论文

MoO₃改善接触的薄层MoS₂ N-型场效应管的电输运性质研究

颜世莉^{1*}, 谢志坚¹, 王磊¹, 陈剑豪^{1,2*}

1. 北京大学物理学院, 量子材料科学中心, 北京 100871;

2. 量子物质科学协同创新中心, 北京 100871

*联系人, 颜世莉, E-mail: yanshili@pku.edu.cn; 陈剑豪, E-mail: chenjianhao@pku.edu.cn

收稿日期: 2017-01-18; 接受日期: 2017-02-15; 网络出版日期: 2017-04-28

国家重点基础研究发展计划(编号: 2013CB921900, 2014CB920900)、国家自然科学基金委(编号: 11374021, 11327406)和海外高层次人才引进计划资助

摘要 本文利用三氧化钼(MoO₃)/金(Au)作为二硫化钼(MoS₂)场效应晶体管的电极, 得到了接触改善的N型二硫化钼场效应晶体管, 并对其输运性质进行了变温测量. 研究发现, 将氧化钼作为在二硫化钼与金属电极之间的过渡层, 可以很好地改善二硫化钼场效应器件的肖特基接触: 对于2 nm厚度的二硫化钼, 其室温迁移率可达25 cm² V⁻¹ s⁻¹, 与没有三氧化钼接触的器件相比, 室温迁移率提高了近16倍; 对于8 nm厚度的二硫化钼, 其低温迁移率最高可达100 cm² V⁻¹ s⁻¹. 优化后的电接触使得我们可以提取出二硫化钼器件本征的低温输运特性, 并发现缺陷杂质对载流子的散射是影响器件输运性质的主要原因; 其中在少层二硫化钼中, 缺陷杂质的散射作用随着载流子浓度的增加、屏蔽能力的增强而减少. 这种改善接触的方法同样适用于其他过渡金属硫族化合物.

关键词 场效应晶体管, 接触, 纳米材料电输运**PACS:** 85.30.Tv, 73.40.Ns, 73.63.-b

1 引言

自从2004年英国曼切斯特大学Novoselov和Geim等人^[1,2]通过机械剥离的方法制得了第一种广为人知的二维材料: 单原子层的石墨—石墨烯(graphene)后, 石墨烯的平面结构、双极性电场效应和极高的载流子迁移率等优秀性质得到了广泛的关注^[1-5]. 然而石墨烯的带隙为零, 基于石墨烯的场效应器件很难具有达到技术应用要求的开关比. 过渡金属硫族化合物是

另一类重要的二维材料; 其中最早受到关注的二硫化钼是一种半导体, 其带隙大小随层数的减少而增加. 因此, 基于二硫化钼的场效应管可能更加适应逻辑电路的需要^[6-8]. 除此之外, 二硫化钼较强的自旋轨道耦合和特殊的原子对称结构使其有着独特的物理性质^[9-12].

半导体金属接触的问题一直以来是半导体科技界一个非常重要的问题. 半导体性的过渡金属硫族化合物场效应管的半导体金属接触问题尤为突出. 较大

引用格式: 颜世莉, 谢志坚, 王磊, 等. MoO₃改善接触的薄层MoS₂ N-型场效应管的电输运性质研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 096801
Yan S L, Xie Z J, Wang L, et al. Transport properties of MoO₃ contacted few-layer MoS₂ N-type field-effect transistor (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 096801, doi: [10.1360/SSPMA2017-00016](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00016)

的接触肖特基结使人们很难在低温下得到器件本征迁移率、谷极化等电学性质^[13,14]. 人们使用不同功函数的金属电极来试图改善接触, 但是发现二硫化钼与金属接触时, 费米面的钉扎效应使得改变接触金属的作用很微弱^[15-18]. 用石墨烯做电极的办法在一定程度上改进了接触情况, 但是需要使用复杂的转移技术才能实现^[19,20], 不利于大规模的生产应用. 在样品和电极之间插入合适厚度的绝缘层可以获得不随温度变化的接触电阻, 然而总体接触电阻值还是很大. 因此, 需要研究费米面钉扎原因, 并寻找改善二硫化钼与金属电极接触的可靠方法, 使基于二硫化钼的场效应管适合应用并且便于推广.

2014年, 纳米快报上一篇文章报道用 MoO_3 作为金属电极与40 nm厚的 MoS_2 之间的接触层, 得到P型 MoS_2 场效应晶体管^[21]. 对于逻辑电路来说, N型与P型场效应管同等重要. 在此, 我们探索了 MoO_3 改善接触的薄层 MoS_2 -N型场效应晶体管的制备并进行了低温电输运性质研究.

2 器件制备

本文利用机械剥离的方法从天然二硫化钼矿石体材料中得到在300 nm SiO_2/Si 上的薄层二硫化钼晶体, 其厚度由光学显微镜下的颜色判断, 再由原子力显微镜测量精准厚度; 然后在样品上旋涂MMA和PMMA, 并在每次旋涂后分别用热板在150°C下烘烤10 min; 接着用电子束曝光的方法得到电极图形. 为了对比实验结果, 制备了两种类型的器件: 一种是热蒸镀的Ti/Au(钛/金)做金属电极的常规器件; 另一种是用热蒸镀的方法在真空度好于 3×10^{-6} Torr (1 Torr=133.322 Pa)的条件下以0.5 Å/s的速率蒸镀约10 nm的 MoO_3 , 然后以0.5 Å/s的速率蒸镀约60 nm的金电极. 两种器件的三维示意图如图1(a)所示.

3 电输运性质研究

首先, 测量了Ti/Au接触的常规 MoS_2 器件在室温下的电学性质. 图1(b)插图是器件的光学显微镜图, 其

图 1 (网络版彩图) (a) 器件的结构示意图; (b) 以钛金(Ti/Au)为电极的器件在室温下的转移特性曲线, 红色曲线代表电极1和电极2构成的器件, 蓝色曲线代表电极2和电极3. 由此图得到的两个器件的场效应迁移率均约 $2 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 插图是器件的光学显微镜图; (c), (d) 器件用原子力显微镜(AFM)测得的沟道二硫化钼的厚度图. 其中电极1和电极2之间的二硫化钼厚度为2 nm (约2-3层), 电极2和电极3之间的沟道二硫化钼厚度为5.5 nm (约8层)

Figure 1 (Color online) (a) Schematics of the devices with Ti/Au contacts and with MoO_3/Au contacts; (b) room temperature transfer curves of the devices with Ti/Au electrodes, the red curve represents the device between electrode 1 and electrode 2, and the blue curve represents device between electrode 2 and electrode 3, field-effect mobility extracted from the transfer curves of the two devices are both about $2 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, the inset is the optical image of the devices; (c) and (d) thickness of the MoS_2 channel measured by atomic force microscope (AFM). Thickness of the sample between electrode 1 and electrode 2 is 2 nm (~2-3 layers), and thickness of the sample between electrode 2 and electrode 3 is 5.5 nm (~8 layers).

中电极1和电极2间的二硫化钼由AFM测得厚度为2 nm (见图1(c)); 电极2和电极3之间的二硫化钼厚度为5.5 nm(见图1(d)). 由于单层二硫化钼晶体的厚度为0.65 nm, 且二硫化钼晶体与基底之间有一定的距离, 所以电极1和电极2之间的二硫化钼为2~3个原胞层; 电极2和电极3之间的二硫化钼为8个原胞层. 同时, 值得一提的是拉曼光谱对二硫化钼的层数的标度也有借鉴作用^[22]. 我们将此器件命名为 T_{xy} , $x, y=1, 2, 3$ 代表电极编号. 器件在常温下的转移特性曲线如图1(b)所示. 从转移特性曲线中可以看出这是一个N型掺杂的器件. 我们以设备在50~200 mV源漏偏压下, 测量电流 $I=0.1$ nA时为关态, 并定义器件在扫描底栅范围内最大电流为开态电流, 由此得到此器件开关比约 10^3 . 根据场效应迁移率的计算公式

$$\mu = \frac{dI_{ds}}{dV_{bg}} \left(\frac{L}{W} \times \frac{1}{C_i V_{ds}} \right), \quad (1)$$

其中, I_{ds} 是器件沟道的源漏电流, V_{ds} 是源漏电压, 此处为50 mV, V_{bg} 是器件的背栅电压, L 和 W 分别是器件沟道的长和宽. 对于器件 T_{12} , 其沟道长和宽分别为 (1.9 ± 0.1) 和 (4 ± 0.1) μm ; 对于器件 T_{23} , 其沟道长和宽分别为 (2.9 ± 0.1)

和 (4 ± 0.1) μm . C_i 是沟道与背栅之间单位面积的电容, 对于300 nm的 SiO_2 衬底, $C_i = 1.17 \times 10^{-8}$ F/ cm^2 . 计算得到 T_{12} 和 T_{23} 的场效应迁移率分别为 (1.7 ± 0.1) 和 (2.1 ± 0.1) $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$, 与其他实验组类似器件的测量结果一致^[23].

接下来, 研究了 MoO_3/Au 接触的二硫化钼场效应器件常温下的电学性质(结构示意图见图1(a)). 图2(a)和(c)的插图分别是不同层数的 MoS_2 器件的光学图, 其厚度分别为2和8 nm(见图2(b)和(d)), 在此分别命名为S1和S2. 器件S1的长和宽分别为 (16.8 ± 0.1) 和 (3.0 ± 0.1) μm ; 器件S2的长和宽分别为 (2.0 ± 0.1) 和 (10.0 ± 0.1) μm . 图2(a)和(c)分别是S1和S2两个器件在室温下的转移特性曲线. S1和S2的开关比均大于 10^3 , 场效应迁移率分别为 (25.0 ± 0.9) 和 (19.7 ± 0.3) $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$. 与 T_{12} 和 T_{23} 相比, S1和S2的电导率有数倍的提高, 迁移率更是显著提高. S1是目前 SiO_2 衬底上得到的双层或三层 MoS_2 场效应器件中室温迁移率最高的器件之一^[17]. 图2(a)和(c)还说明两个器件均为N型掺杂, 与文献[21]中的不同. 我们制备了若干薄层器件, 均为N-型掺杂, 这可能是因为我们在此使用的二硫化钼与文献[21]相比薄了许多. 这种更薄的二硫化钼对于自身缺陷、衬底影响、

图 2 (网络版彩图) (a)和(c)分别为器件S1和S2的室温转移特性曲线图. 从中可得器件S1和S2的开关比均大于 10^3 ; 场效应迁移率分别为 (25.0 ± 0.9) 和 (19.7 ± 0.3) $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$. 其插图为器件对应的光学显微镜图. (b)和(d)分别是器件S1和S2的二硫化钼由原子力显微镜(AFM)测得的厚度图, 其中S1厚度约2 nm(2~3层), S2厚度约8 nm(12层)

Figure 2 (Color online) (a) and (c) are the room temperature transfer curves of device S1 and device S2, respectively. The extracted on/off ratios are both larger than 10^3 ; the field effect mobility are (25.0 ± 0.9) and (19.7 ± 0.3) $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$, respectively; (b) and (d) are thickness of the MoS_2 channel of device S1 and device S2 measured by atomic force microscope (AFM), respectively. The thickness of S1 is 2 nm (2~3 layers), and the thickness of S2 is 8 nm (12 layers).

外部环境的影响等更加敏感,使费米面更容易在靠近导带的地方^[24,25].

将常温下是否有 MoO_3 中间层作接触的二硫化钼器件做对比(T_{12} (2 nm)与S1 (2 nm)对比, T_{23} (5.5 nm)与S2 (8 nm)对比). 其中, T_{12} 与S1的厚度完全相同, T_{23} (5.5 nm)与S2 (8 nm)的厚度稍有不同,但是非常接近;并且制备这4个样品的流程完全相同(除了 MoO_3 中间层). 然而,这4个样品的迁移率有较大的差别,分别是25.0, 19.7 $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ (有 MoO_3)和1.7, 2.1 $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ (无 MoO_3). 因此可以认为,以上常温的测量结果表明, MoO_3 确实对于金属电极与二硫化钼的接触有改善作用. 这可能是因为相比于金属电极的蒸镀, MoO_3 的插入避免了二硫化钼中的硫元素和电极金属成键,从而减少了界面态,改善了接触^[26].

为了确定 MoO_3 中间层对于金属二硫化钼接触的改善作用以及探究 MoS_2 场效应器件的本征输运性质,对器件S1和S2进行了降温测量. 图3(a)和(b)分别是器件S1 (2 nm)和器件S2 (8 nm)在不同温度下的转移特性曲线. 定义器件的开态电压是在器件的电导大于0.2 μS 电导时候的栅极电压. 两个器件的开态电压均随着

温度的降低呈增加趋势(见图3(c)和(d)), 这一般由两种原因导致: 温度降低时, (1) 由电子掺杂的浅层杂质激发到导带底部的电子数目减少; (2) 由肖特基势垒的电接触处热激发隧穿贡献的电子减少.

图4(a)和(d)分别是器件S1和S2在高栅极电压下 ($V_g=50 \text{ V}$), 不同温度下的输出特性曲线. S1的输出特性曲线在90 K以上呈线性关系, 11–90 K温度区间微弱地偏离线性, S2则在11–260 K均表现为线性. 通过固定源漏电压对电流与温度的拟合^[27], 发现两个器件的肖特基势垒都很小, 约为2–3 meV. 也就是说, 器件的接触良好, 接触电阻对测量结果的贡献可以忽略, 此时测量到的器件的电阻随温度的变化是样品的本征行为.

图4(b)和(e)分别是器件S1和S2在 $V_g=50 \text{ V}$ 下的电导率随着温度的变化. 可以看到S1电导率随温度的降低而降低, 而S2的电导率随着温度的降低先升高后降低, 转折温度约为180 K. S2高温段电导随温度降低而升高的行为, 是声子散射占主导作用的表现; 低温段电导随温度降低而降低的行为, 类似于S1(将在下文结合图5对这种行为进行深入的探讨).

图4(c)和(f)是S1和S2的迁移率随温度变化的测量

图3 (网络版彩图) (a)和(b)分别是器件S1和S2的变温转移特性曲线, 温度由300变到11 K; (c)和(d)分别是器件的开态电压 (V_{th})随温度的变化图

Figure 3 (Color online) (a) and (b) are the transfer curves of device S1 and device S2 at different temperatures from 300 to 11 K, respectively; (c) and (d) are the on-state voltages (V_{th}) of S1 and S2 plotted as a function of temperature, respectively.

图 4 (网络版彩图) (a)和(d)分别是器件S1和S2的变温输出特性曲线, 温度由300变到11 K; (b)和(e)分别是器件S1和S2在50 V栅压下电导率随温度变化关系; (c)和(f)分别是器件S1和S2的迁移率随温度变化关系

Figure 4 (Color online) (a) and (d) output curves of device S1 and device S2 at different temperatures, the temperature varies from 300 to 11 K; (b) and (e) conductivity as a function of temperature at $V_g=50$ V of device S1 and device S2, respectively; (c) and (f) mobility as a function of temperature of device S1 and device S2, respectively.

图 5 (网络版彩图) (a)和(b)分别是器件S1和S2的不同栅极电压下 $\sigma \times T^{0.8}$ 随 $T^{-1/3}$ 的变化关系图. 图中黑色虚线是在部分温度范围内根据Variable Range Hopping (VRH)输运模型拟合结果. 图(a)的插图是 $\ln \mu$ 随 $T^{-1/3}$ 的变化关系图; 图(b)的插图是VRH拟合参数 T_0 随栅极电压的变化关系图

Figure 5 (Color online) (a) and (b) plot $\sigma \times T^{0.8}$ as a function of $T^{-1/3}$ of device S1 and device S2, respectively. The black dash lines show the fitting results based on Variable Range Hopping (VRH) model. The inset of (a) plots $\ln \mu$ as a function of $T^{-1/3}$; the inset of (b) is the fitting parameter T_0 as a function of gate voltage.

结果. 迁移率数值由公式(1)从转移特性曲线中计算获得. 与电阻的数据趋势一致, 器件S1的迁移率在温度为260 K时达到最大值 $31 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, S2的迁移率在90 K时达到最大值 $100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. 温度低于极值时的

温度, S1和S2的迁移率随着温度的降低而降低. 在90 K以上, 器件S2的迁移率随温度的增加而减小. 通过拟合迁移率与温度的关系 $\mu \sim T^{-\gamma}$ (如图4(f)中虚线所示), 得到 γ 的大小为 (1.1 ± 0.1) . 这与文献中用石墨烯接触的

MoS₂器件的 γ 值0.66(单层)–1.74(多层)相符合^[19], 此时声子散射起主导作用.

进一步对器件在不同栅极电压下, 电导随温度变化进行表征(图5(a)和(b)). 发现器件的电导率随着温度的变化关系在一定的温度范围内符合Variable Range Hopping (VRH)输运模型(无序系统中载流子在局域态间的跃迁模型)

$$\sigma = \sigma_0(T) \exp \left(- \frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{d+1}}, \quad (2)$$

其中, $\sigma_0 = AT^{-m}$, m 取值0.8–1, 此处取0.8; T_0 和 A 作为拟合参数; d 为材料的维度, 对二维材料来说 $d=2$ ^[28].

从S1拟合结果中发现, 不同栅极电压(载流子浓度)下的拟合斜率变化不大, 可能由于测量的温度范围相对较小. 图5(a)的插图显示, 对于器件S1, $\ln \mu \propto T^{-1/3}$, 这是二维材料满足VRH输运模型的表现之一^[29].

图5(b)中S2电导随温度变化在一定温度区间内满足VRH模型. 这说明器件S2的输运性质主要受到局

域态电子的影响^[4,30]. 这种局域电子态可能是由于二硫化钼体材料本身的缺陷导致, 也可能来源于衬底中的陷阱杂质的散射^[6,24,31]. 从S2拟合的斜率中得到 T_0 和栅极电压的关系见图4(b)的插图. T_0 随栅极电压(载流子浓度)的增大而减小, 这是由于随着载流子浓度的增加, 器件屏蔽陷阱杂质的能力增强所致.

4 结论

综上测量结果表明, 利用MoO₃作为二硫化钼与金属电极接触之间的中间层的方法, 制备出接触良好的N型二硫化钼场效应器件. 这种方法对于三层和少层器件的电极接触界面都有明显的改善. 这种接触改善使少层二硫化钼器件在低温下迁移率可达 $100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. 接触改善之后, 进一步提升器件性能需要从减少样品晶体缺陷、减少衬底陷阱电荷对载流子的散射作用等方面着手, 从而得到接触良好的、高迁移率的接近应用需要的MoS₂场效应器件.

参考文献

- Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 2004, 306: 666–669
- 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
- Novoselov K S, Jiang Z, Zhang Y, et al. Room-temperature quantum Hall effect in graphene. *Science*, 2007, 315: 1379
- Chen J H, Jang C, Adam S, et al. Charged-impurity scattering in graphene. *Nat Phys*, 2008, 4: 377–381, arXiv: 0708.2408
- Chen J H, Jang C, Xiao S, et al. Intrinsic and extrinsic performance limits of graphene devices on SiO₂. *Nat Nanotech*, 2008, 3: 206–209
- Radisavljevic B, Radenovic A, Brivio J, et al. Single-layer MoS₂ transistors. *Nat Nanotech*, 2011, 6: 147–150
- Yoon Y, Ganapathi K, Salahuddin S. How good can monolayer MoS₂ transistors be? *Nano Lett*, 2011, 11: 3768–3773
- Radisavljevic B, Kis A. Mobility engineering and a metal-insulator transition in monolayer MoS₂. *Nat Mater*, 2013, 12: 815–820, arXiv: 1301.4947
- Yao W, Xiao D, Niu Q. Valley-dependent optoelectronics from inversion symmetry breaking. *Phys Rev B*, 2008, 77: 235406, arXiv: 0705.4683
- Xiao D, Liu G B, Feng W, et al. Coupled spin and valley physics in monolayers of MoS₂ and other group-VI dichalcogenides. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 196802, arXiv: 1112.3144
- Mak K F, McGill K L, Park J, et al. The valley Hall effect in MoS₂ transistors. *Science*, 2014, 344: 1489–1492, arXiv: 1403.5039
- Chu R L, Li X, Wu S, et al. Valley-splitting and valley-dependent inter-Landau-level optical transitions in monolayer MoS₂ quantum Hall systems. *Phys Rev B*, 2014, 90: 045427
- Fang H, Chuang S, Chang T C, et al. High-performance single layered WSe₂ p-FETs with chemically doped contacts. *Nano Lett*, 2012, 12: 3788–3792
- Liu W, Kang J, Sarkar D, et al. Role of metal contacts in designing high-performance monolayer n-type WSe₂ field effect transistors. *Nano Lett*, 2013, 13: 1983–1990
- Das S, Chen H Y, Penumatcha A V, et al. High performance multilayer MoS₂ transistors with scandium contacts. *Nano Lett*, 2013, 13: 100–105
- English C D, Shine G, Dorgan V E, et al. Improving contact resistance in MoS₂ field effect transistors. In: Proceedings of the 72nd Annual Device Research Conference. Santa Barbara: IEEE, 2014
- Kang J, Liu W, Banerjee K. High-performance MoS₂ transistors with low-resistance molybdenum contacts. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 093106

- 18 Neal A T, Liu H, Gu J, et al. Metal contacts to MoS₂: A two-dimensional semiconductor. In: Proceedings of the Device Research Conference. Pennsylvania: IEEE, 2012
- 19 Liu Y, Wu H, Cheng H C, et al. Toward barrier free contact to molybdenum disulfide using graphene electrodes. *Nano Lett*, 2015, 15: 3030–3034, arXiv: [1412.7718](#)
- 20 Du H, Kim T, Shin S, et al. Schottky barrier contrasts in single and bi-layer graphene contacts for MoS₂ field-effect transistors. *Appl Phys Lett*, 2015, 107: 233106
- 21 Chuang S, Battaglia C, Azcatl A, et al. MoS₂P-type transistors and diodes enabled by high work function MoO_x contacts. *Nano Lett*, 2014, 14: 1337–1342
- 22 Zhang X, Han W P, Wu J B, et al. Raman spectroscopy of shear and layer breathing modes in multilayer MoS₂. *Phys Rev B*, 2013, 87: 115413, arXiv: [1212.6796](#)
- 23 Novoselov K S, Jiang D, Schedin F, et al. Two-dimensional atomic crystals. *Proc Natl Acad Sci*, 2005, 102: 10451–10453
- 24 McDonnell S, Addou R, Buie C, et al. Defect-dominated doping and contact resistance in MoS₂. *ACS Nano*, 2014, 8: 2880–2888
- 25 Bao W, Cai X, Kim D, et al. High mobility ambipolar MoS₂ field-effect transistors: Substrate and dielectric effects. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 042104, arXiv: [1212.6292](#)
- 26 Gong C, Colombo L, Wallace R M, et al. The unusual mechanism of partial fermi level pinning at metal-MoS₂ interfaces. *Nano Lett*, 2014, 14: 1714–1720
- 27 Chen J R, Odenthal P M, Swartz A G, et al. Control of schottky barriers in single layer MoS₂ transistors with ferromagnetic contacts. *Nano Lett*, 2013, 13: 3106–3110
- 28 Van Keuls F W, Hu X L, Jiang H W, et al. Screening of the Coulomb interaction in two-dimensional variable-range hopping. *Phys Rev B*, 1997, 56: 1161–1169
- 29 Paasch G, Lindner T, Scheinert S. Variable range hopping as possible origin of a universal relation between conductivity and mobility in disordered organic semiconductors. *Synth Met*, 2002, 132: 97–104
- 30 Ghatak S, Pal A N, Ghosh A. Nature of electronic states in atomically thin MoS₂ field-effect transistors. *ACS Nano*, 2011, 5: 7707–7712
- 31 Zhou W, Zou X, Najmaei S, et al. Intrinsic structural defects in monolayer molybdenum disulfide. *Nano Lett*, 2013, 13: 2615–2622

Transport properties of MoO₃ contacted few-layer MoS₂ N-type field-effect transistor

YAN ShiLi^{1*}, XIE ZhiJian¹, WANG Lei¹ & CHEN JianHao^{1,2*}

¹ International Center for Quantum Materials, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

² Collaborative Innovation Center of Quantum Matter, Beijing 100871, China

Molybdenum disulfide (MoS₂), a member of the transition-metal dichalcogenides (TMDs) family, is a semiconducting layered material consisting of two atomic layers of S atoms and Mo atoms. Comparing with semimetal graphene, its relatively large band gap makes MoS₂ more suitable for applications in logic circuit. Besides, strong spin orbit coupling and special symmetric structure give MoS₂ many intriguing physical and chemical properties. However, contacts between metals and MoS₂ remain a critical issue which hinders not only the investigation of the intrinsic properties of MoS₂ but also its applications. Therefore, it is urgent to find the technique that can improve the contact condition between metal and MoS₂. In this work, using MoO₃/Au as the electrode of MoS₂ based field effect transistors (FETs), we obtained N-type MoS₂ FETs with improved contact conditions. The transport properties of these devices at different temperatures is also investigated. We demonstrated that the Schottky contact of the MoS₂ FETs can be well improved by the interlayer MoO₃ between MoS₂ and metal electrodes: for device with 2 nm thick channel MoS₂, the room temperature mobility can be as high as 25 cm² V⁻¹ s⁻¹, 16 times higher than device without MoO₃ contact; for device with 8 nm thick channel MoS₂, the highest value of the low temperature mobility is as high as 100 cm² V⁻¹ s⁻¹. Therefore, we extracted the intrinsic low temperature property of MoS₂ FETs: the transport property of few layer MoS₂ devices is dominated by the scattering of charge carriers from defect or charge traps; such scattering is weakened as the carrier density increases and screening is improved. The technique demonstrated in this work can also be applied to other TMDs field effect devices.

field effect devices, metal-nonmetal contacts, electronic transport in nanoscale materials and structures

PACS: 85.30.Tv, 73.40.Ns, 73.63.-b

doi: [10.1360/SSPMA2017-00016](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00016)