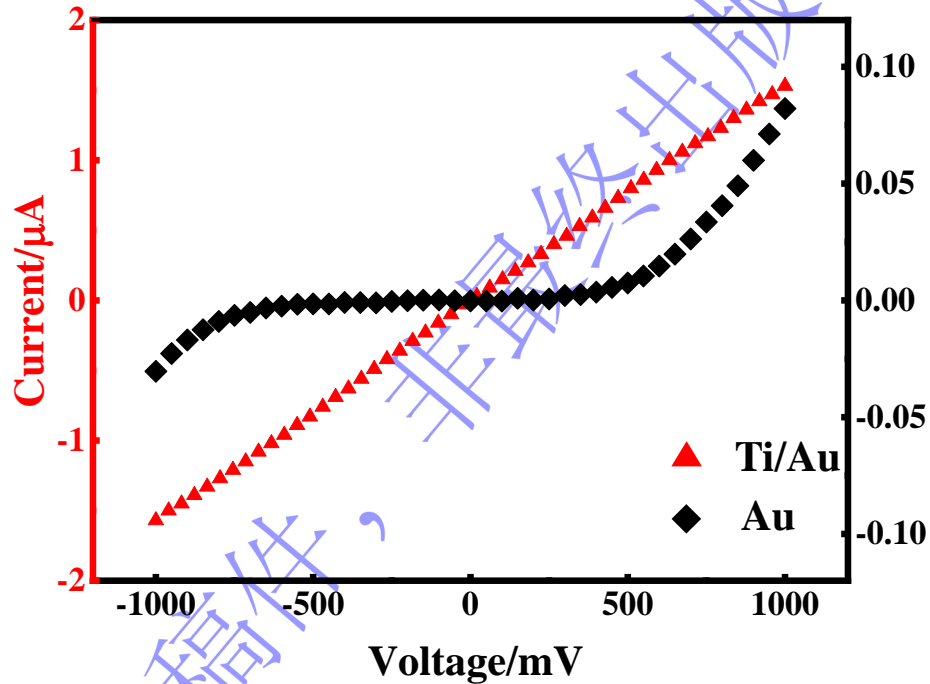
MoS<sub>2</sub>. (c) Raman mapping of Si/SiO<sub>2</sub> substrate. (d) Raman spectra of each point in figure (a). (e) Optical microscope image of thin film MoS<sub>2</sub>. (f) Raman mapping of thin film MoS<sub>2</sub>. (g) Raman mapping of Si/SiO<sub>2</sub> substrate. (h) Raman spectra of each point in figure(e).

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。





(图 (a) 是 powerpoint 软件处理的图片, 图 (b) 是 origin 软件绘制的插图)



(b) (origin 软件绘制的插图)

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.

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 秒随时间周期性变化的图像, 如图 5

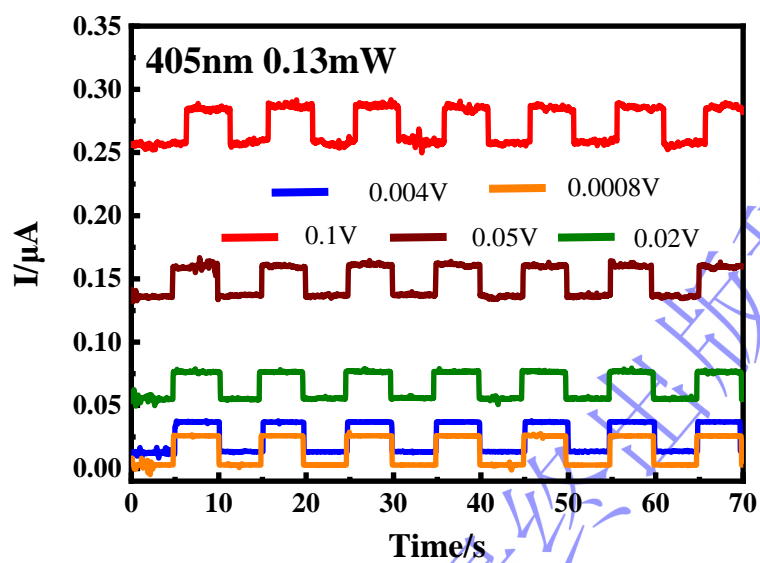
(a) 所示, 该光电探测器具有良好的稳定性和重复性。固定电压为 0.1 V, 测试到不同光功率下探测器的光电流每隔 5 秒随时间周期性变化的图像, 如图 5 (b)

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：

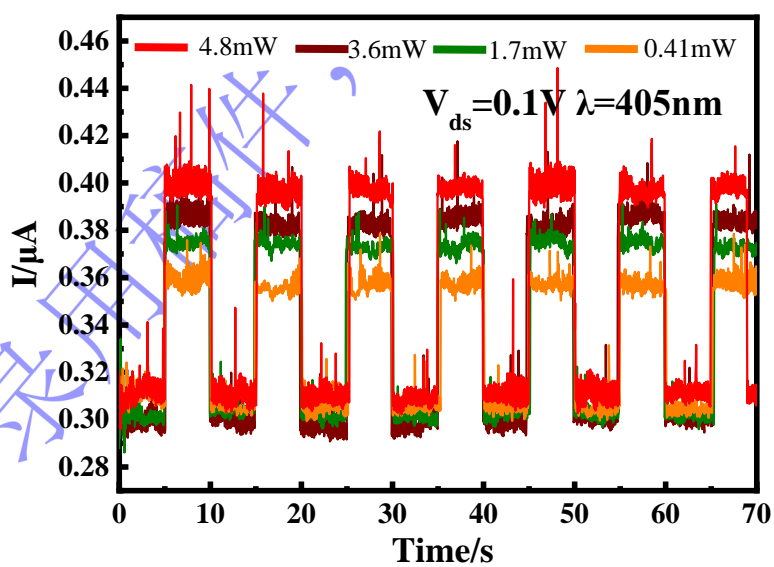
$$R = \frac{I_{ds} - I_{dark}}{\frac{P}{S_1} S_2}$$

$$D^* = \frac{R\sqrt{S_2}}{\sqrt{2eI_{dark}}}$$

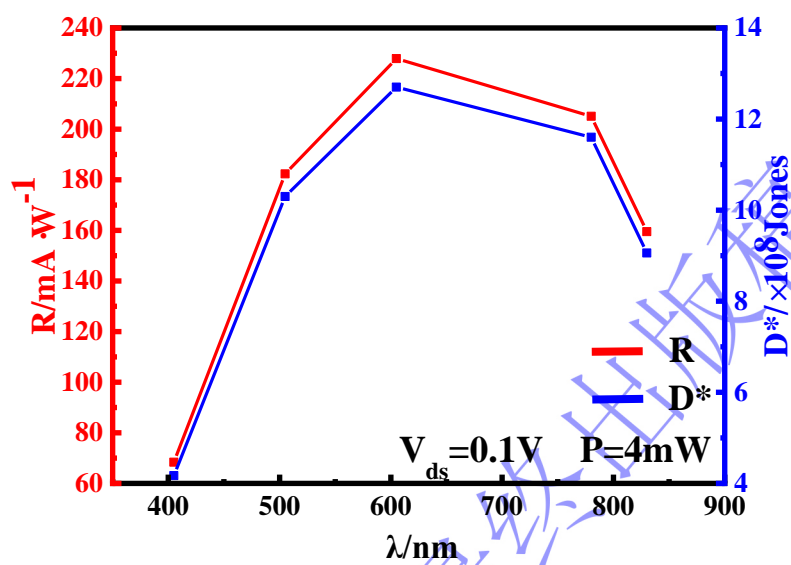
其中， $I_{ds}$ 是光电流， $I_{dark}$ 是暗电流， $P$ 是光功率， $S_1$ 是光功率计的受光面积， $S_2$ 是探测器材料的有效面积， $e$ 是元电荷量。可以计算出，薄膜  $\text{MoS}_2$  光电探测器在不同光波长和不同光功率下激光照射下的  $R$  和  $D^*$ 。图 5 (c) 展示了 0.1 V 电压、光功率为 4 mW 条件下， $R$  和  $D^*$ 随波长的变化关系，图 5 (d) 展示了 0.1 V、405 nm 波长条件下的  $R$  和  $D^*$ 随光功率的变化关系。可以明显看到， $R$  和  $D^*$ 随波长增加先增加后减小，这可能是因为该薄膜  $\text{MoS}_2$  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加先增加后减小，这就意味着光生载流子先增加后减小，因此光电流、响应度和探测率也会随着波长先增加后减小<sup>[48]</sup>。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 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，我们发现随着激光功率的增大，该探测器的响应度和探测率在降低，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) 和 (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<sup>[44, 49]</sup>。



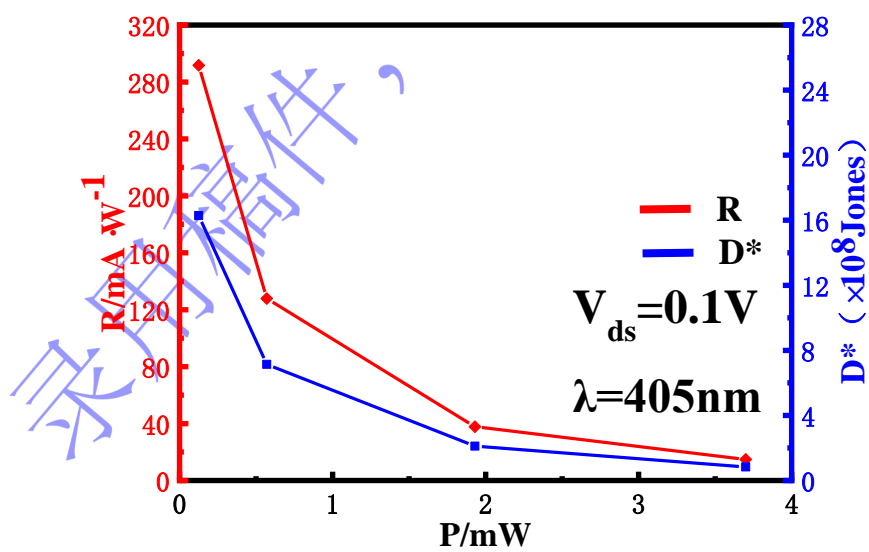
(a) (origin 软件绘制的插图)



(b) (origin 软件绘制的插图)

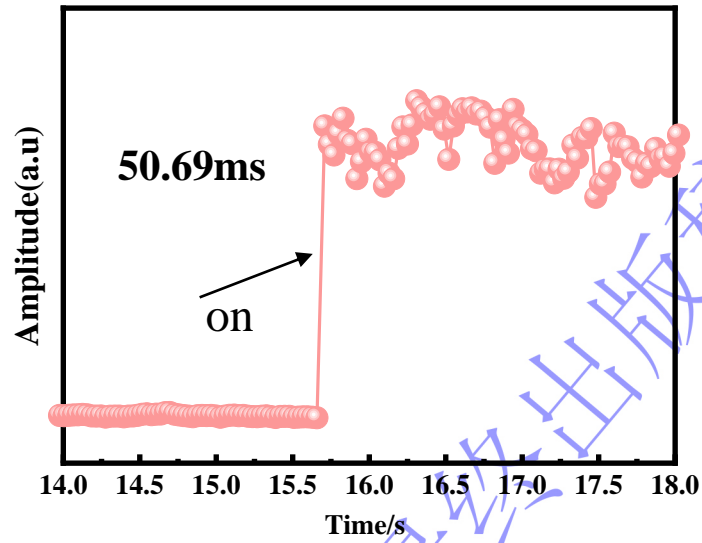


(c) (origin 软件绘制的插图)

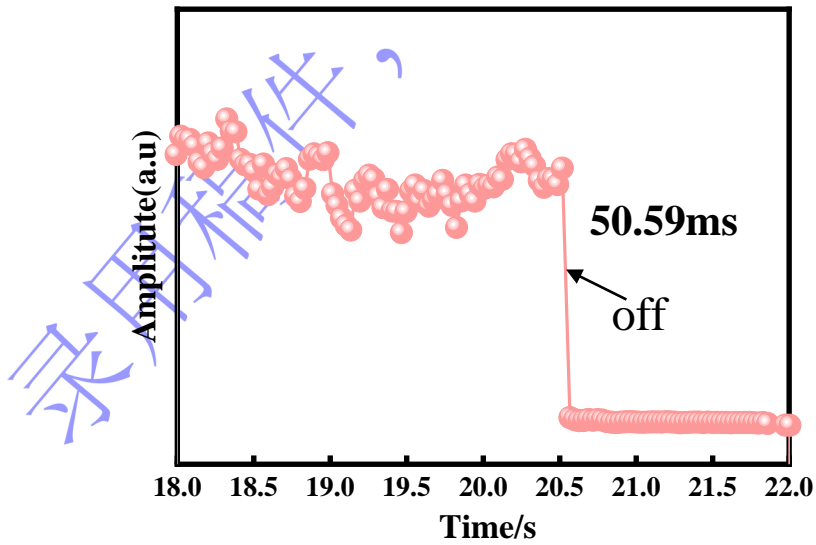


(d) (origin 软件绘制的插图)





(e) (origin 软件绘制的插图)



(f) (origin 软件绘制的插图)

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

Fig. 5 (a) The relation of current with time under different voltage conditions. (b) The change of

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

## 5 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  $\text{Si/SiO}_2$  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，随着氧化物前驱体量的增加， $\text{MoS}_2$  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 秒 (s) 的电流随时间的响应，且具有 ms 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 nm ~ 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**

- [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** 1547-1552
- [3] Radisavljevic B, Radenovic A, Brivio J, Giacometti V, Kis A 2011 *Nat. Nanotechnol.* **6** 147-150
- [4] Kaushik V, Ahmad M, Agarwal K, Varandani D, Belle B D, Das P, Mehta B R 2020 *J. Phys. Chem. C* **124** 23368-23379
- [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** 156-165
- [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** 6575-6581
- [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** 1314-1321
- [8] Furchi M M, Polyushkin D K, Pospischil A, Mueller T 2014 *Nano Lett.* **14** 6165-6170
- [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** 9196-9202
- [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** 357-363
- [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** 554-561
- [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** 3695-3700
- [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** 11714-11723
- [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** 666-669
- [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** 614-617
- [20] Yi M, Shen Z G 2015 *J. Mater. Chem. A* **3** 11700-11715
- [21] Ren S, Rong P, Yu Q 2018 *Ceramics Int.* **44** 11940-11955
- [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** 3987-3992
- [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** 722-726
- [24] Sharma M, Singh A, Aggarwal P, Singh R 2022 *ACS Omega* **7** 11731-11741
- [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** 9392-9400
- [26] Lee C H, Zhang Y, Johnson J M, Koltun R, Gambin V, Jamison J S, Myers R C, Hwang J, Rajan S

- [27] Jie W J, Yang Z B, Zhang F, Bai G X, Leung C W, Hao J H 2017 *ACS Nano* **11** 6950-6958
- [28] Kodu M, Avarmaa T, Jaaniso R, Leemets K, Mändar H, Nagirnyi V 2016 *Superlattices Microstruct.* **98** 18-28
- [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** 651-658
- [30] Gong Y, Lin J, Wang X, Shi G, Lei S, Lin Z, Zou X, Ye G, 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** 1135-1142
- [31] Hu S, Wang X F, Meng L, Yan X 2017 *J. Mater. Sci.* **52** 7215-7223
- [32] Liu P, Luo T, Xing J, Xu H, Hao H, Liu H, Dong J 2017 *Nanoscale Res. Lett.* **12** 558
- [33] Li M, Yao J, Wu X, Zhang S, Xing B, Niu X, Yan X, Yu Y, Liu Y, Wang Y 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 6276-6282
- [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** 368-374
- [35] Zhang Z, Huang Z, Li J, Wang D, Lin Y, Yang X, Liu H, Liu S, Wang Y, Li B 2022 *Nat. Nanotechnol.* **17** 493-499
- [36] Lopez-Sanchez O, Lembke D, Kayci M, Radenovic A, Kis A 2013 *Nat. Nanotechnol.* **8** 497-501
- [37] Zhang W, Huang J K, Chen C H, Chang Y H, Cheng Y J, Li L J 2013 *Adv. Mater.* **25** 3456-3461
- [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, Yu L, Wei X, Shen J, Lu W, Chen W, Feng S, Shi H 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** 815-820
- [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** 8302-8308
- [44] Li Y, Li L, Li S, Sun J, Fang Y, Deng T 2022 *ACS Omega* **7** 13615-13621
- [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** 1650-1671
- [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** 30074-30086
- [47] Sun P, Liu Y, Ma J, Li W, Zhang K, Yuan Y 2019 *CrystEngComm* **21** 6969-6977
- [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

## Large scale monolayer MoS<sub>2</sub> preparation and photoelectric property study<sup>2</sup>

Wu Peng<sup>1)</sup> TanLun<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) (Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing Key Lab of Microstructure and Properties of

Advanced Materials, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China)

2) (Hubei Engineering Research Center for Safety Detection and Control of Hydrogen Energy, Faculty

of Physics and Electronic Sciences, Hubei University, Wuhan, 430062, China)

### 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. In this work, a simple and effective approach for largescale molybdenum (MoS<sub>2</sub>) disulfide monolayers is presented by chemical vapor deposition (CVD) method. It is found that MoS<sub>2</sub> grew from single crystal to thin film with the increasing of oxide precursor proportion. The photodetector of large scale monolayer layer MoS<sub>2</sub> film was fabricated by depositing metal electrodes on the interdigital electrode mask using thermal evaporation coating. Finally, the highly stable and repeatable photoelectric response at different voltages and different laser power conditions was characterized under 405 nm laser excitation, with response time down to the order of milliseconds (ms). In addition, the photodetector achieved a wide spectrum detection range of 405 nm to 830 nm which from visible to near infrared, with optical response ( $R$ ) up to 291.7 mA/W and optical detection rate ( $D^*$ ) up to  $1.629 \times 10^9$  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 to near infrared, which providing the possibilities for the application of electronic and optoelectronic devices in the near future.

Key words: MoS<sub>2</sub>; CVD; Photodetector; Photoelectric response

\* Project supported Beijing Outstanding Young Scientists Projects (Grant No. BJJWZYJH01201910005018) and National key research and development program (Grant No.2021YFA1200201).