

# Research Progress of MoS<sub>2</sub> Nanosheets

Xuan Wang, Li Song, Lu Chen, Huanhuan Song, Yongping Zhang\*

Faculty of Materials and Energy, Southwest University, Chongqing  
Email: [zhangyyping@yahoo.com](mailto:zhangyyping@yahoo.com)

Received: Jan. 12<sup>th</sup>, 2015; accepted: Jan. 26<sup>th</sup>, 2015; published: Jan. 28<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

In recent years, molybdenum disulfide (MoS<sub>2</sub>) nanosheets have attracted extensive interest in the field of nanoscale electronics and are likely to be an alternative choice for silicon because of its excellent semiconductor performance. In this paper, we review the several methods for preparing MoS<sub>2</sub> nanosheets and discuss its optical and electrical properties and other characteristics of the MoS<sub>2</sub> nanosheets. The application of MoS<sub>2</sub> nanosheets in various optoelectronic devices is introduced. Finally, we also prospect the future development trend about the investigation of MoS<sub>2</sub> nanosheets.

## Keywords

Molybdenum Disulfide (MoS<sub>2</sub>), Nanosheets, Optical Property, Electrical Property, Optoelectronic Devices

# 二硫化钼纳米片的研究进展

王 轩, 宋 礼, 陈 露, 宋欢欢, 张永平\*

西南大学材料与能源学部, 重庆  
Email: [zhangyyping@yahoo.com](mailto:zhangyyping@yahoo.com)

收稿日期: 2015年1月12日; 录用日期: 2015年1月26日; 发布日期: 2015年1月28日

## 摘 要

近年来, 由于二硫化钼(MoS<sub>2</sub>)纳米片具有优异的半导体性能, 有可能成为硅的替代者而引起了纳米电子\*通讯作者。

学领域的广泛关注。本文评述了几种制备 $\text{MoS}_2$ 纳米片的方法,介绍了 $\text{MoS}_2$ 纳米片的表征方法和光电性质,总结了 $\text{MoS}_2$ 纳米片在几种光电子器件上的应用,并对 $\text{MoS}_2$ 纳米片的发展趋势作了展望。

## 关键词

$\text{MoS}_2$ , 纳米片, 光电性质, 光电子器件

## 1. 引言

随着以硅为核心材料的集成电路的发展日益受到限制[1]-[2],以石墨烯为主的层状纳米材料也越来越受到科学家们的关注[3]-[10]。 $\text{MoS}_2$ 是近几年涌现出来的具有优异性质的另一种层状纳米材料。2011年,瑞士的Radisavljevic B和Radenovic A等人称 $\text{MoS}_2$ 或将在下一代纳米电子器件领域中比传统硅材料或者富勒烯更具有优势,这是因单层的二硫化钼可以用于制造体积更小、能效更高的电子芯片[11]。

$\text{MoS}_2$ 属于六方晶系,晶格参数为 $a = 0.316 \text{ nm}$ ,  $c = 1.229 \text{ nm}$ ,它具有与石墨相似的层状结构[12]-[15]。如图1所示, $\text{MoS}_2$ 有着由S-Mo-S三层堆垛而成的晶体结构[16]-[19]。每个 $\text{MoS}_2$ 分子层之间相距约为 $0.65 \text{ nm}$ ,其含有上下两个六边形结构的S原子层,中间夹着一个Mo原子层,形成类似于“三明治”的层状结构。层内S原子与Mo原子以共价键结合,Mo-S棱面相当多,比表面积大,层边缘有悬空键,并以较微弱的范德瓦尔斯力结合[11] [20]-[24],因此, $\text{MoS}_2$ 层容易受外界环境的影响而形成稳定的薄层结构,为其在微电子领域的应用奠定了良好基础。

2004年,英国曼彻斯特大学的两位教授首次成功分离出了石墨烯[25],之后很多科学家都对石墨烯进行了大量研究,也取得了丰硕成果[26]-[30],但是零能带隙限制了石墨烯在集成电路上的应用。与零能带隙的石墨烯不同, $\text{MoS}_2$ 体材料和多层、单层材料都具有禁带,是天然的半导体。 $\text{MoS}_2$ 的能带结构如图2所示[31]。其体材料的电子跃迁方式为非竖直跃迁,即能带结构为间接带隙,带宽 $1.2 \text{ eV}$ ,对于薄层材料,随着 $\text{MoS}_2$ 层数的减少,其带宽逐渐增加,当为单层时,其电子跃迁方式变为竖直跃迁,即能带结构为直接带隙,带宽增大到 $1.9 \text{ eV}$  [11] [31]-[39]。 $\text{MoS}_2$ 的能带结构决定了其既适合用于制作微电子器件也可以用于制作光电子器件。

本文评述了几种制备 $\text{MoS}_2$ 纳米片的方法,简要介绍了 $\text{MoS}_2$ 纳米片的表征方法和光电性质,总结了 $\text{MoS}_2$ 纳米片在几种光电子器件上的应用,并对 $\text{MoS}_2$ 纳米片的发展趋势作了展望。

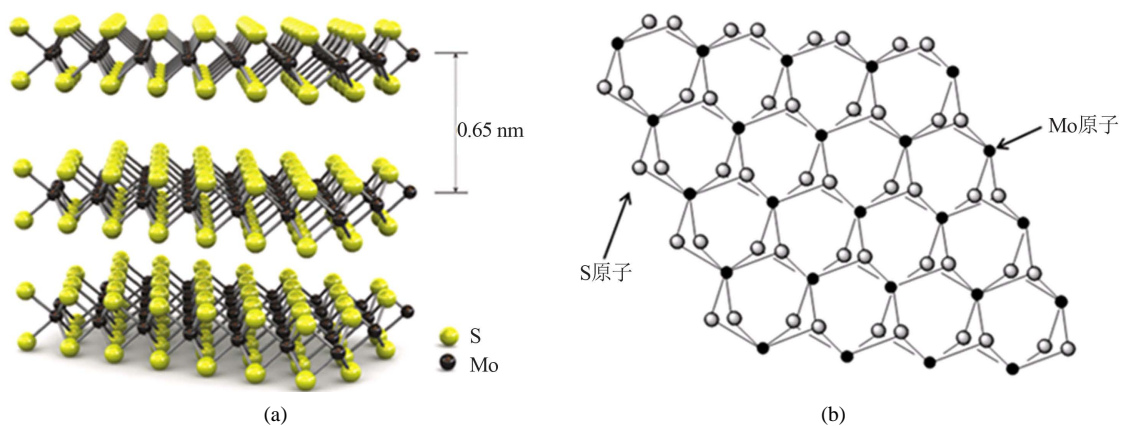
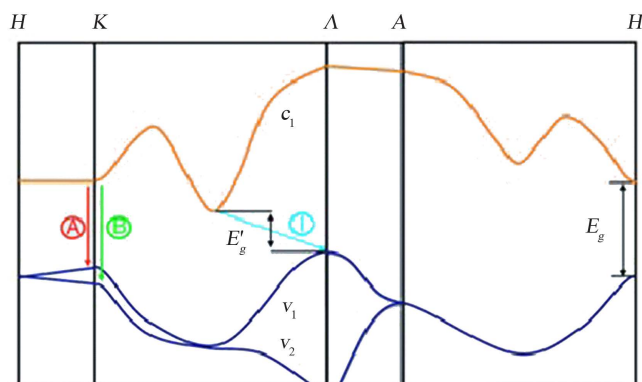


Figure 1. (a) Molecular structure and (b) layer structure of  $\text{MoS}_2$   
图 1.  $\text{MoS}_2$  的(a) 分子结构图及(b) 层的结构图

Figure 2. Simplified band structure of MoS<sub>2</sub>图 2. MoS<sub>2</sub> 的能带结构图

## 2. 二硫化钼纳米片的制备

人们通过大量研究，开发出了许多制备 MoS<sub>2</sub> 纳米片的方法，其中包括机械剥离、液相剥离、物理气相沉积、电化学法、热分解法、水热法、化学气相沉积等。但是这些方法都存在一定的不足，不能同时满足制备出尺寸大、质量好、精确控制纳米片的层数、容易转移到其它基体、成本低等需求，今后 MoS<sub>2</sub> 纳米片的制备仍将是人们研究的重点。

### 2.1. 机械剥离法

机械剥离法是将层状材料与其它较硬的物理表面相摩擦，从而得到薄层材料的方法[40]。最早的石墨烯就是利用这种方法制备出来的[25]，目前已经被广泛用于实验室制备石墨烯等薄层材料。Mak 等[31]采用机械剥离法在 SiO<sub>2</sub>/Si 基体上制备出了尺寸在 25 至 200 μm<sup>2</sup> 的 MoS<sub>2</sub> 纳米片。目前科学家们青睐于使用特殊的粘性胶带剥离出 MoS<sub>2</sub> 纳米薄片的微机械剥离方法，这种方法的效率和剥离质量有所提高[20][41]-[43]。机械剥离法是一种能够简单快捷制备二维层状材料的方法，但是这种方法产量低，晶体尺寸有限，难以实现工业化生产，仅适用于实验室制备 MoS<sub>2</sub> 纳米片。

### 2.2. 液相剥离法

液相剥离是将 MoS<sub>2</sub> 晶体放入合适的溶剂中，利用超声波使 MoS<sub>2</sub> 纳米薄片漂浮在溶剂表面，通过萃取即可得到 MoS<sub>2</sub> 纳米薄片，然后再将其喷涂到基体上。Coleman 等[3]将 MoS<sub>2</sub> 粉末加入到合适的有机溶剂中，超声剥离出了 3~12 nm，也就是 5~20 层的 MoS<sub>2</sub> 纳米片。Smith 等[44]将有机溶剂换为添加了胆酸钠的水溶液，再利用超声波剥离出了 MoS<sub>2</sub> 纳米薄片。液相剥离法简单易行，不容易受到空气和水的影响，效率较高，适合大规模制备 MoS<sub>2</sub> 纳米片，但是其获得的 MoS<sub>2</sub> 纳米片层数不易控制，难以得到单层的 MoS<sub>2</sub> 纳米片。

### 2.3. 物理气相沉积法

Qin 等[45]采用混合高功率脉冲磁控溅射(HIPIMS)，用 Ti 和 MoS<sub>2</sub> 作靶材，通入 Ar 做保护气体，使真空度保持在 3 × 10<sup>-5</sup> Torr，在 Si 基体上沉积了 MoS<sub>2</sub> 涂层和 MoS<sub>2</sub>-Ti 涂层。物理气相沉积方法能够得到质量较好的 MoS<sub>2</sub> 纳米片，但是其操作及工艺较为复杂，成本较高。

### 2.4. 电化学法

南洋理工大学材料科学与工程学院的 Zeng 等[46]采用电化学锂化的方法在玻璃基体上制备出了单层

的  $\text{MoS}_2$  纳米片(图 3)。以层状  $\text{MoS}_2$  体材料为阴极，以锂箔为阳极，在一套电池测试装置中进行锂化。锂化过程在  $0.05 \text{ mA}$  的恒定电流密度下进行，待锂离子插入完成后，用丙酮清洗插层化合物( $\text{Li}_x\text{MoS}_2$ )，从而除去电解液，然后用超声波在水中或者乙醇中剥离出二维  $\text{MoS}_2$  纳米片。这种方法简单易行，效率高，但是制备出的  $\text{MoS}_2$  纳米片不易转移到其它基体上，锂化会使制备出的纳米片的半导体性质下降，并且难以制备出大面积  $\text{MoS}_2$  纳米片。

### 2.5. 热分解法

Liu 等[47]提出了利用热分解来制备大面积并且有较高结晶度  $\text{MoS}_2$  纳米薄片的方法。如图 4，作者用的浸涂溶液是用高纯的钼硫酸铵( $(\text{NH}_4)_2\text{MoS}_4$ )与二甲基甲酰胺(DMF)制得的混合溶液。将清洗并烘干后的蓝宝石或者  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  基体浸入溶液，随后缓慢拉出在基体上形成钼硫酸铵薄膜。基体经过烘干后，在  $\text{Ar}/\text{H}_2(4:1)$  的混合气体， $1 \text{ torr}$  的压力， $500^\circ\text{C}$  下进行第一步退火，退火持续 60 分钟。之后在  $\text{Ar}$  或者  $\text{Ar} + \text{S}$  的混合气体， $500 \text{ torr}$  的压力， $1000^\circ\text{C}$  下进行第二步退火 30 分钟。第二步退火后就在基体表面得到了质量较好的  $\text{MoS}_2$  纳米片。这种方法比较简单，制得的  $\text{MoS}_2$  纳米片质量较好，也可以转移到其它基体上，但是 Liu 等只制备出了连续的三层纳米片和很少的两层纳米片，没有单层  $\text{MoS}_2$  纳米片。另外，热分解法的工艺稳定性难于控制，不易实现工业化生产  $\text{MoS}_2$  纳米片。

### 2.6. 水热法

重庆大学物理学院的 Ye 等[48]用水热法制备出了  $\text{MoS}_2$  纳米片。采用 S、Mo 摩尔质量比为  $\text{S}:\text{Mo} = 2:1$  的钼酸铵和 S 粉作为钼源和硫源，并将其混合后加入  $100 \text{ mL}$  的烧杯中，再加入  $12 \text{ mL}$  的水合肼和  $20 \text{ mL}$

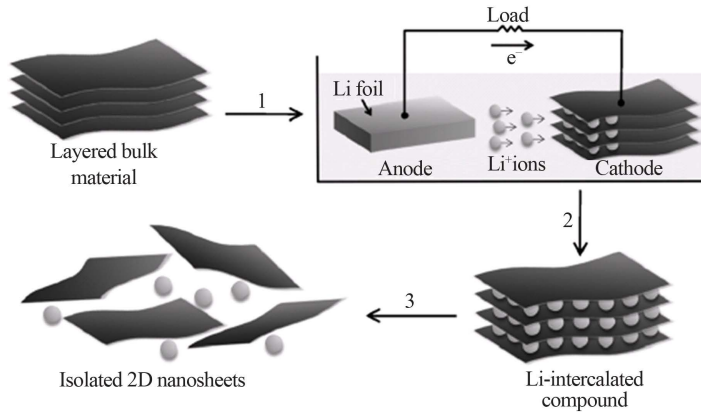


Figure 3. Electrochemical method for the preparation of  $\text{MoS}_2$  nanosheets  
图 3. 电化学法制备  $\text{MoS}_2$  纳米片

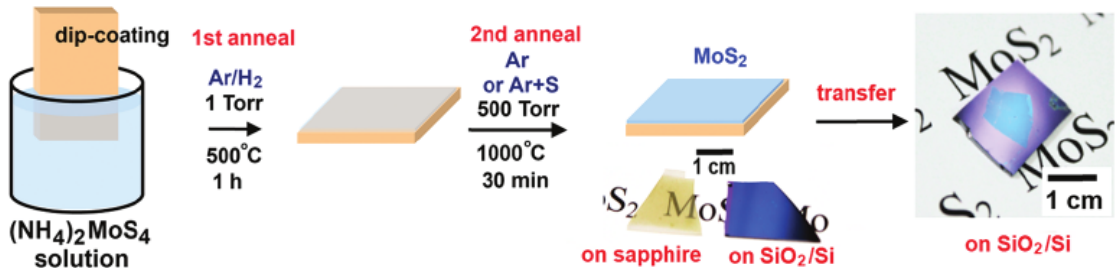


Figure 4. Thermolysis method for the preparation of  $\text{MoS}_2$  nanosheets  
图 4. 热分解法制备  $\text{MoS}_2$  纳米片

的蒸馏水,连续搅拌 30 分钟后放入 50 mL 的反应釜中并加入蒸馏水,再在 180℃的烘箱中放置 50 h,冷却至室温,用离心机分离,再用蒸馏水、稀释的 HCl 和乙醇反复清洗,将黑色沉淀在 60℃的真空中干燥 30 h 便制备出了 MoS<sub>2</sub> 纳米片。这种方法不需要很高的温度,成本低,但是耗时,难以控制 MoS<sub>2</sub> 纳米片的层数。

## 2.7. 化学气相沉积法

化学气相沉积(Chemical Vapor Deposition, 简称 CVD)是反应物质在高温气态下发生化学反应,生成固态物质沉积在加热的固态基体表面的方法。化学气相沉积法是目前科学家们用得比较多的一种制备高质量 MoS<sub>2</sub> 纳米片的一种方法(图 5)。美国普渡大学西拉法叶校区的 Liu 等[49]将 MoO<sub>3</sub> 纳米线和 S 粉在反应炉中分别放置,充入氮气,以 20℃/min 的速度升温到 550℃,S 粉被热蒸发成蒸气,然后以 5℃/min 的速度升温至 850℃,保温 10~15 min,冷却后便在 SiO<sub>2</sub>/Si 基体上沉积出了 10 到 20 μm 的 MoS<sub>2</sub> 纳米片。化学气相沉积法可根据先驱体、基体、反应条件的改变来控制 MoS<sub>2</sub> 纳米片的形貌、质量、层数等[50][51]-[54]。化学气相沉积法是近几十年发展起来的比较成熟的一种制备方法,其优点在于可以制备纯度较高、结晶程度很好的 MoS<sub>2</sub> 纳米片,而且广泛应用于制作单晶、多晶、研制新型晶体以及制备无机薄膜材料等。但是此类制备方法对制备条件要求苛刻,反应温度较高。

## 3. 二硫化钼纳米片的表征

MoS<sub>2</sub> 纳米片之所以受到科学家们的广泛关注,正是因其二维层状的结构和优异的光电性能,因此选用适当的方法来表征 MoS<sub>2</sub> 纳米片的结构和性能是至关重要的。目前,已经有许多仪器可以被用来表征二维 MoS<sub>2</sub> 纳米片,比如:扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、原子力显微镜(AFM)、拉曼光谱仪(Raman)、光致发光仪(PL)、光学显微镜(OM)等。

扫描电子显微镜主要是对 MoS<sub>2</sub> 纳米片作形貌的表征。美国麻省理工学院的 Lee 等[55]用 SEM 表征了制备出的 MoS<sub>2</sub> 纳米片(图 6(a))。透射电子显微镜可以用于表征 MoS<sub>2</sub> 纳米片的形貌,也可以通过观察边缘褶皱粗略表征其层数和厚度。美国莱斯大学机械工程与材料科学学院的 Zhan [51]等用 TEM 表征了制备出的 MoS<sub>2</sub> 纳米片,原子力显微镜是表征 MoS<sub>2</sub> 纳米片比较常用的手段,它可以通过扫描样品表面的到了清晰的双层和三层 MoS<sub>2</sub> 纳米片的图像(图 6(b))。原高度差从而判断纳米片的层数。Liu 等[49]得到了单层 MoS<sub>2</sub> 纳米片的 AFM 图像(图 6(c))。目前通常同时使用拉曼光谱仪和光致发光仪来表征 MoS<sub>2</sub> 纳米片,通过测量拉曼光谱的频率差或者光致发光谱的主发射峰可以判断纳米片的层数和结晶性。Shi 等[56]对制备的 MoS<sub>2</sub> 纳米片做了拉曼和光致发光表征,从而判断出所制备的 MoS<sub>2</sub> 纳米片是单层的并且有良好的结晶性(图 6(d))。光学显微镜也是目前较常用的表征 MoS<sub>2</sub> 纳米片的仪器,它能得到直观并且美观的图像,甚至判断 MoS<sub>2</sub> 纳米片的层数。南洋理工大学材料科学与工程学院的 Li 等[57]开展了利用光学显微镜快速、准确表征二维 MoS<sub>2</sub> 纳米片的研究,作者将 MoS<sub>2</sub> 纳米片的层数和纳米片以及其基体的光学对比度联

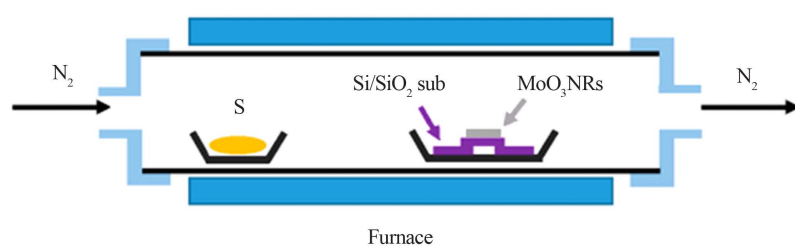


Figure 5. Chemical vapor deposition method for the preparation of MoS<sub>2</sub> nanosheets  
图 5. 化学气相沉积法制备 MoS<sub>2</sub> 纳米片

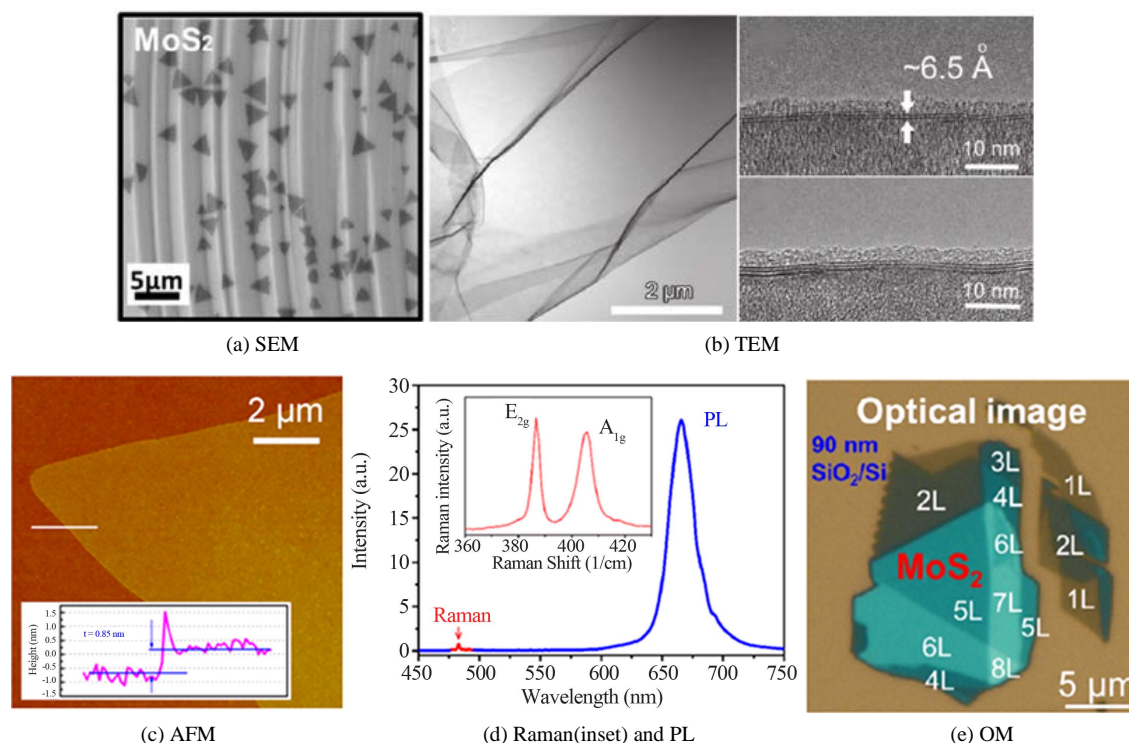


Figure 6. Characterization methods of MoS<sub>2</sub> nanosheets

图 6. MoS<sub>2</sub> 纳米片的表征

系起来，得到了 1~8 层 MoS<sub>2</sub> 纳米片的光学显微镜图像(图 6(e))。

## 4. 层状二硫化钼的光电性质

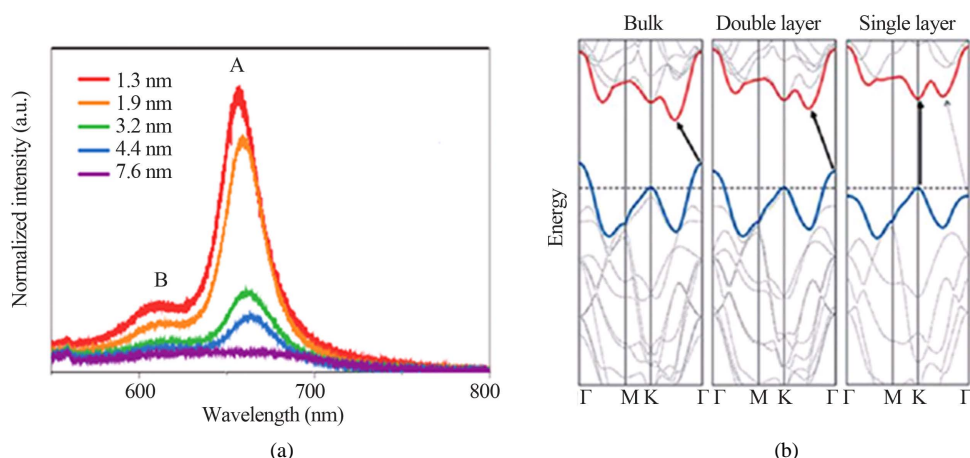
在众多层状材料中，MoS<sub>2</sub> 是很特殊的，它在热、力、光、电方面都有独特的优异性能。MoS<sub>2</sub> 纳米片已经被证实具有良好的磁性，良好的气体传感、光致发光、可见光催化以及电学性能等，为其在各种器件上的应用奠定了良好的基础，不过目前科学家们最关注的还是 MoS<sub>2</sub> 纳米片的光学性能和电学性能。因此研究 MoS<sub>2</sub> 纳米片的光学性质和电学性质对制作基于 MoS<sub>2</sub> 纳米片的光电器件有着非常重要的意义。

### 4.1. 光学性质

MoS<sub>2</sub> 有良好的光吸收和荧光性质，并且它的光致发光会随着其层数的减少而变强，当 MoS<sub>2</sub> 纳米片为单层时发光最强[32]。由于带隙的转变，并且 MoS<sub>2</sub> 体材料的局域场效应比 MoS<sub>2</sub> 纳米片的局域场效应大得多，使得单层 MoS<sub>2</sub> 纳米片的 PL 量子产量比 MoS<sub>2</sub> 体材料的 PL 量子产量大约多 10<sup>4</sup> 倍[31] [33]。与体材料相比，由于介电常数的降低，双层和单层 MoS<sub>2</sub> 纳米片的激子结合能分别达到 0.424 eV 和 0.897 eV [58]。在光致发光光谱下，MoS<sub>2</sub> 纳米片的主发射峰在 1.9 eV 附近，随着 MoS<sub>2</sub> 纳米片层数的增加，其半峰宽逐渐变宽，单层 MoS<sub>2</sub> 纳米片的主发射峰的半峰宽较窄，约为 50 meV(图 7(a)) [31]。在拉曼光谱下，MoS<sub>2</sub> 有四个特征峰：E<sub>2g</sub>、E<sub>1g</sub>、E<sub>2g</sub><sup>1</sup>和 A<sub>1g</sub>，随着纳米片层数的增加，406 cm<sup>-1</sup> 附近的面外模式 A<sub>1g</sub> 的频率会增大，但是 382 cm<sup>-1</sup> 附近的面内模式 E<sub>2g</sub><sup>1</sup> 的频率却会减小[20]，并且 A<sub>1</sub> 会发生蓝移而 E<sub>2g</sub><sup>1</sup> 会发生红移[59]。

### 4.2. 电学性质

MoS<sub>2</sub> 体材料是间接带隙的，并且带宽为 1.2 eV，而单层 MoS<sub>2</sub> 纳米片却有 1.9 eV 的直接带隙。随着



**Figure 7.** (a) Photoluminescence spectra of MoS<sub>2</sub> nanosheets and (b) Electronic structure of bulk, bi- and single-layer MoS<sub>2</sub> nanosheets

**图 7.** (a) MoS<sub>2</sub> 纳米片的光致发光光谱和 (b) 块体、双层、单层 MoS<sub>2</sub> 纳米片的能带结构

MoS<sub>2</sub> 纳米片层数的减少, 在布里渊区 K 点的直接激子跃迁能量几乎不变, 但是其间接带隙却逐渐增大[32], 由于量子约束造成 S 原子的  $p_z$  轨道与 Mo 原子的  $d$  轨道的杂化使得当纳米片层数为单层时, 其能带结构由间接带隙变为直接带隙(图 7(b)) [31] [32] [60]。同时, 与三维的硅材料相比, 二维的 MoS<sub>2</sub> 材料体积更小, 能耗更低, 电子在 0.65 nm 的 MoS<sub>2</sub> 纳米片上和 2 nm 的 Si 薄膜上运动的难易程度是一样的[11]。MoS<sub>2</sub> 特殊的电学性能预示了其在微电子器件应用的前景。

## 5. 二硫化钼纳米片在光电子器件上的应用

石墨烯作为一种最有前景的二维材料, 在众多的应用中都很有潜力, 但是它的零带隙限制了其在纳米电子器件和光电子器件上的应用。过渡金属二硫化物(TMD),  $MX_2$  ( $M = Mo, W; X = S, Se, Te$ ) 由于在催化剂、纳米润滑剂、储氢、锂电池、微电子器件、医学和光电子器件等方面的应用存在巨大的潜力, 它们受到了越来越多的关注, 而 MoS<sub>2</sub> 则是 TMD 中表现最为突出的。MoS<sub>2</sub> 具有优异的润滑性能, 当其从体材料减薄为具有二维层状结构的纳米片时, 就表现出了优异的光电半导体性质, 为其在光电子器件上的应用前景奠定了基础。

### 5.1. 场效应晶体管

早在 2007 年美国马里兰大学物理系的 Ayari 等[61]就利用微机械剥离的方法剥离出了 8~40 nm 的 MoS<sub>2</sub> 纳米片, 并用其制作出了电子迁移率在  $10\sim 50 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  的晶体管。这只最早的 MoS<sub>2</sub> 晶体管电性能并不理想, 随后 2011 年瑞士洛桑联邦理工学院的 Kis 团队制备出的世界上第一只单层 MoS<sub>2</sub> 纳米片晶体管表现出了较好的电学性能(图 8)[11]。Kis 团队先微机械剥离出了单层 MoS<sub>2</sub> 纳米片, 并将其转移到 SiO<sub>2</sub>/Si 基体上, 再用电子束刻蚀 50 nm 的金电极, 然后在 200°C 下退火以减小电阻。为了改善其电学性能, 作者利用原子层沉积技术沉积了 30 nm 的二氧化铪作为栅极介电层, 从而制备出了开关电流比为  $\sim 10^8$ , 电子迁移率为  $217 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  的器件。Lee 等[62]采用化学气相沉积法研制的 MoS<sub>2</sub> 纳米片背栅晶体管也表现出了不错的性能, 其开关电流比达到  $10^4$ , 在常温常压下场效应迁移率达到  $0.02 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , 并且显示出 n 型半导体性质。

不少科学家也开展了 MoS<sub>2</sub> 纳米片场效应晶体管可靠性的研究。Shi 等[56]以一层离子凝胶膜作为介电层制备了 MoS<sub>2</sub> 电双层晶体管(EDLTs), 作者发现用 Au 修饰前的 MoS<sub>2</sub> EDLTs 表现出 n 型半导体性质,

修饰后的 MoS<sub>2</sub>EDLTs 出现了 p 型掺杂，并且阈值电压从 0.47 V 增大到 1.29 V，修饰后的开关电流比约为  $3.54 \times 10^3$ ，比修饰前大了将近 50 倍，但是修饰后器件的电子迁移率降为  $2.44 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ，比修饰前小了约 2 倍。Shah 等[63]研究了 MoS<sub>2</sub>场效应晶体管随温度变化的迟滞效应。作者发现在室温下直流背栅晶体管的电子迁移率为  $6.2 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ，源极和漏极的接触电阻分别为 36 Ω 和 29 Ω。随着温度从室温升至 75℃、100℃、125℃，器件的电流增大，但是开关电流比减小，阈值电压降低。

### 5.2. 光电晶体管

2011 年，在第一只单层 MoS<sub>2</sub> 纳米片场效应晶体管问世不久之后，南洋理工大学的 Yin 等[35]就制备出了第一只单层 MoS<sub>2</sub> 纳米片光电晶体管(图 9)。作者用微机械剥离法在 300 nm 的 Si/SiO<sub>2</sub> 基体上沉积出了 0.8 nm 的单层 MoS<sub>2</sub> 纳米片，利电子束沉积了 Ti/Au(3 nm 和 50 nm)电极，并用传统光刻和剥离工艺使电极清晰，在用丙酮清洗了光刻胶之后，将光电晶体管置于 200℃，100 sccmAr:H<sub>2</sub>(体积比为 9:1)的真空管式炉中退火两小时，以去除残留的光刻胶并减少电阻。作者发现通过控制入射光可以使器件的光电流在 50 ms 内产生和消失，表现出了比石墨烯光电晶体管更好的光灵敏度。

目前科学家们也都采用化学气相沉积法制备 MoS<sub>2</sub> 纳米片光电晶体管，当然不同形式的 MoS<sub>2</sub> 纳米

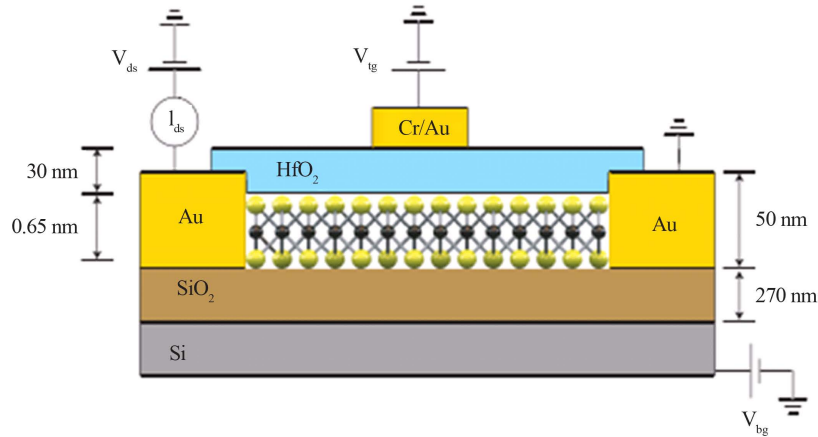


Figure 8. Schematic illustration of HfO<sub>2</sub>-top-gated monolayer MoS<sub>2</sub> FET device  
图 8. 二氧化钬顶栅单层 MoS<sub>2</sub> 场效应晶体管示意图

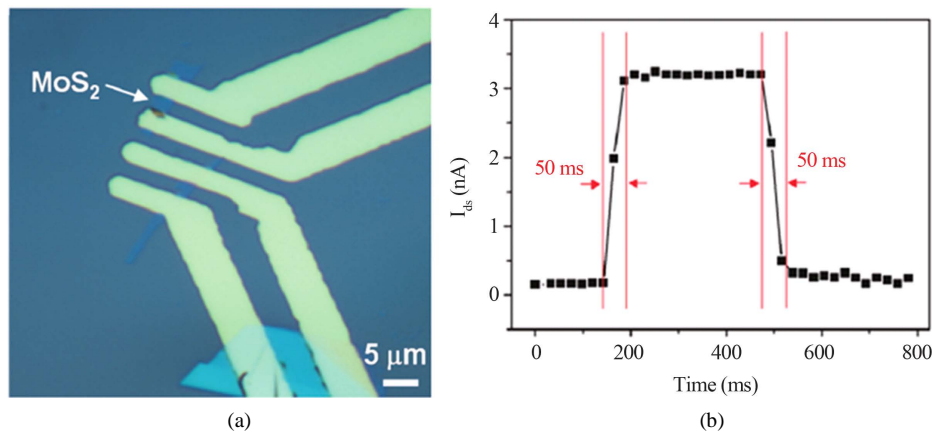


Figure 9. (a) Schematic structure and (b) photoswitching rate of single-layer MoS<sub>2</sub> phototransistor  
图 9. 单层 MoS<sub>2</sub> 光电晶体管的(a) 结构简图和(b) 光电开关速度



片光电晶体管也会表现出不同的性能。台湾大学的 Tsai 等[64]制备了金属-半导体-金属光电探测器(MSM PDs),在严酷的环境中,13.3的光子增益使得器件的光响应率达到 $0.57 \text{ A/W}$ ,探测率达到 $\sim 10^{10} \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。器件还表现出了快速、稳定的光响应以及在可见区域高达 10%的光吸收。在  $200^\circ\text{C}$ 下,器件的灵敏度因数仍然高达 10。在室温下,Zhang 等[65]制备的石墨烯-MoS<sub>2</sub>异质结构光电探测器的光响应率可达  $10^7 \text{ A/W}$ ,光子增益可达  $10^8$ 。Lin 等[66]制得的 MoS<sub>2</sub>-石墨烯光电探测器的光响应率比 MoS<sub>2</sub>光电探测器提高了  $10^3$ 。

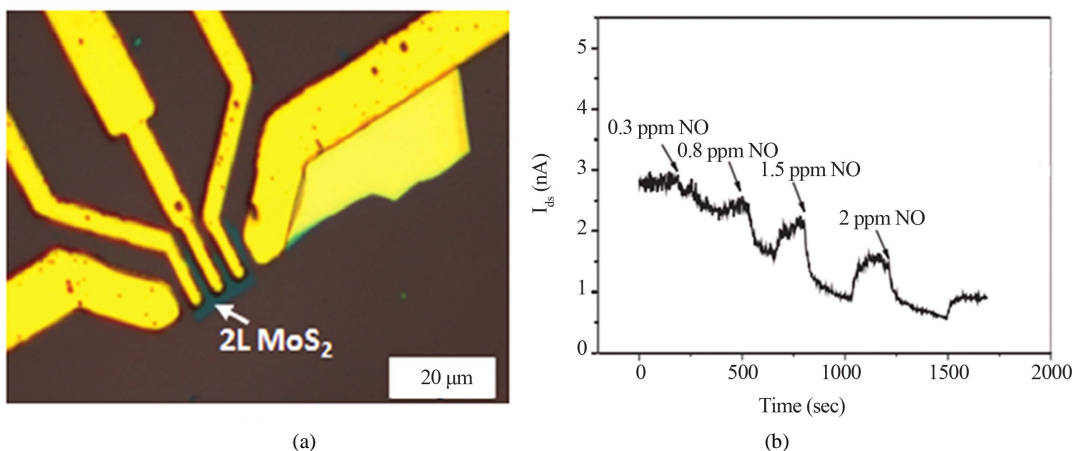
### 5.3. 气体传感器

由于单层 MoS<sub>2</sub>纳米片有着比石墨烯更大的比表面积,再加上石墨烯场效应晶体管在传感器上的成功应用,激发了科学家们对 MoS<sub>2</sub>传感器的研制。MoS<sub>2</sub>传感器可以检测 NO、NO<sub>2</sub>、CO、NH<sub>3</sub>等气体,而 MoS<sub>2</sub>传感器的研制对于环境污染的监测、农业和医学的应用有着重大的意义。

南洋理工大学的 Li 等[59]在 Si/SiO<sub>2</sub>基体上微机械剥离出了 1~4 层的 MoS<sub>2</sub>纳米片,并光刻 Ti/Au (5 nm/50 nm)电极制作了 MoS<sub>2</sub>晶体管来检测 NO 气体。虽然单层 MoS<sub>2</sub>纳米片器件能很快检测到 NO,但是其并不稳定。而 2、3、4 层 MoS<sub>2</sub>纳米片器件能检测低至 0.8 ppm 的 NO,并且对 NO 的反应比较灵敏和稳定(图 10)。美国海军研究所的 Perkins 等[67]制备的单层 MoS<sub>2</sub>纳米片气体传感器对三乙胺有灵敏的反应,当暴露在 $\sim 1 \text{ ppm}$ 的三乙胺中时,器件的导电性在最初的 5 秒内突然增加,然后缓慢达到饱和。器件还表现出了比碳纳米管传感器更高的选择性。美国西北大学的 Late 等[68]微机械剥离出了 1~5 层的 MoS<sub>2</sub>纳米片并制作了气体传感器。作者在 NO<sub>2</sub>和 NH<sub>3</sub>气体中对器件进行了测试,发现单层 MoS<sub>2</sub>纳米片器件的电流不稳定,而 2~5 层 MoS<sub>2</sub>纳米片器件却表现出了很好的灵敏度和相当稳定的反应。同时,3~5 层 MoS<sub>2</sub>纳米片器件更容易被栅偏压和绿光控制。

### 5.4. 锂、钠电池及太阳能电池

由于有良好的锂离子插入和脱出的可逆性质,MoS<sub>2</sub>可以应用于锂电池。最早的 MoS<sub>2</sub>锂电池是由 Haering 等[69]报道的。而用 C 轴间隔增大的 MoS<sub>2</sub>纳米片作为锂电池的阳极,可使得电池首次充电达到  $800 \text{ mAhg}^{-1}$ 的容量,在  $50 \text{ mA/g}$ 的电流密度下,电池循环 50 次后仍能保持超过  $750 \text{ mAhg}^{-1}$ 的容量[70]。将 MoS<sub>2</sub>/石墨烯纳米薄片复合材料作为锂电池的阳极材料,在首次充放电过程中电池容量可达到  $2200 \text{ mAhg}^{-1}$ , $100 \text{ mA/g}$ 的电流密度下循环 50 次后电池容量可达  $1290 \text{ mAhg}^{-1}$ ,并且在  $1000 \text{ mA/g}$ 的高电流密度下其容量仍可保持在  $1040 \text{ mAhg}^{-1}$ [71]。



**Figure 10.** (a) Schematic structure of bilayer MoS<sub>2</sub> gas sensor and (b) its response after exposure to NO  
图 10. 双层 MoS<sub>2</sub> 气体传感器的(a)结构简图和(b)暴露在 NO 中后的响应

最近关于  $\text{MoS}_2$  钠电池的研究也说明了  $\text{MoS}_2$  纳米片在钠电池上的应用前景。韩国先进科技学院的 Bang 等[72]用液相剥离法剥离出了  $\text{MoS}_2$  纳米薄片,并将其作为钠电池的阳极,在  $20 \text{ mA/g}$  的电流密度下循环 50 次后其钠化和解钠化的容量为  $165$  和  $161 \text{ mAhg}^{-1}$ 。作者还制作了  $\text{MoS}_2$ /氧化石墨烯复合电极,在同样的条件下其首次放电容量达到  $376 \text{ mAhg}^{-1}$ 。美国堪萨斯州立大学的 David 等[73]制备了  $\text{MoS}_2$ /石墨烯薄片,并将其作为钠电池的电极,首次循环电化学容量达到  $338 \text{ mAhg}^{-1}$ ,并且在  $200 \text{ mA/g}$  的电流密度下电极的充放电都相当稳定。

$\text{MoS}_2$  纳米片在太阳能电池上的应用也受到了科学家们的广泛关注。Shanmugam 等[74]制作了 ITO- $\text{MoS}_2$ -Au 太阳能电池,  $110 \text{ nm}$  和  $220 \text{ nm}$  的  $\text{MoS}_2$  纳米片太阳能电池的光转换效率分别为  $0.7\%$  和  $1.8\%$ (图 11)。苏州大学的 Gu 等[75]制备的  $\text{MoS}_2$  纳米薄片有机太阳能电池的效率达到  $8.11\%$ 。台湾国立清华大学的 Tsai 等[76]制备的单层  $\text{MoS}_2$ /P 型 Si 太阳能电池的效率达到  $5.23\%$ 。

## 6. 结语

近年来国内外的科学家们开展了大量关于  $\text{MoS}_2$  纳米片的研究,这正是因为  $\text{MoS}_2$  纳米片具有独特的微观结构和光学、电学性质以及其在场效应晶体管、光电晶体管、气体传感器、锂电池、钠电池和太阳能电池等众多领域都有广阔的应用前景。虽然关于  $\text{MoS}_2$  纳米片的研究取得了很大的进展,但是仍然存在许多亟待解决的问题:

1) 如何改进目前制备  $\text{MoS}_2$  纳米片的方法从而同时满足制备出的  $\text{MoS}_2$  纳米片尺寸大、结晶性和均匀性好、能精确控制  $\text{MoS}_2$  纳米片的层数、容易转移到其它基体、成本低、易于实现工业化生产等需求。从国内外制备  $\text{MoS}_2$  纳米片的经验来看,化学气相沉积法应该是一种可行的技术。但是选用合适的先驱体以及基体(目前的研究大多是以  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  或者  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为基体的)仍将是今后的研究重点,并且先驱体在沉积过程中的反应机制仍有待进一步研究和完善;

2) 目前表征  $\text{MoS}_2$  纳米片结构的手段大体上有 SEM、TEM、OM、AFM、Raman、PL 等,而结构对其光电性能有至关重要的影响。如何利用多种表征技术,建立起结构 - 性能之间的关联性将是今后研究的方向之一;

3) 虽然  $\text{MoS}_2$  纳米片在光电子器件上的应用前景相当广阔,但是目前各类器件的构建和性能都有待改善。单层  $\text{MoS}_2$  纳米片是直接带隙,其电学性能随着层数的增加而降低,因此场效应晶体管和光电晶体管要求单层的  $\text{MoS}_2$  纳米片。而单层  $\text{MoS}_2$  纳米片在气体传感器方面的应用却并不是很理想,2~5 层的

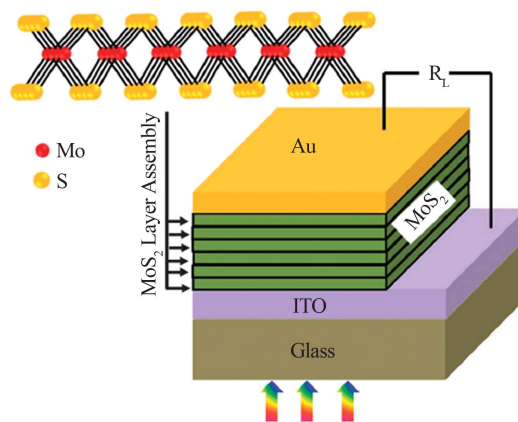


Figure 11. Schematic illustration of ITO- $\text{MoS}_2$ -Au solar cell

图 11. ITO- $\text{MoS}_2$ -Au 太阳能电池示意图

MoS<sub>2</sub> 气体传感器反而表现出了更优异的性能。有效的可应用的器件设计和性能有待进一步深入研究。

总之，MoS<sub>2</sub> 纳米片的优势很明显，但要使其真正达到实用化，我们还有很长的路要走。

## 基金项目

中央高校基本科研业务费专项资金资助，编号：XDJK2014D027。

## 参考文献 (References)

- [1] Schulz, M. (1999) The end of the road for silicon? *Nature*, **399**, 729-730.
- [2] Iwai, H. and Ohmi, S. (2002) Silicon integrated circuit technology from past to future. *Microelectronics Reliability*, **42**, 465-491.
- [3] Coleman, J.N., Lotya, M., O'Neill, A., Bergin, S.D., King, P.J., Khan, U., Young, K., Gaucher, A., De, S., Smith, R.J., Shvets, I.V., Arora, S.K., Stanton, G., Kim, H.Y., Lee, K., Kim, G.T., Duesberg, G.S., Hallam, T., Boland, J.J., Wang, J.J., Donegan, J.F., Grunlan, J.C., Moriarty, G., Shmeliov, A., Nicholls, R.J., Perkins, J.M., Grievson, E.M., Theu-wissen, K., McComb, D.W., Nellist, P.D. and Nicolosi, V. (2011) Two-dimensional nanosheets produced by liquid ex-foliation of layered materials. *Science*, **331**, 568-571.
- [4] Kim, H.W., Yoon, H.W., Yoon, S.M., Byung, M.Y., Ahn, B.K., Cho, Y.H., Shin, H.J., Yang, H., Paik, U., Kwon, S., Choi, J.Y. and Park, H.B. (2013) Selective gas transport through few-layered graphene and graphene oxide membranes. *Science*, **342**, 91-95.
- [5] Park, J.Y., Kwon, S. and Kim, J.H. (2014) Nanomechanical and charge transport properties of two-dimensional atomic sheets. *Advanced Materials Interfaces*, **1**, 1300089.
- [6] Lee, C., Li, Q.Y., Kalb, W., Liu, X.Z., Berger, H., Carpick, R.W. and Hone, J. (2010) Frictional characteristics of atomically thin sheets. *Science*, **328**, 76-80.
- [7] Elias, D.C., Gorbachev, R.V., Mayorov, A.S., Morozov, S.V., Zhukov, A.A., Blake, P., Ponomarenko, L.A., Grigorieva, I.V., Novoselov, K.S., Guinea, F. and Geim, A.K. (2011) Dirac cones reshaped by interaction effects in suspended graphene. *Nature Physics*, **7**, 701-704.
- [8] Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., Katsnelson, M.I., Grigorieva, I.V., Dubonos, S.V. and Firsov, A.A. (2005) Two-dimensional gas of massless diracfermions in graphene. *Nature*, **438**, 197-200.
- [9] Pacilé, D., Meyer, J.C., Girit, Ç.Ö. and Zettl, A. (2008) The two-dimensional phase of boron nitride: Few-atomic-layer sheets and suspended membranes. *Applied Physics Letters*, **92**, Article ID: 133107.
- [10] Cunningham, G., Lotya, M., Cucinotta, C.S., Sanvito, S., Bergin, S.D., Menzel, R., Shaffer, M.S.P. and Coleman, J.N. (2012) Solvent exfoliation of transition metal dichalcogenides: Dispersibility of exfoliated nanosheets varies only weakly between compounds. *ACS Nano*, **6**, 3468-3480.
- [11] Radisavljevic, B., Radenovic, A., Brivio, J., Giacometti, V. and Kis, A. (2011) Single-layer MoS<sub>2</sub> transistors. *Nature Nanotechnology*, **6**, 147-150.
- [12] Bromley, R.A., Murray, R.B. and Yoffe, A.D. (1972) The band structures of some transition metal dichalcogenides. III. Group VIA: Trigonal prism materials. *Journal of Physical Chemistry: Solid State Physics*, **5**, 759.
- [13] Kuc, A., Zibouche, N. and Heine, T. (2011) Influence of quantum confinement on the electronic structure of the transition metal sulfide TS<sub>2</sub>. *Physical Review B*, **83**, Article ID: 245213.
- [14] Kan, M., Wang, J.Y., Li, X.W., Zhang, S.H., Li, Y.W., Kawazoe, Y., Sun, Q. and Jena, P. (2014) Structures and phase transition of a MoS<sub>2</sub> monolayer. *The Journal of Physical Chemistry C*, **118**, 1515-1522.
- [15] Mattheiss, L.F. (1973) Band structures of transition-metal-dichalcogenide layer compounds. *Physical Review B*, **8**, 3719-3740.
- [16] Huang, K.J., Wang, L., Liu, Y.J., Wang, H.B., Liu, Y.M. and Wang, L.L. (2013) Synthesis of polyaniline/2-dimensional graphene analog MoS<sub>2</sub> composites for high-performance supercapacitor. *Electrochimica Acta*, **109**, 587-594.
- [17] Chen, W., Santos, E.J.G., Zhu, W.G., Kaxiras, E. and Zhang, Z.Y. (2013) Tuning the electronic and chemical properties of monolayer MoS<sub>2</sub> adsorbed on transition metal substrates. *Nano Letters*, **13**, 509-514.
- [18] Doolen, R., Laitinen, R., Parsapour, F. and Kelley, D.F. (1988) Trap state dynamics in MoS<sub>2</sub> nanoclusters. *The Journal of Physical Chemistry B*, **102**, 3906-3911.
- [19] Ma, G.F., Peng, H., Mu, J.J., Huang, H.H., Zhou, X.Z. and Lei, Z.Q. (2013) *In situ* intercalative polymerization of pyrrole in grapheme analogue of MoS<sub>2</sub> as advanced electrode material in supercapacitor. *Journal of Power Sources*, **229**, 72-78.

- [20] Lee, C.G., Yan, H., Brus, L.E., Heinz, T.F., Hone, J. and Ryu, S. (2010) Anomalous lattice vibrations of single- and few-layer MoS<sub>2</sub>. *ACS Nano*, **4**, 2695-2700.
- [21] Fu, Y.D., Feng, X.X., Yan, M.Y., Wang, K. and Wang, S.Y. (2013) First principle study on electronic structure and optical phonon properties of 2H-MoS<sub>2</sub>. *Physica B*, **426**, 103-107.
- [22] McCain, M.N., He, B., Sanati, J., Wang, Q.J. and Marks, T.J. (2008) Aerosol-assisted chemical vapor deposition of lubricating MoS<sub>2</sub> films. Ferrous substrates and titanium film doping. *Chemistry of Materials*, **20**, 5438-5443.
- [23] Garadkar, K.M., Patil, A.A., Hankare, P.P., Chate, P.A., Sathe, D.J. and Delekar, S.D. (2009) MoS<sub>2</sub>: Preparation and their characterization. *Journal of Alloys and Compounds*, **487**, 786-789.
- [24] Zhao, J., Zhang, Z.C., Yang, S.S., Zheng, H.L. and Li, Y.B. (2013) Facile synthesis of MoS<sub>2</sub> nanosheet-silver nanoparticles composite for surface enhanced Raman scattering and electrochemical activity. *Journal of Alloys and Compounds*, **559**, 87-91.
- [25] Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S.V., Grigorieva, I.V. and Firsov, A.A. (2004) Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, **306**, 666-669.
- [26] Castro, E.V., Novoselov, K.S., Morozov, S.V., Peres, N.M.R., Lopes dos Santos, J.M.B., Nilsson, J., Guinea, F., Geim, A.K. and Castro Neto, A.H. (2007) Biased bilayer graphene: Semiconductor with a gap tunable by the electric field effect. *Physical Review Letters*, **99**, Article ID: 216802.
- [27] Lemme, M.C., Echtermeyer, T.J., Baus, M. and Kurz, H. (2007) A grapheme field-effect device. *IEEE Electron Device Letters*, **28**, 282-284.
- [28] Zhang, Y.B., Tang, T.T., Girit, C., Hao, Z., Martin, M.C., Zettl, A., Crommie, M.F., Shen, Y.R. and Wang, F. (2009) Direct observation of a widely tunable band gap in bilayer graphene. *Nature*, **459**, 820-823.
- [29] Mayorov, A.S., Gorbachev, R.V., Morozov, S.V., Britnell, L., Jalil, R., Ponomarenko, L.A., Blake, P., Novoselov, K.S., Watanabe, K., Taniguchi, T. and Geim, A.K. (2011) Micrometer-scale ballistic transport in encapsulated graphene at room temperature. *Nano Letters*, **11**, 2396-2399.
- [30] Lee, J., Ha, T.J., Parrish, K.N., Chowdhury, Sk.F., Tao, L., Dodabalapur, A. and Akinwande, D. (2013) High performance current saturating graphene field-effect transistor with hexagonal boron nitride dielectric on flexible polymeric substrates. *IEEE Electron Device Letters*, **34**, 172-174.
- [31] Mak, K.F., Lee, C.G., Hone, J., Shan, J. and Heinz, T.F. (2010) Atomically thin MoS<sub>2</sub>: A new direct-gap semiconductor. *Physical Review Letters*, **105**, Article ID: 136805.
- [32] Splendiani, A., Sun, L., Zhang, Y.B., Li, T.S., Kim, J., Chim, C.Y., Galli, G. and Wang, F. (2010) Emerging photoluminescence in monolayer MoS<sub>2</sub>. *Nano Letters*, **10**, 1271-1275.
- [33] Eda, G., Yamaguchi, H., Voiry, D., Fujita, T., Chen, M.W. and Chhowalla, M. (2011) Photoluminescence from chemically exfoliated MoS<sub>2</sub>. *Nano Letters*, **11**, 5111-5116.
- [34] Radisavljevic, B., Whitwick, M.B. and Kis, A. (2011) Integrated circuits and logic operations based on single-layer MoS<sub>2</sub>. *ACS Nano*, **5**, 9934-9938.
- [35] Yin, Z.Y., Li, H., Jiang, L., Shi, Y.M., Sun, Y.H., Lu, G., Zhang, Q., Chen, X.D. and Zhang, H. (2012) Single-layer MoS<sub>2</sub> phototransistors. *ACS Nano*, **6**, 74-80.
- [36] He, Q.Y., Zeng, Z.Y., Yin, Z.Y., Li, H., Wu, S.X., Huang, X. and Zhang, H. (2012) Fabrication of flexible MoS<sub>2</sub> thin-film transistor arrays for practical gas-sensing applications. *Small*, **8**, 2994-2999.
- [37] Liu, J.Q., Zeng, Z.Y., Cao, X.H., Lu, G., Wang, L.H., Fan, Q.L., Huang, W. and Zhang, H. (2012) Preparation of MoS<sub>2</sub>-polyvinylpyrrolidone nanocomposites for flexible nonvolatile rewritable memory devices with reduced graphene oxide electrodes. *Small*, **8**, 3517-3522.
- [38] Wang, H., Yu, L.L., Lee, Y.H., Shi, Y.M., Hsu, A., Chin, M.L., Li, L.J., Dubey, M., Kong, J. and Palacios, T. (2012) Integrated circuits based on bilayer MoS<sub>2</sub> transistors. *Nano Letters*, **12**, 4674-4680.
- [39] Pu, J., Yomogida, Y., Liu, K.K., Li, L.J., Twasa, Y. and Takenobu, T. (2012) Highly flexible MoS<sub>2</sub> thin-film transistors with ion gel dielectrics. *Nano Letters*, **12**, 4013-4017.
- [40] Novoselov, K.S., Jiang, D., Schedin, F., Booth, T.J., Khotkevich, V.V., Morozov, S.V. and Geim, A.K. (2005) Two-dimensional atomic crystals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **102**, 10451-10453.
- [41] Zhang, Y.J., Ye, J.T., Yomogida, Y., Takenobu, T. and Iwasa, Y. (2013) Formation of a stable *p-n* junction in a liquid-gated MoS<sub>2</sub> ambipolar transistor. *Nano Letters*, **13**, 3023-3028.
- [42] Salvatore, G.A., Münzenrieder, N., Barraud, C., Petti, L., Zysset, C., Büthe, L., Ensslin, K. and TrÖster, G. (2013) Fabrication and transfer of flexible few-layers MoS<sub>2</sub> thin film transistors to any arbitrary substrate. *ACS Nano*, **7**, 8809-8815.

- [43] Lopez-Sanchez, O., Liado, E.A., Koman, V., Morral, A.F., Radenovic, A. and Kis, A. (2014) Light generation and harvesting in a van der Waals Heterostructure. *ACS Nano*, **8**, 3042-3048.
- [44] Smith, R.J., King, P.J., Lotya, M., Wirtz, C., Khan, U., De, S., O'Neill, A., Duesberg, G.S., Grunlan, J.C., Moriarty, G., Chen, J., Wang, J.Z., Minett, A.I., Nicolosi, V. and Coleman, J.N. (2011) Large-scale exfoliation of inorganic layered compounds in aqueous surfactant solutions. *Advanced Materials*, **23**, 3944-3948.
- [45] Qin, X.P., Ke, P.L., Wang, A.Y. and Kim, K.H. (2013) Microstructure, mechanical and tribological behaviors of MoS<sub>2</sub>-Ti composite coatings deposited by a hybrid HIPIMS method. *Surface and Coatings Technology*, **228**, 275-281.
- [46] Zeng, Z.Y., Yin, Z.Y., Huang, X., Li, H., He, Q.Y., Lu, G., Boey, F. and Zhang, H. (2011) Single-layer semiconducting nanosheets: High-yield preparation and device fabrication. *Angewandte Chemie International Edition*, **50**, 11093-11097.
- [47] Liu, K.K., Zhang, W.J., Lee, Y.H., Lin, Y.C., Chang, M.T., Su, C.Y., Chang, C.S., Li, H., Shi, Y.M., Zhang, H., Lai, C.S. and Li, L.J. (2012) Growth of large-area and highly crystalline MoS<sub>2</sub> thin layers on insulating substrates. *Nano Letters*, **12**, 1538-1544.
- [48] Ye, L.J., Xu, H.Y., Zhang, D.K. and Chen, S.J. (2014) Synthesis of bilayer MoS<sub>2</sub> nanosheets by a facile hydrothermal method and their methyl orange adsorption capacity. *Materials Research Bulletin*, **55**, 221-228.
- [49] Liu, H., Si, M.W., Najmaei, S., Neal, A.T., Du, Y.C., Ajayan, P.M., Lou, J. and Ye, P.D. (2013) Statistical study of deep submicron dual-gated field-effect transistors on monolayer chemical vapor deposition molybdenum disulfide films. *Nano Letters*, **13**, 2640-2646.
- [50] Wang, X.S., Feng, H.B., Wu, Y.M. and Jiao, L.Y. (2013) Controlled synthesis of highly crystalline MoS<sub>2</sub> flakes by chemical vapor deposition. *Journal of the American Chemical Society*, **135**, 5304-5307.
- [51] Zhan, Y.J., Liu, Z., Najmaei, S., Ajayan, P.M. and Lou, J. (2012) Large-area vapor-phase growth and characterization of MoS<sub>2</sub> atomic layers on a SiO<sub>2</sub> substrate. *Small*, **8**, 966-971.
- [52] Yu, Y.F., Li, C., Liu, Y., Zhang, Y. and Cao, L.Y. (2013) Controlled scalable synthesis of uniform, high-quality monolayer and few-layer MoS<sub>2</sub> films. *Scientific Reports*, **3**, Article Number: 1866.
- [53] Mann, J., Ma, Q., Odenthal, P.M., Isarraraz, M., Le, D., Preciado, E., Barroso, D., Yamaguchi, K., Palacio, G.V.S., Nguyen, D., Tran, T., Wurch, M., Nguyen, A., Klee, V., Bobek, S., Sun, D., Heinz, T.F., Rahman, T.S., Kawakami, R. and Bartels, L. (2014) 2-Dimensional transition metal dichalcogenides with tunable direct band gaps: MoS<sub>2(1-x)</sub>Se<sub>2x</sub> monolayers. *Advanced Materials*, **26**, 1399-1404.
- [54] Ling, X., Lee, Y.H., Lin, Y.X., Fang, W.J., Yu, L.L., Dresselhaus, M.S. and Kong, J. (2014) Role of the seeding promoter in MoS<sub>2</sub> growth by chemical vapor deposition. *Nano Letters*, **14**, 464-472.
- [55] Lee, Y.H., Yu, L.L., Wang, H., Fang, W.J., Ling, X., Shi, Y.M., Lin, C.T., Huang, J.K., Chang, M.T., Chang, C.S., Dresselhaus, M., Palacios, T., Li, L.J. and Kong, J. (2013) Synthesis and transfer of single-layer transition metal disulfides on diverse surfaces. *Nano Letters*, **13**, 1852-1857.
- [56] Shi, Y.M., Huang, J.K., Jin, L.M., Hsu, Y.T., Yu, S.F., Li, L.J. and Yang, H.Y. (2013) Selective decoration of Au nanoparticles on monolayer MoS<sub>2</sub> single crystals. *Scientific Reports*, **3**, Article Number: 1839.
- [57] Li, H., Wu, J., Huang, X., Lu, G., Yang, J., Lu, X., Xiong, Q.H. and Zhang, H. (2013) Rapid and reliable thickness identification of two-dimensional nanosheets using optical microscopy. *ACS Nano*, **7**, 10344-10353.
- [58] Cheiwchanchamnangij, T. and Lambrecht, W.R.L. (2012) Quasiparticle band structure calculation of monolayer, bilayer, and bulk MoS<sub>2</sub>. *Physical Review B*, **85**, Article ID: 205302.
- [59] Li, H., Yin, Z.Y., He, Q.Y., Li, H., Huang, X., Lu, G., Fam, D.W.H., Tok, A.L.Y., Zhang, Q. and Zhang, H. (2012) Fabrication of single- and multi-layer MoS<sub>2</sub> film-based field-effect transistors for sensing NO at room temperature. *Small*, **1**, 63-67.
- [60] Li, T.S. and Galli, G. (2007) Electronic properties of MoS<sub>2</sub> nanoparticles. *Journal of Physical Chemistry C*, **111**, 16192-16196.
- [61] Ayari, A., Cobas, E., Ogundadegbe, O. and Fuhrer, M.S. (2007) Realization and electrical characterization of ultrathin crystals of layered transition-metal dichalcogenides. *Journal of Applied Physics*, **101**, Article ID: 014507.
- [62] Lee, Y.H., Zhang, X.Q., Zhang, W.J., Chang, M.T., Lin, C.T., Chang, K.D., Yu, Y.C., Wang, J.T.W., Chang, C.S., Li, L.J. and Lin, T.W. (2012) Synthesis of large-area MoS<sub>2</sub> atomic layers with chemical vapor deposition. *Advanced Materials*, **24**, 2320-2325.
- [63] Shah, P.B., Amani, M., Chin, M.L., O'Regan, T.P., Crowne, F.J. and Dubey, M. (2014) Analysis of temperature dependent hysteresis in MoS<sub>2</sub> field effect transistors for high frequency applications. *Solid-State Electronics*, **91**, 87-90.
- [64] Tsai, D.S., Liu, K.K., Lien, D.H., Tsai, M.L., Kang, C.F., Lin, C.A., Li, L.J. and He, J.H. (2013) Few-layer MoS<sub>2</sub> with high broad band photogain and fast optical switching for use in harsh environments. *ACS Nano*, **7**, 3905-3911.
- [65] Zhang, W.J., Chuu, C.P., Huang, J.K., Chen, C.H., Tsai, M.L., Chang, Y.H., Liang, C.T., Chen, Y.Z., Chueh, Y.L., He,

- J.H., Chou, M.Y. and Li, L.J. (2014) Ultrahigh-gain photodetectors based on atomically thin graphene-MoS<sub>2</sub> heterostructures. *Scientific Reports*, **4**, 3826.
- [66] Lin, Y.C., Lu, N., Lopez, N.P., Li, J., Lin, Z., Peng, X., Lee, C.H., Sun, C., Calderin, L., Browning, P.N., Bresnehan, M.S., Kim, M.J., Mayer, T.S., Terrones, M. and Robinson, J.A. (2014) Direct synthesis of van der Waals solids. *ACS Nano*, **8**, 3715-3723.
- [67] Perkins, F.K., Friedman, A.L., Cobas, E., Campbell, P.M., Jernigan, G.G. and Jonker, B.T. (2013) Chemical vapor sensing with monolayer MoS<sub>2</sub>. *Nano Letters*, **13**, 668-673.
- [68] Late, D.J., Huang, Y.K., Liu, B., Acharya, J., Shirodkar, S.N., Luo, J.J., Yan, A.M., Charles, D., Waghmare, U.V., Dravid, V.P. and Rao, C.N.R. (2013) Sensing behavior of atomically thin-layered MoS<sub>2</sub> transistors. *ACS Nano*, **7**, 4879-4891.
- [69] Haering, R.R., Stiles, J.A.R. and Brandt, K. (1980) Lithium molybdenum disulphide battery cathode. US Patent No. 4224390.
- [70] Du, G.D., Guo, Z.P., Wang, S.Q., Zeng, R., Chen, Z.X. and Liu, H.K. (2010) Superior stability and high capacity of restacked molybdenum disulfide as anode material for lithium ion batteries. *Chemical Communications*, **46**, 1106-1108.
- [71] Chang, K. and Chen, W.X. (2011) L-cysteine-assisted synthesis of layered MoS<sub>2</sub>/grapheme composites with excellent electrochemical performances for lithium ion batteries. *ACS Nano*, **5**, 4720-4728.
- [72] Bang, G.S., Nam, K.W., Kim, J.Y., Shin, J., Choi, J.K. and Choi, S.Y. (2014) Effective liquid-phase exfoliation and sodium ion battery application of MoS<sub>2</sub> nanosheets. *ACS Applied Materials Interfaces*, **6**, 7084-7089.
- [73] David, L., Bhandavat, R. and Singh, G. (2014) MoS<sub>2</sub>/grapheme composite paper for sodium-ion battery electrodes. *ACS Nano*, **8**, 1759-1770.
- [74] Shanmugan, M., Durcan, C.A. and Yu, B. (2012) Layered semiconductor molybdenum disulfide nanomembrane based Schottky-barrier solar cells. *Nanoscale*, **4**, 7399.
- [75] Gu, X., Cui, W., Li, H., Wu, Z.W., Zeng, Z.Y., Lee, S.T., Zhang, H. and Sun, B.Q. (2013) A solution-processed hole extraction layer made from ultrathin MoS<sub>2</sub> nanosheets for efficient organic solar cells. *Advanced Energy Materials*, **3**, 1262-1268.
- [76] Tsai, M.L., Su, S.H., Chang, J.K., Tsai, D.S., Chen, C.H., Wu, C.I., Li, L.J., Chen, L.J. and He, J.H. (2014) Monolayer MoS<sub>2</sub> hetero junction solar cells. *ACS Nano*, **8**, 8317-8322.

汉斯出版社为全球科研工作者搭建开放的网络学术中文交流平台。自2011年创办以来，汉斯一直保持着稳健快速发展。随着国内外知名高校学者的陆续加入，汉斯电子期刊已被450多所大中华地区高校图书馆的电子资源采用，并被中国知网全文收录，被学术界广为认同。

汉斯出版社是国内开源（Open Access）电子期刊模式的先行者，其创办的所有期刊全部开放阅读，即读者可以通过互联网免费获取期刊内容，在非商业性使用的前提下，读者不支付任何费用就可引用、复制、传播期刊的部分或全部内容。

