

原子级制造专题

衬底修饰层诱导的高覆盖率单层 MoS_2 晶圆生长研究左浩松^{1,2,a} 刘一禾^{1,2,a} 陈匡磊^{1,2,3} 胥如峰^{1,2} 张铮^{1,2,3,5*} 张先坤^{1,2,3,4*} 张跃^{1,2,3,4,5*}

(1. 北京科技大学 前沿交叉科学技术研究院 北京 100083; 2. 后摩尔时代芯片关键新材料与器件教育部重点实验室 北京 100083; 3. 新能源材料与技术北京市重点实验室 北京 100083; 4. 新金属材料全国重点实验室 北京 100083; 5. 北京科技大学未来芯片关键材料与技术集成创新中心 北京 100083)

Mediated Wafer-Scale Growth of Full-Coverage Monolayer MoS_2 ZUO Haosong^{1,2,a}, LIU Yihe^{1,2,a}, CHEN Kuanglei^{1,2,3}, XU Rufeng^{1,2}, ZHANG Zheng^{1,2,3,5*},
ZHANG Xiankun^{1,2,3,4*}, ZHANG Yue^{1,2,3,4,5*}

(1. Academy for Advanced Interdisciplinary Science and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory Critical New Materials and Devices for Chips PostMoore Era Ministry of Education, Beijing 100083, China; 3. Beijing Key Laboratory of New Energy Materials and Technologies, Beijing 100083, China; 4. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, Beijing 100083, China; 5. Beijing University of Science and Technology Integrated Innovation Center for Critical Future Chip Materials and Technologies, Beijing 100083, China)

Abstract As a key candidate material for integrated circuits in the post-Moore era, wafer-scale high-quality preparation of two-dimensional molybdenum disulfide (MoS_2) is fundamental for its industrial application. While chemical vapor deposition (CVD) on sapphire substrates enables large-area MoS_2 film growth, it is constrained by non-uniform molybdenum source deposition resulting from weak adsorption of gaseous MoO_3 at the Al-O interface, leading to film wrinkling and crack defects. This study proposes a growth strategy employing an Al-O-Mo-O chemical bonding modification layer on the substrate surface, successfully fabricating a uniform, continuous, and high-coverage 2-inch wafer-scale monolayer MoS_2 film. By maintaining a stable oxygen atmosphere during the pre-annealing deposition step, this method simultaneously eliminates dangling bonds on the sapphire surface and constructs an Al-O-Mo-O modification layer. This layer provides stable anchoring sites for gaseous MoO_3 deposition, enhancing its adsorption at the interface and promoting uniform adsorption, deposition, and sulfurization of the molybdenum precursor across the substrate. Consequently, a high-coverage monolayer MoS_2 film is achieved. Top-gated transistor arrays fabricated from this film exhibit excellent performance uniformity, with a maximum on/off ratio of 10^7 , a maximum on-state current of 10^{-5} A, and a device yield exceeding 96%. The substrate modification method presented in this work provides a novel approach for the controllable preparation of high-quality MoS_2 films on sapphire, optimizes existing fabrication processes, and holds significant promise for advancing the application of two-dimensional materials in integrated circuits.

Keywords MoS_2 , Precursor, MoO_3 , Film Coverage, Chemical Vapor Deposition

摘要 作为后摩尔时代集成电路发展的关键候选材料之一,二维二硫化钼(MoS_2)晶圆级高质量制备是其产业化应用的重要基础。当前基于蓝宝石衬底的化学气相沉积(CVD)法虽可实现大尺寸 MoS_2 薄膜生长,但受限于气相 MoO_3 在蓝宝石 Al-O 界面上吸附能力较弱导致的钼源不均匀沉积,造成了薄膜翘曲和裂纹缺陷等问题。研究提出了一种蓝宝石衬底表面预制备 Al-O-Mo-O 化学键合修饰层的生长策略,成功生长出均匀连续、高覆盖率的 2 英寸单层 MoS_2 晶圆。该方法通过在预退火

收稿日期: 2025-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(62204012; 62322402; 52225206; 52350301); 国家重点研发计划项目(2022YFA1203800)

* 联系人: E-mail: zhangzheng@ustb.edu.cn; zhangxiankun@ustb.edu.cn; yuezhang@ustb.edu.cn; a 同等贡献

沉积的过程中, 提供稳定的氧气氛围, 有效减弱了蓝宝石表面悬挂键, 同时在蓝宝石衬底表面构筑了 Al-O-Mo-O 修饰层, 为气相 MoO₃ 沉积提供稳固的锚定位点, 增强了 MoO₃ 反应源在界面上的吸附作用, 促进了气相钼源在衬底上的均匀吸附沉积和均匀硫化, 最终获得高覆盖率单层 MoS₂ 薄膜。基于此薄膜构建的顶栅晶体管阵列性能展现出优异的一致性, 最高开关比达 10⁷, 最大开态电流达 10⁻⁵ A, 器件良率超过 96%。研究提出的衬底修饰方法为蓝宝石基高质量 MoS₂ 薄膜的可控制备提供了新方案, 优化了现有制备工艺体系, 对推动二维材料在集成电路中的应用具有积极意义。

关键词 MoS₂ 前驱体 MoO₃ 薄膜覆盖率 化学气相沉积

中图分类号: TN3

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202506007

在后摩尔时代, 传统硅基集成电路的微缩化使其沟道尺寸逐渐逼近物理极限, 二维过渡金属硫族化合物(TMDCs)因其原子级厚度、优异的电学性能和可调制的带隙特性, 成为下一代半导体器件的关键候选材料^[1-3]。其中, 二硫化钼(MoS₂)因其高载流子迁移率(~200 cm²V⁻¹s⁻¹)、显著的开关比(>10)以及良好的环境稳定性, 在逻辑晶体管、光电探测器及柔性电子器件中展现出巨大的应用潜力^[4-6]。然而, 要实现 MoS₂ 的大规模集成电路应用, 首先需要实现大尺寸、高质量单层 MoS₂ 晶圆的可控制备。目前, 化学气相沉积(CVD)是制备晶圆级 MoS₂ 的主流方法, 其中蓝宝石(α -Al₂O₃)因其高温稳定性和原子级平整表面被广泛用作生长衬底^[7-10]。然而, 蓝宝石上 MoS₂ 晶圆制备仍存在问题, 首先受限于界面弱相互作用, MoO₃ 反应源在蓝宝石表面的扩散与吸附难以被调控, 其空间分布均匀性难以保证, 导致制备的薄膜发生厚度波动和局部区域未覆盖^[11-14]。其次, 蓝宝石衬底存在界面应力与缺陷, 蓝宝石与 MoS₂ 的晶格失配(~30%)和热膨胀系数差异, 易引发薄膜产生翘曲、裂纹或多晶畴区^[15]。

针对上述挑战, 本文提出了一种衬底修饰层诱导生长 MoS₂ 薄膜的方法, 通过 CVD 退火工艺在蓝宝石表面形成一层 Al-O-Mo-O 化学键合界面作为衬底修饰层, 进而优化 MoS₂ 的成核与生长动力学过程。不同于传统 CVD 生长中蓝宝石的 Al-O 界面, 该方法通过界面退火处理抑制了蓝宝石表面的悬挂键作用, 同时通过维持气相 MoO₃ 与蓝宝石表面反应时的 O₂ 分压形成 Al-O-Mo-O 化学键合界面, 为气相 MoO₃ 沉积提供稳固的锚定位点, 增强气相 MoO₃ 与表面的吸附作用, 从而实现无孔洞、低应力、高覆盖率的单层 MoS₂ 晶圆生长。生长的 MoS₂ 薄膜无需复杂转移步骤, 可直接用于器件集成。基于此方法, 作者成功制备了 2 英寸均匀连续覆盖单层 MoS₂ 薄膜, 并构建了高性能顶栅晶体管阵列器件, 其开关比最高达 10⁷, 开态电流最高达 10⁻⁵ A, 器件

良率 96%。这一方法为蓝宝石衬底上高质量 MoS₂ 的生长提供了新思路, 有望推动二维半导体在后摩尔时代集成电路中的应用。

1 实验及讨论

1.1 蓝宝石衬底表面退火处理

将 C 面(0001)蓝宝石衬底经超声清洗后置于第三温区石英舟内, 在三温区管式炉(图 1(a))中进行退火。在氩气(10 sccm)与氧气(20 sccm)混合气氛中, 于 900℃ 高温退火处理 1 h, 此过程可有效消除衬底表面缺陷并形成利于外延生长的原子台阶结构^[16]。退火后的蓝宝石表面台阶形貌可以通过原子力显微镜(AFM)扫描观察到(图 1(b)), 从图中可以看到, 退火后的蓝宝石表面台阶分布较为均匀, MoO₃ 前驱体倾向于吸附在台阶边缘(高能位点), 退火后均匀的台阶分布可引导 MoS₂ 晶畴定向排列, 有利于定向成核降低晶畴取向混乱, 从而使得晶界密度下降。

1.2 蓝宝石衬底上制备 MoS₂ 薄膜

首先在退火后的 2 英寸蓝宝石衬底上制备 MoS₂ 薄膜。在管式炉第一温区放置 1 g 硫粉, 通入 135 sccm 氩气, 加热至 120℃。第二温区放置 24 mg MoO₃, 通入氩氧混合气(Ar:O₂=100:1 sccm), 加热至 560℃。将衬底放置第三温区并升温至 900℃, 三个温区在同一时间点升到设定温度, 管内压力维持在 0.165 Torr, 生长 22.5 min 后得到了厘米级的单层 MoS₂ 薄膜(图 2(a))。光学显微镜图像(图 2(b))显示在此衬底上生长的 MoS₂ 薄膜展现出宏观连续性, 但在薄膜边缘区域存在一些肉眼可见的局域不连续。通过扫描电子显微镜(SEM)表面分析(图 2(c))发现, 在薄膜宏观连续的区域也能观察到一些表面孔洞, 这些孔洞破坏了薄膜的生长均一性。这些孔洞的出现主要由两方面因素导致, 退火后残余的亚稳态台阶结构在<5% 区域台阶间距偏差>50 nm, 导致局部迁移势垒产生差异^[17-18]。另一方

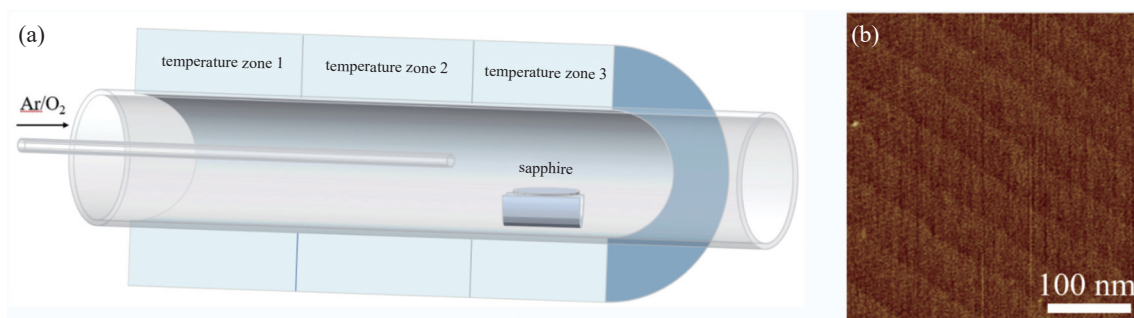


图1 蓝宝石衬底退火处理。(a)三温区管式炉退火处理示意图,(b)退火后蓝宝石衬底表面 AFM 扫描图像

Fig. 1 Annealing treatment of sapphire substrate. (a) Schematic diagram of annealing treatment in a three-zone tube furnace, (b) representative AFM scan of post-annealed sapphire surface

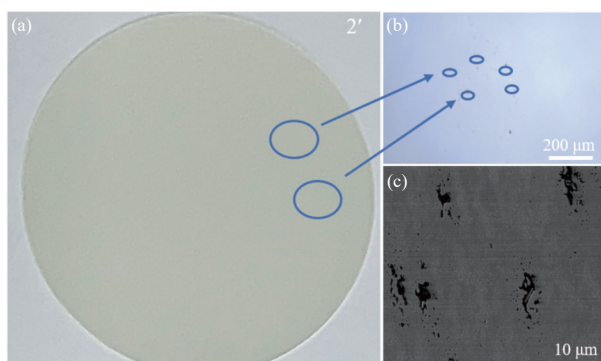


图2 退火蓝宝石衬底上 2 inch 单层 MoS_2 薄膜制备与表征。(a)蓝宝石衬底退火后制备的 2 英寸单层 MoS_2 薄膜宏观示意图,(b)蓝宝石表面退火后制备的 2 英寸单层 MoS_2 薄膜光学显微镜图,(c)蓝宝石表面退火后制备的 2 英寸单层 MoS_2 薄膜 SEM 图

Fig. 2 Synthesis and characterization of 2-inch monolayer MoS_2 films on annealed sapphire substrates. (a) Macroscopic schematic diagram of 2-inch monolayer MoS_2 thin films prepared on annealed sapphire substrates, (b) optical microscope image of 2-inch monolayer MoS_2 thin films prepared on annealed sapphire surfaces, (c) scanning Electron Microscope image of 2-inch monolayer MoS_2 thin films prepared on annealed sapphire surfaces

面在 CVD 生长过程中,硫蒸汽在沿气流方向上浓度逐渐降低,硫源供应不足,反应速率受限于硫的吸附和扩散,成核密度降低,晶畴生长缓慢,出现未连续区域。

1.3 衬底修饰层诱导生长 MoS_2 薄膜

为了得到均匀连续薄膜,本文采用了衬底修饰层诱导生长 MoS_2 薄膜。具体方法如图 3 所示,将 50 mg MoO_3 放置在管式炉的第二温区,为了避免 O_2 分压过高 MoO_3 的过快挥发,以及高温下氧气分

压过低 MoO_3 的自发还原,采用氩氧混合气($\text{Ar}:\text{O}_2=20:10$ sccm)并加热至 560°C ;将蓝宝石衬底放置在第三温区,加热至 900°C ,高温能提供足够的能量来克服反应能垒,促进 Al_2O_3 表面的 O 与 Mo 之间的化学键合,在各温区达到目标温度后,保温 1 h。该预处理过程能够在蓝宝石高温退火的同时在衬底表面预沉积 MoO_3 ,期间炉内压力维持在 0.165 Torr。待预处理后的蓝宝石衬底随炉冷却后,进行下一步的 MoS_2 薄膜制备。实验采用梯度温区协同控制策略,将高纯硫粉(Alfa Aesar, 99.9%, 1.0 g)封装于石英微腔并置于第一温区,通过精确温控模块以 $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 速率升温至 120°C ;同时,在第二温区将超高纯 MoO_3 粉末(Alfa Aesar, 99.999%, 17.0 mg)装载于石英舟内,经梯度升温程序达到 560°C ;预处理蓝宝石衬底固定于第三温区石英基座,经梯度升温程序达到 900°C 。实验全程维持腔体压力在 0.165 Torr,其中硫升华区采用纯氩气作为载气(120 sccm), MoO_3 蒸发区采用氩氧混合气($\text{Ar}:\text{O}_2=100:1$ sccm),其中氧气的微量引入可有效调节反应气氛的氧化还原势,促进 MoO_3 向 MoS_2 的反应过程,优化硫的化学活性。

通过多温区同步升温控制(各温区达到设定温度的时间偏差 <30 s),实现硫/钼前驱体蒸汽与衬底表面的动力学平衡。在 20 min 生长过程中,第一温区硫蒸汽经载气输运至衬底高温沉积区,气相 MoO_3 在输运过程中形成亚氧化钼中间体,最终在蓝宝石表面发生硫化反应生成 MoS_2 。如图 4(c)所示,相较于传统的蓝宝石退火再生长方式,这种 MoO_3 衬底修饰层辅助方法所制备出的 MoS_2 薄膜表面覆盖率更高,没有观察到孔洞存在。结合图 4(d)拉曼光谱表征(特征峰间距 $\approx 20\text{ cm}^{-1}$)证实获得了 2 英寸

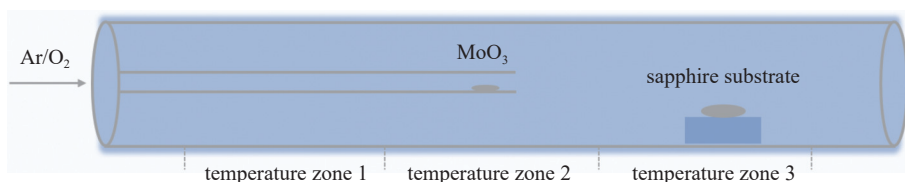


图3 蓝宝石衬底预处理示意图

Fig. 3 Schematic illustration of sapphire substrate pretreatment

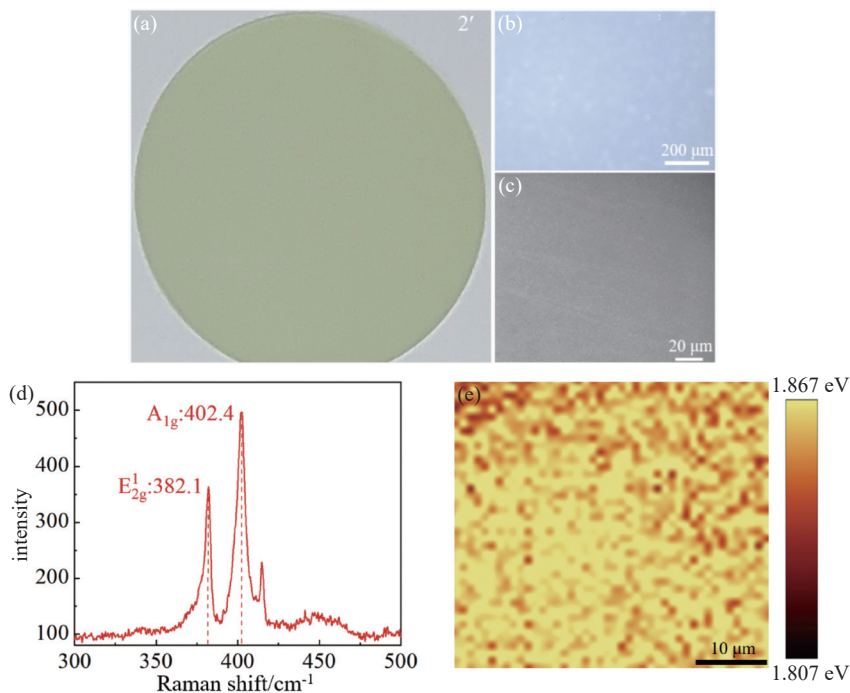


图4 衬底修饰层诱导生长法制备的 2 inch 单层 MoS_2 薄膜及其表征。(a)衬底修饰层诱导生长法制备的 2 inch 单层 MoS_2 薄膜宏观示意图, (b)衬底修饰层诱导生长法制备的 2 inch 单层 MoS_2 薄膜光学显微镜图, (c)衬底修饰层诱导生长法制备的 2 inch 单层 MoS_2 薄膜 SEM 图, (d) MoS_2 薄膜拉曼光谱图, (e)衬底修饰层诱导生长法制备的 2 inch 单层 MoS_2 薄膜 PL mapping 图

Fig. 4 2-inch monolayer MoS_2 films via substrate-modification-induced strategy and characterization. (a) Macroscopic schematic diagram of 2-inch monolayer MoS_2 thin films prepared by substrate modification layer-induced growth method, (b) optical microscope image of 2-inch monolayer MoS_2 thin films prepared by substrate modification layer-induced growth method, (c) scanning Electron Microscope image of 2-inch monolayer MoS_2 thin films prepared by substrate modification layer-induced growth method, (d) Raman spectrum of MoS_2 thin films, (e) Photoluminescence mapping image of 2-inch monolayer MoS_2 thin films prepared by substrate modification layer-induced growth method

单层 MoS_2 连续薄膜, 薄膜的 PL mapping 表征结果(图 4(e))表明薄膜具有较高的结晶质量, 均匀性和覆盖率。

2 结果及分析

2.1 实验机理

实验发现高温预处理过程中 MoO_3 与蓝宝石($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)衬底之间的界面相互作用是提升 MoS_2 薄膜均匀性和覆盖率的关键。XPS 表征结果显示, 预处

理后 $\text{Al}2p$ 结合能从未处理衬底的 74.3 eV(图 5(a))显著移至 75.9 eV, 表明铝原子的化学环境发生了改变。结合能升高可能源于 Al-O-Mo-O 键的形成, 导致基底 Al 原子局域电子密度降低。这种界面键合的形成能垒在高温和氧气环境中被有效克服, 使异质原子间的化学键合成为热力学主导过程。强界面键合增强了 MoO_3 反应源在蓝宝石表面的附着能力, 抑制了后续硫化过程中前驱体的脱附, 从而为均匀的硫置换反应提供了稳定的模板。预处理后

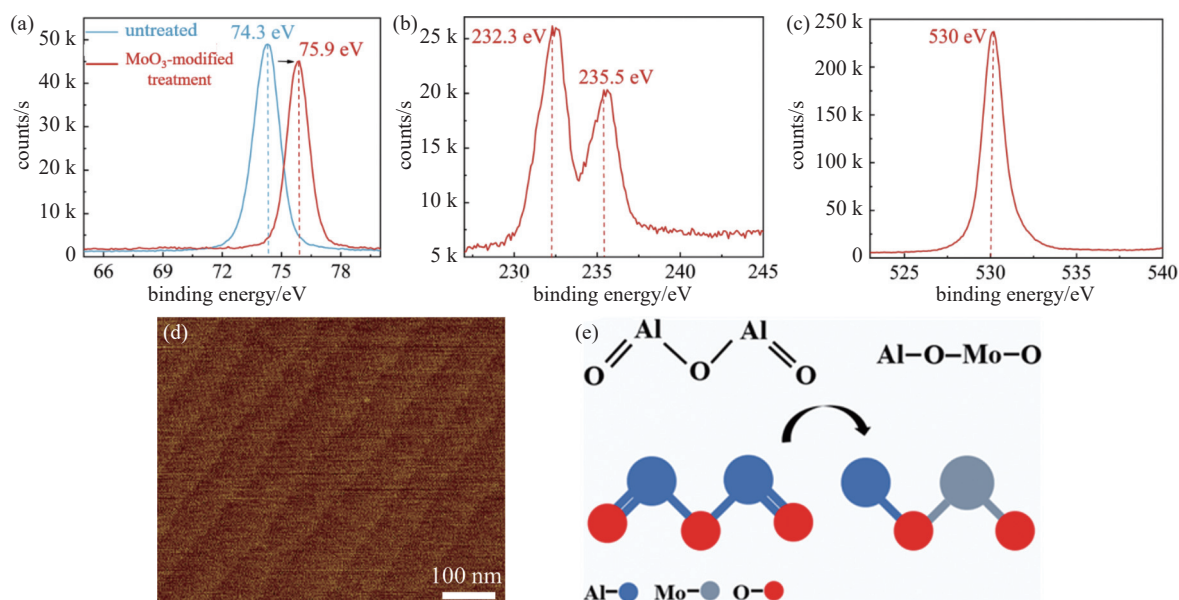


图5 蓝宝石衬底预处理诱导界面结构演变的表征与机理。(a)预处理前后蓝宝石衬底表面 $\text{Al}2p$ 轨道 XPS 分析谱线, (b)预处理后表面沉积层 $\text{Mo}3d$ 轨道 XPS 分析谱线, (c)预处理后表面沉积层 $\text{O}1s$ 轨道 XPS 分析谱线, (d)预处理后蓝宝石衬底表面 AFM 扫描图像, (e)处理后蓝宝石表面 Al 化学环境变化的原子结构示意图

Fig. 5 Characterization and mechanism of interface structure evolution enabled by sapphire substrate pretreatment. (a) XPS analysis spectra of $\text{Al}2p$ orbitals on sapphire substrate surfaces pre- and post-pretreatment, (b) XPS analysis spectra of $\text{Mo}3d$ orbitals in surface-deposited layers post-pretreatment, (c) XPS analysis spectra of $\text{O}1s$ orbitals in surface-deposited layers post-pretreatment, (d) AFM scanning image of sapphire substrate surface post-pretreatment, (e) Atomic structural schematic diagram illustrating chemical environment variations of Al on post-treated sapphire surfaces

衬底的 $\text{Mo}3d$ 谱(图 5(b))中, 232.3 eV 和 235.5 eV 的特征峰清晰对应 Mo^{6+} 的 $3d_{5/2}$ 和 $3d_{3/2}$ 轨道, 表明钼元素以高氧化态存在。更为关键的是 $\text{O}1s$ 谱(图 5(c))的分析结果: 在 530 eV 处出现的强特征峰, 表明氧原子主要处于晶格氧(M-O-M)环境中。结合 $\text{Al}2p$ 结合能显著正向位移至 75.9 eV(图 5(a)), 说明 530 eV 的 $\text{O}1s$ 主峰并非源于 MoO_3 自身的晶格氧, 从而证实了 Al-O-Mo 键合结构中桥氧的存在。此外 AFM 表征结果(图 5(d))表明, 相较于无处理的蓝宝石表面, 预处理后的蓝宝石表面形貌无明显变化, 且扫描显示表面没有杂质。这些特征表明 MoO_3 前驱体并非以物理吸附形式存在, 而是通过化学反应与蓝宝石表面的 Al 原子形成了原子级的 Al-O-Mo-O 键合界面(图 5(e))。相较于传统的蓝宝石退火后制备 MoS_2 薄膜的方法, 衬底表面的 Al-O-Mo-O 修饰层使得气相钼源 MoO_3 在硫化过程中更易被硫原子均匀取代, 形成均匀全覆盖的 MoS_2 薄膜。未修饰处理的蓝宝石衬底由于弱物理吸附则可能导致 MoO_3 分布不均, 硫化时产生孔洞和裂纹。综上, 高温预沉积策略通过构建 Al-O-Mo-O 界面优化

了反应前驱体-衬底界面相互作用, 为二维材料的高质量外延生长提供了新思路。

2.2 薄膜电学性能表征

在生长的蓝宝石衬底上直接构筑基于单层 MoS_2 的顶栅场效应晶体管(TG-FET), 其结构如图 6(a)所示, 采用原子层沉积 HfO_2 (12 nm)作为栅介质层, 电子束光刻制备 Au (20 nm)源漏电极。在室温大气环境下, 通过半导体参数分析仪(Keysight B1500A)测得器件电学转移特性曲线(图 6(b)), 转移特性曲线($V_{ds}=1$ V)显示器件开关比为 1.2×10^7 (图 6(b)), 优于已报道的蓝宝石直接构筑的顶栅器件($\sim 10^5$ – 10^6)。如图 6(a)为构筑的单层 MoS_2 薄膜顶栅晶体管阵列, 随机测试其中 48 个器件的电学性能(图 6(d)), 统计曲线可以看出该方法制备的薄膜具有较为均一的电学性能, 开关比相对标准偏差 <18%。

3 结论

本工作发展了一种衬底表面 Al-O-Mo-O 化学键合修饰层诱导生长高覆盖率 MoS_2 晶圆的方法, 解决了气相传输过程中反应源与蓝宝石衬底 Al-O

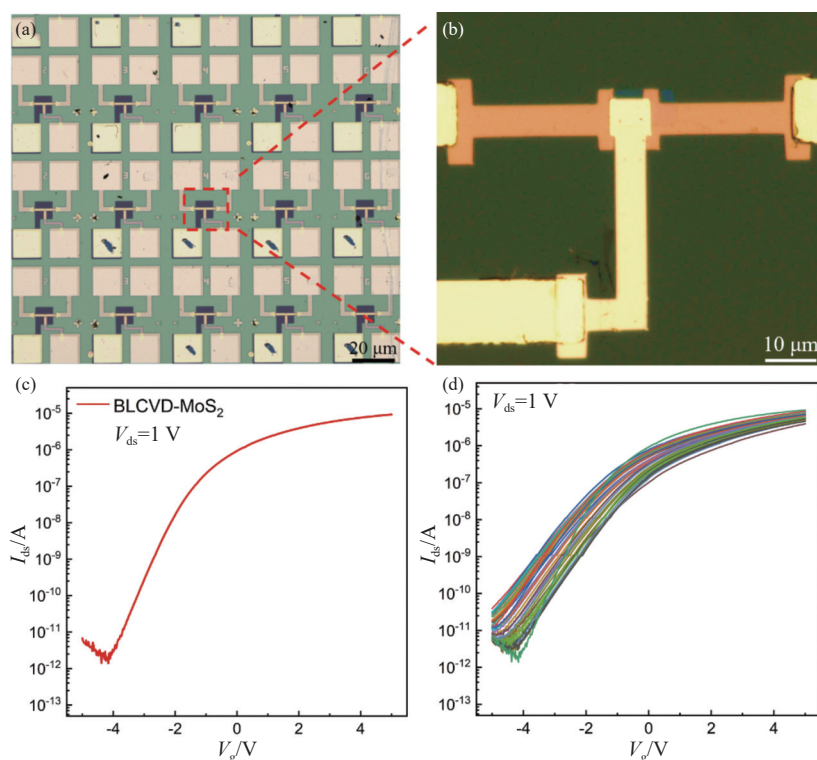


图6 MoS₂ 顶栅晶体管阵列电学性能表征。(a)单个 MoS₂ 顶栅晶体管结构光学显微镜图,(b)单个顶栅晶体管转移特性曲线,(c)MoS₂ 顶栅晶体管阵列光学显微镜图,(d)MoS₂ 顶栅晶体管阵列转移特性曲线

Fig. 6 Electrical performance characterization of MoS₂ top-gated transistor arrays. (a) Optical microscope image of individual MoS₂ top-gate transistor structure, (b) transfer characteristics curve of individual top-gate transistor, (c) optical microscope image of MoS₂ top-gate transistor array, (d) transfer characteristics curves of MoS₂ top-gate transistor array

界面弱吸附作用导致的厚度波动、覆盖率不理想等问题。通过在高温下控制稳定的 O₂ 和 MoO₃ 分压,预先在蓝宝石表面制备了 Al-O-Mo-O 化学键合修饰层,有效增强了源与衬底的吸附作用,促进了之后反应钼源的均匀沉积和硫化。制备出了全覆盖、高质量的单层 MoS₂ 薄膜,搭建了一批顶栅阵列器件,器件开关比最高达到 10⁷。晶体管阵列器件的电学测试结果表明该薄膜具有很好的均一性。因此,本研究为 CVD 制备 MoS₂ 薄膜覆盖率提供了新方法,有望进一步推动 MoS₂ 薄膜向实际应用迈进。

参 考 文 献

- [1] Jiang H, Zhang X K, Chen K L, et al. Two-dimensional Czochralski growth of single-crystal MoS₂[J]. *Nature Materials*, 2025, 24(2): 188–196
- [2] Gao L, Chen Z Y, Chen C, et al. Silicon-processes-compatible contact engineering for two-dimensional materials integrated circuits[J]. *Nano Research*, 2023, 16(11): 12471–12490
- [3] Liu A H, Zhang X W, Liu Z Y, et al. The roadmap of 2D materials and devices toward chips[J]. *Nano-Micro Letters*, 2024, 16(1): 119
- [4] Wang S Y, Liu X X, Xu M S, et al. Two-dimensional devices and integration towards the silicon lines[J]. *Nature Materials*, 2022, 21(11): 1225–1239
- [5] Liu Y H, Jiang H, Gao L, et al. Low carbon residue growth of wafer-scale MoS₂[J]. *Small*, 2025, 21(19): 2500980
- [6] Yu L X, Mi M J, Wang S L, et al. High carrier mobility in organic cations intercalated multilayer MoS₂[J]. *Applied Physics Letters*, 2024, 124(12): 122108
- [7] Li R S, Hong M Y, Shangguan W, et al. Controlled lattice deformation for high-mobility two-dimensional MoTe₂ growth[J]. *Journal of Materiomics*, 2025, 11(2): 100868
- [8] Zhang X K, Zhao H, Wei X F, et al. Two-dimensional transition metal dichalcogenides for post-silicon electronics[J]. *National Science Open*, 2023, 2(4): 20230015
- [9] Ji Q Q, Kan M, Zhang Y, et al. Unravelling orientation distribution and merging behavior of monolayer MoS₂ domains on sapphire[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(1): 198–205

- [10] Jin N, Yang Y Q, Luo X, et al. Development of CVD Ti-containing films[J]. *Progress in Materials Science*, 2013, 58(8): 1490–1533
- [11] Jung C, Kim S M, Moon H, et al. Highly crystalline CVD-grown multilayer MoSe₂ thin film transistor for fast photodetector[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15313
- [12] Li L, Wang Q Q, Wu F F, et al. Epitaxy of wafer-scale single-crystal MoS₂ monolayer via buffer layer control[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 1825
- [13] Pondick J V, Woods J M, Xing J, et al. Stepwise sulfurization from MoO₃ to MoS₂ via chemical vapor deposition[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2018, 1(10): 5655–5661
- [14] Španková M, Sojková M, Dobročka E, et al. Influence of precursor thin-film quality on the structural properties of large-area MoS₂ films grown by sulfurization of MoO₃ on c-sapphire[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 540: 148240
- [15] Yang P F, Zhang Z P, Sun M X, et al. Thickness tunable wedding-cake-like MoS₂ flakes for high-performance optoelectronics[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(3): 3649–3658
- [16] Shrestha S, Sarkar C K, Chakraborty A. Low-field electrical and thermal transport in lattice-mismatched *n*-GaN grown on sapphire: two-layer model calculations[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(1): 013705
- [17] Cuccureddu F, Murphy S, Shvets I V, et al. Surface morphology of *c*-plane sapphire (α -alumina) produced by high temperature anneal[J]. *Surface Science*, 2010, 604(15-16): 1294–1299
- [18] Xia Y, Chen X Y, Wei J C, et al. 12-inch growth of uniform MoS₂ monolayer for integrated circuit manufacture[J]. *Nature Materials*, 2023, 22(11): 1324–1331