基于一种多功能系统的二维纳米器件高效制备

梁亚春¹, 焦陈寅¹, 肖飞¹, 朱健凯¹, 徐博¹, 文婷¹, 伍松¹, 任子明²,
韦学勇², 陈滢³, 贾浩³, 夏娟¹, 王曾晖^{1*}

1. 电子科技大学基础与前沿研究院, 成都 610054

2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049

3. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所传感技术国家重点实验室, 上海 200050

* 通信作者. E-mail: zenghui.wang@uestc.edu.cn

收稿日期: 2021-09-13; 修回日期: 2021-10-29; 接受日期: 2021-11-01; 网络出版日期: 2022-01-19

国家重点研发计划 (批准号: 2018YFE0115500, 2019YFE0120300, 2020YFB2009002)、国家自然科学基金 (批准号: 61774029, 62004026, 62004032)、四川省科技厅 (批准号: 2021YJ0517, 2021JDTD0028, 2019YFSY0007, 2019JDTD0006) 和上海市浦江人才计划 (批准号: 20PJ1415600) 资助项目

摘要 原子级厚度的二维层状晶体材料具有丰富的物理特性, 在新型微纳器件领域展现出重要的发展潜力, 相关的器件制备和性能研究也引起了广泛的关注. 二维材料微纳器件的制备需要经过二维材料的转移及金属电极的淀积等一系列过程. 然而, 在传统的制备流程中所涉及多步工艺需要用到诸多不同设备, 如二维材料转移对准系统、电子束曝光系统, 或是光刻系统, 而且往往在一些步骤中涉及有机溶液处理, 有可能会对样品带来一些不利的影响. 本文设计展示了一种能够实现二维材料微纳器件制备的多功能系统, 该系统不仅可以实现二维材料的高效转移, 而且可以直接进行金属电极的准确淀积, 并且整个加工流程不涉及溶液处理, 具有操作方便、效率高、样品污染少等优点. 基于该多功能系统, 我们成功制备出了 MoS₂ 场效应晶体管并对器件进行了光学表征和电学性能测试, 展现了这一系统在高效制备微纳器件方面的潜力.

关键词 二维晶体材料, 多功能制备系统, 材料干法转移, 金属电极淀积, MoS₂ 场效应晶体管

1 引言

原子级厚度的二维层状晶体材料, 如石墨烯 (Graphene)、氮化硼 (h-BN)、过渡金属硫族化合物 (transition metal dichalcogenides, TMDCs) 等由于具有丰富的电学、光学、力学等性质, 在电子信息领域引起了极大关注^[1~4]. 制备电子器件所需要的二维材料大多是通过化学气相沉积 (chemical vapor deposition, CVD) 方法或者胶带机械剥离 (mechanical exfoliation) 法得到^[5,6]. 其中, 利用胶带机械剥

引用格式: 梁亚春, 焦陈寅, 肖飞, 等. 基于一种多功能系统的二维纳米器件高效制备. 中国科学: 信息科学, 2022, 52: 348–357, doi: 10.1360/SSI-2021-0317

Liang Y C, Jiao C Y, Xiao F, et al. Fast prototyping of nanodevices based on two dimensional materials using a multifunctional fabrication system (in Chinese). Sci Sin Inform, 2022, 52: 348–357, doi: 10.1360/SSI-2021-0317

离法得到二维材料,具有操作简单灵活、效率高、样品污染少、晶体缺陷少等优势^[7,8],被广泛应用于各类新型薄层二维材料及其器件的前期探索。

为了研究二维晶体材料及微纳米器件的特性,首先需要通过一定的方法将二维材料转移到基底(如 Si/SiO₂) 上^[9,10]。干法转移技术就是一种简单、高效、灵活的材料转移手段^[11,12];干法转移技术也非常适合在保护气氛下(如手套箱中)对空气、湿度敏感的材料进行转移、堆叠等处理;特别地,在一些特殊结构的器件中,如纳米机电系统谐振器(NEMS resonator)^[13,14],器件具有悬空的立体结构,绝大多数只能采用干法转移手段。干法转移的过程可以简单描述为,将胶带剥离的薄层二维材料粘贴到聚二甲硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS) 上面,然后借助材料转移对准系统,将薄层二维材料转移到 Si/SiO₂ 基底的目标区域上。干法转移技术不仅能够转移单一的二维材料,还可以通过“转移+堆叠”得到丰富的二维异质结体系。为了对所研究的二维材料做电学性能测试,需要在二维薄层转移完成之后进行金属电极的淀积^[15,16]。在金属电极淀积的过程中,需要借助对准系统将掩模版与二维材料进行精确的对准。目前的材料转移和电极淀积过程的对准过程,通常是在两套不同的系统下完成,在时间和空间上表现出操作的低效性和不便性。

基于此,本文设计了一种二维材料微纳米器件制备的多功能系统,该系统不仅能与绝大多数显微镜兼容使用,高效完成二维材料及其异质结结构的转移操作,而且在转移完成之后能够无缝衔接地进行掩模版对准。同时,该系统也能够很好地兼容绝大多数金属淀积装置,因此可以直接进入金属淀积系统,实现金属电极的准确淀积。利用这套二维材料微纳米器件多功能系统,我们成功制备了基于 Graphene/h-BN/MoS₂ 异质结结构的场效应晶体管^[17,18],并对器件进行光学表征和电学性能测试。

2 二维材料微纳米器件制备的多功能系统设计及器件制备方法

2.1 多功能系统的构造

图 1 为本文设计和构造的用于制备二维材料微纳米器件的多功能系统结构示意图。该多功能系统主要结构包括安装固定底座、位移模块、多功能转换模块和基底固定旋转模块等。

其中,安装固定底座起到固定整个系统的作用,在多功能转换模块的下方。安装固定底座上开有方形的贯通槽,可以使多功能转换片降至足够低的位置,使需要转移的二维材料或者金属淀积掩模版和 Si/SiO₂ 实现紧密的接触。位移模块则由 3 个独立的单轴位移滑台组成,分别可以沿三维 (X, Y, Z) 方向均匀移动。多功能转换模块固定在沿 Z 轴方向移动的单轴位移滑台上面。通过位移模块三维方向的均匀移动,可以带动多功能转换模块及多功能转换片的三维方向均匀移动。基底固定旋转模块不仅可以固定 Si/SiO₂ 基底,而且可以对 Si/SiO₂ 基底进行旋转。

该多功能系统具有操作便捷、高效等特点,例如,通过调节 4 个独立的硬质压缩弹簧(固定在 L 型折弯结构的底边和多功能转换片之间)的伸缩程度,就可以实现对二维材料和掩模版与 Si/SiO₂ 基底之间的倾斜度或者水平度的可控调节。此外,只需要更换合适的多功能转换片,就可以实现多功能系统在二维材料干法转移或者金属电极淀积功能之间的转换。基于此,我们可以利用该多功能系统实现类型丰富的材料转移和金属电极淀积,从而实现各类微纳米器件的制备。

2.2 利用多功能系统实现二维材料干法转移

制备二维微纳米器件的第 1 步是利用多功能系统在 Si/SiO₂ 基底上转移二维材料。具体转移步骤如图 2 所示。我们首先准备需要转移的二维材料及 Si/SiO₂ 基底,用胶带对二维晶体进行反复剥离,再将合适尺寸的 PDMS 固定在多功能转换片上,接着用 PDMS 去粘取胶带上的二维材料,并在

图 1 (网络版彩图) 二维材料微纳器件制备的多功能系统结构示意图

Figure 1 (Color online) Schematic illustration of a multifunctional fabrication system for prototyping 2D nanodevices

图 2 (网络版彩图) 基于多功能系统的二维材料干法转移原理示意图. (a) 二维材料与 Si/SiO₂ 基底之间的定位与对准; (b) 二维材料与 Si/SiO₂ 基底紧密的接触; (c) 多功能转换片和 PDMS 缓缓离开 Si/SiO₂ 基底; (d) 转移成功后, 二维材料粘附在 Si/SiO₂ 基底的表面; (e) 多功能系统进行二维材料转移的实物图

Figure 2 (Color online) Schematic illustration of the process flow for transferring 2D materials using the multifunctional fabrication system. (a) Aligning the 2D material to the substrate; (b) contacting the 2D material with the substrate; (c) detaching the PDMS from the substrate; (d) 2D material remaining on the substrate; (e) picture of the actual system under a microscope

光学显微镜下寻找 PDMS 表面粘附的合适的二维材料, 然后将 Si/SiO₂ 基底清洗干净, 并通过高温胶固定在多功能系统的基底固定旋转模块上面, 最后, 将粘贴有目标二维材料的多功能转换片固定在多功能转换模块中 (朝向 Si/SiO₂ 基底), 并通过多功能转换模块调整转换片与基底的倾斜度或者水平度

图 3 (网络版彩图) 基于多功能系统的金属电极淀积原理示意图。(a) 金属淀积掩模版与二维材料之间的定位和对准; (b) 金属淀积掩模版与二维材料之间紧密的接触; (c) 将整个多功能系统放置到金属淀积仪器中进行金属电极的淀积; (d) 多功能系统在金属淀积设备中的实物图; (e) 金属淀积完成后, 多功能转换片和掩模版缓缓离开二维材料, 在二维材料相关区域有高质量的金属电极

Figure 3 (Color online) Schematic illustration of the process flow for patterning electrodes using the multifunctional fabrication system. (a) Aligning the mask to the 2D flake; (b) mask in contact with the 2D flake; (c) multifunctional fabrication system inside an evaporator for evaporation; (d) picture of the multifunctional fabrication system inside an evaporator; (e) after evaporation, the holder and mask disengage from the 2D flake, leaving the electrodes patterned

(图 2(a) 所示).

在这个过程中, 我们利用 X , Y , Z 位移模块, 不断调整二维材料和 Si/SiO_2 基底之间的相对位置和距离, 同时通过基底固定旋转模块调整二维材料和 Si/SiO_2 基底之间的相对角度. 在位置和角度确定后, 调整位移模块的 Z 轴方向, 使二维材料和 Si/SiO_2 基底紧密地贴合一段时间 (图 2(b)). 然后将多功能转换片缓缓向上提起 (图 2(c)), 最后在二维材料与 Si/SiO_2 基底之间的范德华力 (van der Waals force) 作用下, 二维材料紧紧贴附在基底的表面 (图 2(d)). 图 2(e) 为多功能系统放置到显微镜下进行材料转移的实物图. 正如实物图所示, 在显微镜观察下可以完成二维晶体材料和 Si/SiO_2 的固定, 材料与 Si/SiO_2 基底之间的对准, 材料与 Si/SiO_2 基底之间的紧密接触, 多功能转换片与 Si/SiO_2 基底的脱离, 实现材料的干法转移. 为了提高干法转移的成功率, 需要调整多功能转换片的角度; 对于特别薄层的材料需要加热基底 (在基底固定旋转模块上加装加热片) 以降低 PDMS 的附着力.

此外, 采用该多功能系统不仅可以实现某种特定二维材料的转移, 还可以通过“转移 + 堆叠”的方式实现二维材料异质结体系的构造.

2.3 利用多功能系统实现金属电极淀积

在二维材料转移成功后, 需对其进行图形化的金属电极淀积, 从而获得二维微纳米器件 (图 3). 在这个步骤中, 我们首先将干法转移用的转换片更换为金属淀积用的转换片, 并用高温胶将包含电极图形的掩模版固定到转换片的开孔处 (朝向二维材料和 Si/SiO_2 基底). 掩模版与二维材料之间的相对位置、相对角度、相对距离的调节与前一部分干法转移过程的调节方法相同 (图 3(b)). 然后将调整好的多功能系统整体放入金属淀积装置中进行金属电极淀积 (图 3(c)), 在这个过程中高温胶将确保掩模版与转换片始终保持紧密贴附. 图 3(d) 为利用多功能系统进行掩模版对准后, 放置到金属淀积设备中的实物图. 将金属淀积设备设置到一定的真空度、温度和时间, 就可以进行金属电极的淀积. 最后, 金属

图 4 (网络版彩图) 二维材料与干法转移的 Graphene/h-BN/MoS₂ 异质结结构及晶体管显微镜照片. (a) PDMS 上面的 Graphene 显微镜照片; (b) PDMS 上面的 MoS₂ 显微镜照片; (c) 基于多功能系统干法转移的 Graphene/h-BN/MoS₂ 异质结结构显微镜照片; (d) 基于多功能系统淀积的金属电极显微镜照片

Figure 4 (Color online) Optical images of a Graphene/h-BN/MoS₂ heterostructure by dry transfer. (a) Optical image of a Graphene flake on PDMS; (b) optical image of an MoS₂ flake on PDMS; (c) optical image of the Graphene/h-BN/MoS₂ heterostructure fabricated using multifunctional fabrication system; (d) optical image of the device with electrodes patterned using the multifunctional fabrication system

电极淀积完成后, 我们将整个装置从金属淀积装置中取出, 并在显微镜下将多功能转换片缓缓向上提起, 继而取下样品得到图形化电极淀积后的二维微纳器件 (图 3(e)). 值得注意的是, 从原理上该多功能系统并不会限制所制备电极的尺寸, 淀积金属的线宽主要由掩模版决定. 如 200 nm 厚的氮化硅掩模版, 其线宽完全可以做到 2 μm; 如果进一步降低掩膜版厚度, 并采用适当的加工工艺 (例如用电子束曝光来图形化需要刻蚀的区域), 完全可以进一步降低掩膜版上的线宽.

3 基于 MoS₂ 的场效应晶体管制备及性能测试

为了验证利用上述多功能系统制备器件的可行性, 我们利用该系统制备了二维半导体 MoS₂ 场效应晶体管, 并完成了相关器件性能的测试.

在二维 MoS₂ 场效应晶体管的制备中, 我们使用 Graphene, h-BN 和 MoS₂ 分别作为背栅极、栅介质层和沟道材料. 图 4(a) 和 (b) 分别为采用胶带机械剥离 Graphene 晶体和 MoS₂ 晶体后, PDMS 上粘附的 Graphene 片和 MoS₂ 片的显微镜照片.

图 4(c) 为利用多功能系统转移得到的 Graphene/h-BN/MoS₂ 异质结的场效应晶体管显微镜照片.

该异质结自下而上为 Graphene (作为晶体管背栅极电极)、h-BN (作为背栅极的介质材料) 和 MoS₂ (作为晶体管的沟道材料) 的三层堆叠结构. 在图 4(c) 中, 分别用虚线框标注了不同二维晶体材料的边界. 红色虚线区域内为 Graphene 材料, 黄色虚线区域内为 h-BN 材料, 黑色虚线区域内为 MoS₂ 材料. 进一步, 我们利用这一多功能系统在转移堆叠的二维异质结上淀积了多个边沿规则清晰且质量好的金属电极 (图 4(d)), 分别构成了栅极、源极和漏极; 这些金属电极和 Si/SiO₂ 基底上先前制备的金属焊盘相连接, 从而使我们可以在探针台下进一步开展器件电学性能测试.

在器件制备完成后, 我们首先使用拉曼 (Raman) 光学测试手段来表征器件的组成结构, 如图 5 所示. 图 5(a) 为进行 Raman mapping 测试的器件光学照片, 可以明显看到清晰的 Graphene/h-BN/MoS₂ 异质结和淀积的晶体管栅极、源极和漏极结构. 红色矩形框显示的是 Raman mapping 的异质结区域. 利用 WITec-α300 共聚焦显微拉曼光谱仪进行拉曼光谱的采集及拉曼成像, 物镜为 NA = 0.75 的 Zeiss50X, 使用激光的波长为 532 nm. 图 5(b) 为将拉曼成像数据对 Graphene, hBN, MoS₂, Au 区域分类着色后的成像结果, 其中蓝色区域为 Graphene 材料, 灰白色区域为 h-BN 材料, 红棕色区域为 MoS₂ 材料, 金色区域为淀积的 Au 电极. 图 5(c) 中拉曼光谱为 MoS₂ 区域和 Graphene 区域的拉曼散射单谱. 数据显示 MoS₂ 的特征峰为位于 384 cm⁻¹ 的 E_{2g}¹ 面内声子振动模式和位于 409 cm⁻¹ 的 A_{1g} 面外声子振动模式; Graphene 的特征峰则为位于 1582 cm⁻¹ 的 G 振动模式和位于 2718 cm⁻¹ 的 2D 振动模式. 图 5(d) 和 (e) 为利用 MoS₂ 的 A_{1g} 峰和 Graphene 的 G 峰进行成像的拉曼图像, 显示了 MoS₂ 和 Graphene 的分布特征. 拉曼光谱显示, 在经历了整个制备流程后, 二维材料的拉曼特征峰没有发生明显的变化, 这说明利用这一多功能系统制备的二维异质结电学器件, 能够较好地保护二维材料, 减少甚至避免来自溶液污染和材料变性的影响.

接下来, 我们对所制备的 MoS₂ 场效应晶体管进行输出特性和转移特性的测试, 以验证用该方法制备二维电子器件的可行性. 我们按图 6(a) 所示的电路连接方法将待测器件接入半导体参数分析仪: 两台半导体参数分析仪的低电压端口相连接, 并且通过探针连接到待测器件的源极; 其中一台的高电压端连接到器件的栅极, 另一台则通过探针连接到器件的漏极, 测试的光学照片如图 6(b) 所示.

首先, 我们通过施加不同的栅极电压 V_{gs} , 测试源极与漏极之间的电压 V_{ds} (如从 -1 到 1 V 变化) 与电流 I_{ds} 的变化关系, 得到 MoS₂ 晶体管的输出特性 (图 6(c)). 可以看出, 当器件的栅压 V_{gs} 为 -3 V 或者 0 V 时, I_{ds} 几乎为 0, 且不随 V_{ds} 变化; 当 V_{gs} 为 5 V 时, I_{ds} 有显著的变化, 且随 V_{ds} 增大而增大. 当器件 V_{gs} 增大到 7 V 时, I_{ds} 变化的趋势更加明显. 这是由于 V_{gs} (-3 和 0 V) 较小时, 器件处于关断状态, MoS₂ 沟道中载流子浓度很低, 电阻很大; 当 V_{gs} (如 5 或者 7 V) 达到一定的阈值电压后, 器件才会被开启, 此时沟道内载流子浓度迅速增加, 电阻迅速下降. 在此种情况下, V_{gs} 越大, 沟道内载流子浓度增加的越多, 沟道电阻就越小.

进一步, 我们通过设定特定的 V_{ds} , 测试 I_{ds} 随 V_{gs} 的变化情况, 得到 MoS₂ 晶体管的转移特性 (图 6(d)~(f)). 如图 6(d) 所示, 我们设定 V_{ds} 为 1 V, V_{gs} 从 -5 V 变化到 5 V, 当 V_{gs} 超过一定电压 (1 V) 时, I_{ds} 随着 V_{gs} 的增大而迅速增大, 器件为开启状态; 且 I_{ds} 的最大值随 V_{gs} (图 6(e)) 和 V_{ds} (图 6(f)) 的增大而增大; 然而当 V_{ds} 低于 1 V 时, I_{ds} 非常小, 器件为关断状态. 另外从转移特性曲线可以看出, MoS₂ 场效应晶体管属于电子导电类型 (n 型), 器件的 I_{ds} 随着 V_{gs} 增大而增大. 这一系列数据显示, 我们利用该系统制备的二维半导体 MoS₂ 场效应晶体管具有典型的 n 型场效应特征. 进一步, 可以根据晶体管的转移特性曲线, 计算出器件沟道材料的迁移率. 我们利用公式 $\mu = \frac{dI_{ds}}{dV_{gs}} \times \frac{L}{WC_{bn}V_{ds}}$, 其中 L , W , C_{bn} 分别是器件沟道的长 (L 为 20 μm)、宽 (W 为 10 μm) 和以 h-BN 作为栅极介电材料的单位面积电容 ($C_{bn} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{hbn}}{d_{bn}} = 4.56 \times 10^{-4} \text{ F} \cdot \text{m}^{-2}$, $d_{bn} = 73 \text{ nm}$). 计算结果显示, 这个器件的沟道迁移率 μ 大约为 11.3 cm²·V⁻¹·s⁻¹. 这表明利用该多功能系统不仅可以直接、高效地制备器件, 而且可以得到

图 5 (网络版彩图) 采用多功能系统制备的二维 Graphene/h-BN/MoS₂ 异质结晶体管及拉曼光谱成像 (Raman mapping) 照片。(a) 二维异质结晶体管结构及 Raman mapping 区域的光学照片, 红色矩形框内为 Raman mapping 区域; (b) 器件区域内 Raman mapping 的结果, 不同颜色代表不同材料 (由软件根据拉曼峰位判断); (c) 器件区域内 Graphene 和 MoS₂ 的拉曼光谱; (d) 器件区域在相对波数为 409 cm⁻¹ (MoS₂-A_{1g} 峰位) 拉曼强度成像; (e) 器件区域在相对波数为 1582 cm⁻¹ (Graphene-G 峰位) 拉曼强度成像

Figure 5 (Color online) The graphene/h-BN/MoS₂ heterostructure and its Raman mapping. (a) Optical image of MoS₂ transistor device and Raman mapping (red rectangle indicates the Raman mapping zone); (b) composite Raman signal map of the heterostructure (different colors denote different materials); (c) Raman spectra of graphene and MoS₂; (d) Raman intensity map at relative wave number 409 cm⁻¹ (MoS₂-A_{1g} peak); (e) Raman intensity map at relative wave number 1582 cm⁻¹ (Graphene-G peak)

能够正常工作且迁移率值适中的晶体管, 证明了该设备及方法的可性能和高效性。

4 总结

本文构造了一种用于制备二维材料微纳米器件的多功能系统。该多功能系统不仅能够在制备二维

图 6 (网络版彩图) 二维半导体材料 MoS_2 晶体管性能测试图. (a) 晶体管测试电路连接示意图; (b) 晶体管测试探针连接的光学显微镜照片; (c) 晶体管的输出特性曲线 (V_{ds} : $-1 \sim 1$ V; V_{gs} : $-3, 0, 5, 7$ V); (d) 晶体管的转移特性曲线 (V_{gs} : $-5 \sim 5$ V; V_{ds} : 1 V); (e) 晶体管的转移特性曲线 (V_{gs} : $-7 \sim 7$ V; V_{ds} : 1 V); (f) 晶体管的转移特性曲线 (V_{gs} : $-7 \sim 7$ V; V_{ds} : 1.5 V)

Figure 6 (Color online) Measurement of the 2D transistor. (a) Schematic of the transistor measurement setup; (b) optical image of a device being measured; (c) output curve of the transistor (V_{ds} : $-1 \sim 1$ V; V_{gs} : $-3, 0, 5, 7$ V); (d) transfer curve of transistor (V_{gs} : $-5 \sim 5$ V; V_{ds} : 1 V); (e) transfer curve of transistor (V_{gs} : $-7 \sim 7$ V; V_{ds} : 1 V); (f) transfer curve of transistor (V_{gs} : $-7 \sim 7$ V; V_{ds} : 1.5 V)

材料及异质结和淀积金属电极之间高效切换, 并且能够与绝大多数显微镜和金属淀积设备兼容使用. 利用该多功能系统, 我们成功实现了基于 Graphene/h-BN/ MoS_2 异质结的 MoS_2 场效应晶体管的制备, 并对器件进行了光学表征和电学特性测试, 充分证明了该多功能系统在二维材料微纳米器件制备

中的精确性和高效性. 该系统极大提高了二维材料微纳米器件制备、研究的开发效率.

参考文献

- 1 Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature*, 2005, 438: 197–200
- 2 Kim K K, Hsu A, Jia X, et al. Synthesis and characterization of hexagonal boron nitride film as a dielectric layer for graphene devices. *ACS Nano*, 2012, 6: 8583–8590
- 3 Mak K F, Lee C, Hone J, et al. Atomically thin MoS₂: a new direct-gap semiconductor. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 136805
- 4 Bunch J S, van der Zande A M, Verbridge S S, et al. Electromechanical resonators from graphene sheets. *Science*, 2007, 315: 490–493
- 5 Novoselov K S, Jiang D, Schedin F, et al. Two-dimensional atomic crystals. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102: 10451–10453
- 6 Zhan Y J, Liu Z, Najmaei S, et al. Large-area vapor-phase growth and characterization of MoS₂ atomic layers on a SiO₂ substrate. *Small*, 2012, 8: 966–971
- 7 Wang Q H, Kalantar-Zadeh K, Kis A, et al. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Nat Nanotech*, 2012, 7: 699–712
- 8 Tang D M, Kvashnin D G, Najmaei S, et al. Nanomechanical cleavage of molybdenum disulphide atomic layers. *Nat Commun*, 2014, 5: 3631
- 9 Radisavljevic B, Radenovic A, Brivio J, et al. Single-layer MoS₂ transistors. *Nat Nanotech*, 2011, 6: 147–150
- 10 Radisavljevic B, Whitwick M B, Kis A. Integrated circuits and logic operations based on single-layer MoS₂. *ACS Nano*, 2011, 5: 9934–9938
- 11 Yang R, Zheng X Q, Wang Z H, et al. Multilayer MoS₂ transistors enabled by a facile dry-transfer technique and thermal annealing. *J Vacuum Sci Tech B Nanotechnol MicroElectron*, 2014, 32: 061203
- 12 Wang Z H, Islam A, Yang R, et al. Environmental, thermal, and electrical susceptibility of black phosphorus field effect transistors. *J Vacuum Sci Tech B Nanotechnol MicroElectron*, 2015, 33: 052202
- 13 Lee J, Wang Z H, He K L, et al. High frequency MoS₂ nanomechanical resonators. *ACS Nano*, 2013, 7: 6086–6091
- 14 Lee J, Wang Z H, He K L, et al. Electrically tunable single- and few-layer MoS₂ nanoelectromechanical systems with broad dynamic range. *Sci Adv*, 2018, 4: 6653
- 15 Liu H, Neal A T, Ye P D. Channel length scaling of MoS₂ MOSFETs. *ACS Nano*, 2012, 6: 8563–8569
- 16 Das S, Chen H Y, Penumatcha A V, et al. High performance multilayer MoS₂ transistors with scandium contacts. *Nano Lett*, 2013, 13: 100–105
- 17 Liang Y, Zhu J, Xiao F, et al. Nanoscale inverters enabled by a facile dry-transfer technique capable of fast prototyping of emerging two-dimensional electronic devices. In: *Proceedings of the 5th IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing Conference (EDTM)*, 2021
- 18 Liang Y, Zhu J, Xiao F, et al. Two-dimensional inverters based on MoS₂-hBN-graphene heterostructures enabled by a layer-by-layer dry-transfer method. *IEEE J Electron Dev Soc*, 2021. doi: 10.1109/JEDS.2021.3097995

Fast prototyping of nanodevices based on two dimensional materials using a multifunctional fabrication system

Yachun LIANG¹, Chenyin JIAO¹, Fei XIAO¹, Jiankai ZHU¹, Bo XU¹, Ting WEN¹, Song WU¹, Ziming REN², Xueyong WEI², Ying CHEN³, Hao JIA³, Juan XIA¹ & Zenghui WANG^{1*}

1. *Institute of Fundamental and Frontier Sciences, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;*

2. *State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;*

3. *State Key Lab of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*

* Corresponding author. E-mail: zenghui.wang@uestc.edu.cn

Abstract Atomically thin two dimensional (2D) materials have recently attracted tremendous attention due to their intriguing physical properties, and demonstrated great potential in realizing novel nanoelectronic devices. To fabricate 2D micro/nano devices, it often requires one to first transfer 2D material onto Si/SiO₂ substrate, and then deposit metal electrodes on the 2D material, which typically involves multiple tools such as 2D material transfer system, e-beam lithography, or photolithography systems. In this work, we design a facile 2D device fabrication process to achieve the transfer, stacking, and metallization of 2D structures, all using the same multifunctional system. We then fabricate MoS₂ transistor using this multifunctional system, and characterize the device structure and device performance, demonstrating the practicality of this facile fabrication process, which can be used for fast prototyping new types of 2D nanodevices.

Keywords two dimensional (2D) materials, multifunctional fabrication system, dry transfer, metal electrode deposition, MoS₂ transistor