表面工程化多层 MoS_2场效应晶体管中的耗尽型至增强型模式转变与滞后显著抑制

Samiksha Bhatia[1], Ramesh Singh Bisht [1,]和 Pramod Kumar[1, *]印度孟买理工学院物理系，印度孟买 400076

*通讯作者：pramod_k@iitb.ac.in

摘要：二硫化钼（MoS_2）等二维半导体因有望与硅基电子器件兼容，近来受到广泛关注。然而，若干关键挑战仍限制着它们的实际集成。其中两个关键问题是：(1) MoS_2 场效应晶体管（FETs）固有的耗尽型（常开型）工作模式；(2) 由于硫缺陷的存在，MoS_2 场效应晶体管的转移特性中普遍出现较大的滞后。解决这些问题对于实现兼容 CMOS 的二维晶体管技术至关重要。在本研究中，我们首次报告：采用 PBTTT-C14（聚(2,5-双(3-十四烷基噻吩-2-基)噻吩并[3,2-b]噻吩)）这一 p 型共轭有机聚合物对剥离得到的多层 MoS_2 场效应晶体管进行表面改性，可使器件由耗尽型转变为增强型工作模式，同时显著抑制滞后。具体而言，阈值电压（V_{th}）从 −9.6 V 移至 +5.9 V（总偏移量为 ~15.5 V），滞后窗口则从 8.8 V 减小至 1.3 V（降低 ~85%）。这一现象源于 MoS_2/PBTTT-C14 界面处的界面电荷转移，而有利的能带排列促成了这一过程。此外，MoS_2 中的施主型硫空位态参与了向 p 型 PBTTT-C14 层的界面电荷转移，从而有效钝化这些与自由电荷载流子产生及滞后相关的施主态。重要的是，这凸显了界面电子相互作用的作用。为进一步验证这一电荷转移驱动机制，我们采用了能级与 PBTTT-C14 相近的 P3HT（聚(3-己基噻吩-2,5-二基)），其同样表现出类似的增强型行为和滞后抑制。相比之下，采用能带排列不够有利、因而限制界面电荷转移的 n 型聚合物（N2200）（聚{[N,N′-双(2-辛基十二烷基)-萘-1,4,5,8-双（二羧酰亚胺）-2,6-二基]-交替-5,5′-(2,2′-联噻吩)}）处理后，V_{th} 仅从 −13.8 V 移至 −8.3 V（总偏移量为 ~5.5 V），且未诱发增强型

工作模式；滞后则从 11.2 V 减小至 5.6 V（~50%）。此外，采用宽带隙绝缘聚合物聚二甲基硅氧烷（PDMS）处理后，Vth 和滞后均未见明显变化，这支持了所观察到的效应主要源于电荷转移。总体而言，本研究确立了聚合物能级排列、界面电荷转移与器件性能之间的明确关联。研究结果表明，能级合适的 p 型有机聚合物可同时实现 MoS_2 场效应晶体管的增强型工作模式和强滞后抑制，为高性能二维电子学提供了一种可扩展且兼容 CMOS 的策略。

关键词：MoS_2 场效应晶体管、增强型晶体管、滞后抑制、阈值电压工程、有机-无机半导体界面、界面电荷转移。

引言

正如摩尔定律所预测的，集成芯片上的晶体管数量大约每两年翻一番，推动着器件尺寸不断微缩[1]。硅技术已达到低于 5 nm 的制程节点，但进一步微缩面临短沟道效应、漏电流和可靠性问题等根本性限制[2]。因此，寻找能够在硅时代之后延续摩尔定律的替代材料，已成为当务之急[3]。自石墨烯被发现以来2004[4],，二维材料已成为下一代电子学的有前景候选材料。尽管石墨烯具有卓越的载流子迁移率（高达 5000 $cm^2 V^{-1} s^{-1}$），但其零带隙导致开关比极低（~10^2），因此不适用于逻辑电路应用[5,6]。另一方面，过渡金属二硫属化物（TMDs）具有可调带隙、高开关比、优异的迁移率、机械柔性和化学稳定性，同时具备显著的光与物质相互作用特性，并兼容柔性电子[7–9]。其中，二硫化钼（MoS_2）凭借其天然丰度、环境稳定性和优良的电子性质，十多年来一直受到最广泛的研究[10–12]。目前，研究人员正积极推动实现与 CMOS 兼容的 MoS_2基电子器件。然而，仍有若干挑战亟待解决，例如实现大面积均匀生长[13,14], 、开发合适的接触电极和介电材料[15,16], 、精确控制阈值电压（V_{th}）[17,] 、实现增强型（E模式）工作[18], 、抑制滞后[19],、开发能够最大限度减少界面陷阱的有效钝化层[20]， ， 以及实施 p型掺杂策略[21]。在这些挑战中，本研究重点解决其中最关键的两项：实现 E模式工作和抑制滞后。这两项是

实现低功耗、高可靠性逻辑器件的关键前提。由于本征 n 型掺杂[22], , MoS_2 场效应晶体管通常以耗尽型（D模式）工作，导致阈值电压为负$_{th}$。这种常开型特性不利于逻辑电路，因为关闭器件需要额外施加栅极偏压，从而增加静态功耗。此外，MoS_2 基场效应晶体管中通常会观察到较大的滞后[23]。滞后是栅极电压正向和反向扫描之间的差异，源于与表面吸附物、界面及沟道内部缺陷相关的电荷俘获/去俘获过程[24–26]，这会导致电学性能不稳定并引发可靠性问题。在传统硅基晶体管技术中，阈值电压$_{th}$调制可通过离子注入轻松实现。然而，对于 MoS_2,等二维材料，由于其原子级薄的二维特性，无法采用这种掺杂方式[21]。因此，近期研究探索了其他途径，以利用多种技术实现增强型工作。例如，Wang 等人通过栅极金属功函数工程实现了增强型 MoS_2 场效应晶体管[27]；Yoo 等人采用含氟栅介质（CYTOP）实现了增强型工作[28]；Leong 等人通过硫和氢表面处理实现了阈值电压的双向调控[29]；Kang 等人采用 NH_3 等离子体处理实现了阈值电压调节[30]；Roh 等人通过十八烷基三氯硅烷（OTS）自组装单分子层（SAM）改性实现了增强型工作[31]；Rai 等人通过氩等离子体处理后进行 O_2 处理，实现了增强型特性[18]；Li 等人则报告了采用不同有机溶剂进行表面改性来调制阈值电压$_{th}$ [32]。因此，表面工程已成为调节二维材料阈值电压$_{th}$ 最有前景的方法，因为它能够精确调制沟道电势，同时不引入散射中心，也不损害晶格完整性。然而，这一领域仍在积极发展中，且存在若干重大挑战。在大多数研究中，阈值电压$_{th}$ 的总偏移仅为几伏，而文献中大多数未经处理的 MoS_2 场效应晶体管通常具有高度负向的阈值电压$_{th}$，因此实现较大的正向阈值电压偏移$_{th}$ 至关重要。此外，在上述研究中，一项关键可靠性指标——处理后的滞后行为——尚未得到探讨；而且，长期运行时阈值电压$_{th}$ 的时间稳定性也尚未研究。与此同时，研究人员也在积极探索降低 MoS_2 场效应晶体管滞后的方法。例如，Haa 等人证明，使用 APTES钝化层可使滞后降低 ~53%，但阈值电压$_{th}$ 没有显著变化，因此器件仍处于耗尽型工作状态[33]；Liu 等人证明，O_2 等离子体处理后再采用 Al_2O_3 钝化层，可使滞后降低近 94%，而阈值电压$_{th}$[34]没有显著变化；Kang 等人报告称，采用 $CsPbBr_3$ 纳米簇[35]可使滞后降低 ~27%，同时阈值电压向负向偏移；Jana 等人。

采用疏水性有机硅烷 HMDS 处理，实现了 96% 的滞后减小；尽管阈值电压略微向正方向偏移，但仍显著为负，使器件保持耗尽型[36]。总的来说，这些研究凸显了以下关键空白：(1) 实现幅度大、为正且稳定的阈值电压偏移（足以完成耗尽型到增强型的转换）；(2) 同时解决滞后问题，或理想情况下将其降至最低，以确保器件性能可靠。在此背景下，有机聚合物提供了一种极具吸引力的替代方案。由于不存在悬挂键和天然表面氧化物，它们主要通过范德华力与二维材料相互作用，形成温和且无损的界面，不会引入额外的陷阱态，并能保持 MoS_2[37–40]的结构完整性。其能级可调，且能够引入多种官能团，从而实现精确的界面电荷转移调控，并可控地调节阈值电压$_{th}$[41–43]。此外，其机械柔性使其非常适用于表面工程，并可集成到下一代柔性电子器件中[44]。在此，我们首次证明，采用 PBTTT-C14（聚(2,5-双(3-十四烷基噻吩-2-基)噻吩并[3,2-b]噻吩)）这一 p 型共轭疏水聚合物，可使多层 MoS_2 场效应晶体管实现增强型工作，将阈值电压（V_{th}）从较大的负值（–9.6 V）移向正值（+5.9 V）（总偏移量为 ~15.5 V），有效地使器件从耗尽型转变为增强型工作，同时将滞后从 8.8 V 显著抑制至 1.3 V（~ 85 %）。这种调控源于有利能带排列所导致的界面电荷转移；PBTTT-C14 从 MoS_2, 中抽取电子，降低其费米能级，从而使阈值电压$_{th}$正向偏移。另一种 p 型聚合物 P3HT（聚(3-己基噻吩-2,5-二基)）的能级与 PBTTT-C14 相近，也产生了类似结果。相比之下，涂覆 n 型聚合物 N2200（Poly{[N,N′-双(2-辛基十二烷基)-萘-1,4,5,8-双(二羧酰亚胺)-2,6-二基]-交替-5,5′-(2,2′-联噻吩)）后，由于能级排列不利、电荷转移极少，阈值电压$_{th}$ 偏移较小（~ 5.5 V），未能实现增强型转换，滞后也仅中等程度减小（~50 %）。此外，绝缘聚合物 PDMS（聚甲基硅氧烷）构成的环境钝化层未显示出可观测的阈值电压$_{th}$ 或滞后偏移，证实了仅通过钝化隔绝环境气体并不能带来改善。这些对照实验表明，阈值电压$_{th}$ 显著偏移并抑制滞后，需要显著的界面电子相互作用和电荷转移；仅有电子惰性覆盖层和钝化无法显著调控阈值电压$_{th}$ 和滞后。因此，PBTTT-C14 和 P3HT 等与 MoS_2,能级排列有利的聚合物，可作为有效的界面层，同时调控这两个参数。

此外，对阈值电压$_{th}$进行超过 10 天的时间稳定性监测，以及多个器件（~10 个样品）中观察到的一致趋势，证实了该方法的再现性和可靠性。因此，本研究确立了一种稳健策略，通过单步、低损伤工艺，实现大幅且稳定的阈值电压（V_{th}）调控，同时强效抑制滞后。这种对界面性质的有效调控，为可调、低功耗且可靠的二维半导体晶体管铺平了道路，并有望应用于未来的 CMOS 逻辑、柔性电子和神经形态系统。

实验

多层 MoS_2 薄片通过胶带和聚二甲基硅氧烷（PDMS）印章，从块体 MoS_2 晶体（购自英国 Solpro商务园区的 Ossila）上机械剥离下来，并转移至带有 200 nm 热生长 SiO_2的硅衬底上。采用光刻和溅射技术制备背栅场效应晶体管，其中高掺杂 p型硅用作背栅，并沉积镍/金（30/100 nm）接触电极作为源极和漏极电极。有机聚合物粉末（PBTTT-C14、P3HT 和 N2200；购自 Sigma-Aldrich公司）通过将每种粉末 5 mg 加入 1 mL 氯苯中溶解，随后以 400 rpm 磁力搅拌 1.5 h，制得均匀溶液。采用两步法将聚合物溶液旋涂至器件上（先以 250 rpm 涂覆 10 s，再以 1000 rpm 涂覆 30 s），随后在 150 °C 下热退火 1 h，以促进黏附并去除残留溶剂。进行电学测量前，使用氯苯轻柔地去除探针接触区域的聚合物层。制备聚二甲基硅氧烷薄膜时，将聚二甲基硅氧烷凝胶与固化剂按 10:1 的比例混合，随后滴涂至器件上，并在 150 °C 下热退火 1 h，以确保薄膜稳定。使用原子力显微镜（AFM；Oxford Instruments Asylum Research，MFP-3D BIO，美国）测量 MoS_2 薄片及所得聚合物层的厚度。使用 Olympus MX61-F 显微镜获取光学图像。使用 Polaris B1500安捷伦半导体参数分析系统，在室温环境条件下进行电学表征。

结果与讨论：

首先制备背栅多层 MoS_2 场效应晶体管并进行电学表征，以确定原始器件的参考特性。随后，按照实验部分所述流程，将一层薄的 PBTTT-C14（p 型共轭聚合物，poly[2,5-bis(3-tetradecylthiophen-2-yl)thieno[3,2-b]thiophene]）旋涂至 MoS_2 沟道上。PBTTT-C14 涂覆过程的示意图见图 1(a 至 c)。PBTTT-C14 的化学结构和所制备器件的光学图像分别见图 1(d) 和图 1(e)。

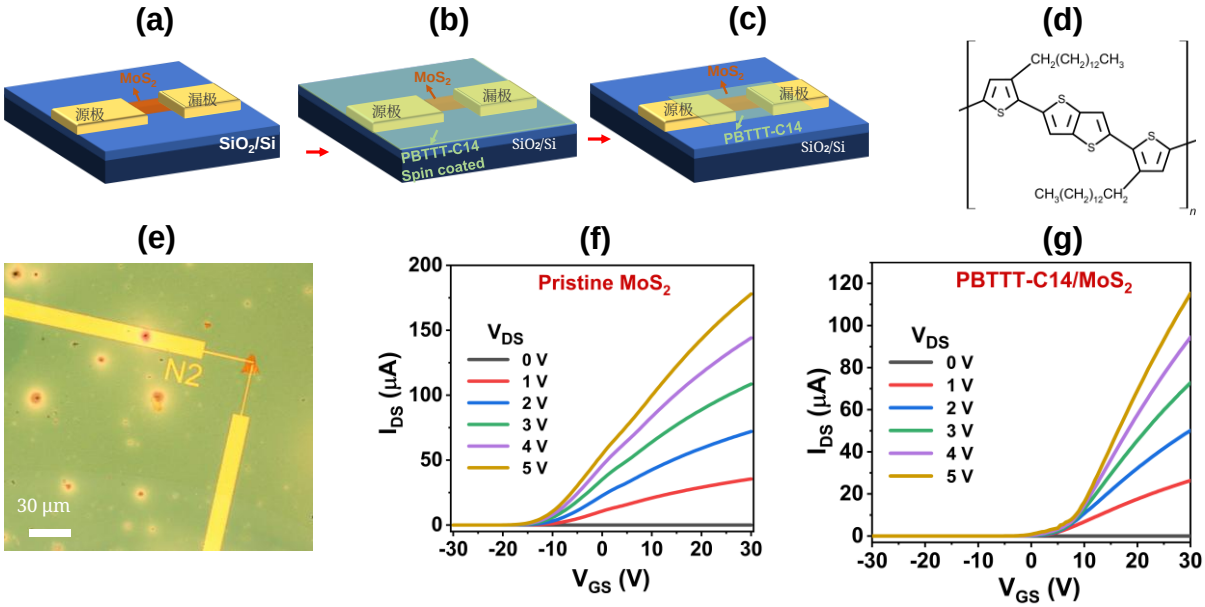

图 1. (a) Si/SiO_2 衬底上原始背栅多层 MoS_2 场效应晶体管（FET）的示意图；(b) 旋涂于器件上的 PBTTT-C14 聚合物；(c) 使用氯苯去除接触区域中的 PBTTT-C14，以进行电学测量。(d) PBTTT-C14 的化学结构；(e) 制备器件的光学图像；(f) 原始 MoS_2 FET 的转移特性，显示其具有耗尽型（D-mode）工作模式的 n 型导电（$V_{th} \approx -9.6$ V，$V_{DS} = 2$ V 时）。(g) 涂覆 PBTTT-C14 的 MoS_2 FET 的转移特性，保持 n 型导电，并出现显著的正向 V_{th} 偏移（$V_{th} \approx +5.9$ V，$V_{DS} = 2$ V 时），从而实现增强型工作模式（E-mode）。

PBTTT-C14涂层前后多层 MoS_2 FET 的转移特性分别如图 1(f) 和图 1(g) 所示。两种情况下，器件均表现出典型的 n 型导电，说明 PBTTT-C14 覆盖层不会改变 MoS_2，的多数载流子类型，且沟道仍以电子传输为主。最显著的

变化是阈值电压（V_{th}）明显正向偏移。为量化这一偏移，我们采用成熟的线性区外推（ELR）法[46], 提取 V_{th}，具体做法是从跨导（g_m）最大处进行线性外推。原始器件的 V_{th} 为 −9.6 V（在漏极偏压 V_{DS} = 2 V 下提取），表明器件工作于耗尽型（D-mode）。PBTTT-C14 涂层后，V_{th} 移至 +5.9 V，使器件转变为增强型（E-mode）工作。此处实现了约 +15.5 V 的总正向 V_{th} 偏移，主要由 PBTTT-C14 覆盖层与 MoS_2 沟道之间的界面电荷转移所驱动。其详细机制，包括聚合物能级对齐的作用及其对 MoS_2, 中自由电子密度的影响，将在后续章节讨论。接下来，为验证这种调制的可靠性和重复性，我们进行了三项关键检查。首先，为排除短期瞬态效应，在环境条件下对一台 PBTTT-C14涂层器件进行了 13 天监测，并定期测量其转移特性。如图 2(a) 所示，未观察到明显反转，证实该偏移稳定存在，并非暂时的静电效应。其次，在旋涂 PBTTT-C14 过程中，器件在 150 °C 下退火一小时（如实验部分所述）。为验证观察到的 V_{th} 偏移是否部分由退火造成，我们在相同条件下对一台未涂覆 PBTTT-C14 的 MoS_2 FET 进行了退火。结果未观察到转移特性的明显偏移，如图 2(b) 所示，证实正向 V_{th} 偏移完全源自 PBTTT-C14 层。第三，为检查再现性，我们在另外十台器件上进行了相同实验；如图 2(c) 所示，这些器件均表现出一致的大幅 V_{th} 偏移，并由耗尽型转变为 E模式。请注意，确切的 V_{th} 值因 MoS_2 层数不同而在各器件间有所差异。

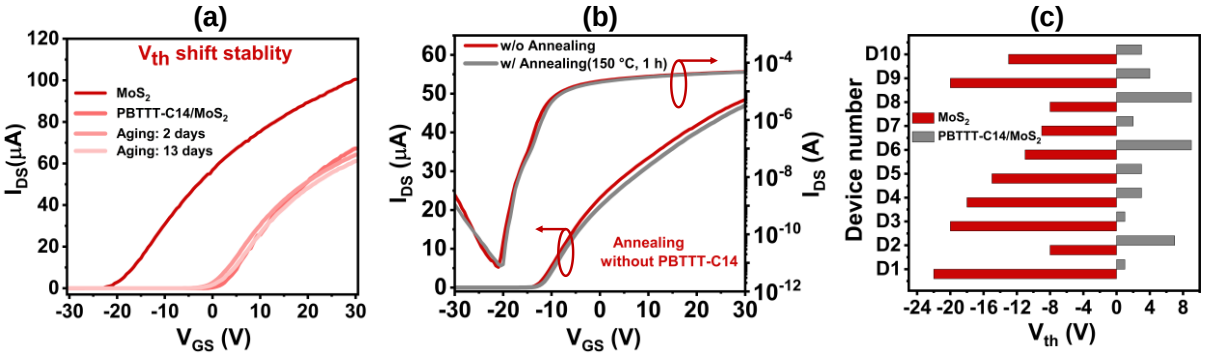

图 2. (a) 在环境条件下（V_{DS} = 2 V）监测 PBTTT-C14 涂覆的 MoS_2 FET 中正向 V_{th} 偏移的稳定性，持续 13 天；(b) 未使用 PBTTT-C14、在 150 °C 下退火 1 h 的对照 MoS_2 FET 的转移特性（V_{DS} = 2 V），未观察到显著的 V_{th} 偏移，表明单独退火不会引起偏移；(c) 十个器件中 V_{th} 偏移的再现性（V_{DS} = 2 V）。

确认 V_{th} 偏移的重复性和稳定性后，我们接下来分析器件的迁移率。迁移率（μ）根据以下关系确定：$\mu = g_m \frac{L}{WC_{ox}V_d}$；其中，L = 3 μm 和 W = 3 μm 分别为沟道长度和宽度，C_{ox} =1.73×10^{-8} Fcm^{-2} 为单位面积栅电容，计算公式为 $C_{ox} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{d_{ox}}$，其中 ε_0 = 8.85×10^{-12} Fm^{-1}, ε_r =3.9（对于 SiO_2），且 d_{ox} = 200 nm。跨导 $g_m = \frac{dI_{DS}}{dV_{GS}}$ 通过转移特性（I_{DS} 与 V_{GS}的关系）曲线的斜率提取，并使用 g_m 的最大值计算迁移率。PBTTT-C14 涂覆后，迁移率几乎没有变化：原始器件为 μ ≈ 54 cm2/V·s，修饰后为 μ ≈ 52 cm2/V·s，这表明 PBTTT-C14 层不会引入显著的散射中心。

此外，我们观察到，处理后器件的关态电流（I_{off}）相较于原始器件有所增加。为探究这一现象，我们对 PBTTT-C14 层进行了多次旋涂。如图3(a)所示，随着涂覆次数增加，I_{off}逐渐降低，这表明较薄的 PBTTT-C14 层可能会留下微观间隙，从而形成不必要的漏电路径。其次，由于当前工艺中聚合物也覆盖了接触电极，因此可通过增加一道光刻步骤，仅在沟道上对 PBTTT-C14 层进行图形化，进一步轻松降低残余 I_{off} 。然而，受制备限制，这些额外的优化步骤未能在本研究中实施。

接下来，我们评估器件迟滞。迟滞是指漏极电流（I_{DS}）对栅极电压（V_{GS}）变化历史的依赖性，导致正向扫描和反向扫描时出现不同的 I_{DS} 与 V_{GS} 变化轨迹[23]。抑制迟滞对于确保器件可靠运行至关重要。如图3(b)所示，涂覆 PBTTT-C14 后，迟滞显著受到抑制。定量而言，迟滞是通过对数坐标转移曲线中正向扫描和反向扫描在相同 I_{DS}处的 V_{GS} 最大差值计算得出的。原始器件的最大迟滞为 8.8 V，而涂覆 PBTTT-C14 后，PBTTT-C14/MoS_2 场效应晶体管的最大迟滞降至 1.3 V，相当于降低了 ~ 85 %。MoS_2 场效应晶体管中的迟滞通常源于电荷俘获/去俘获过程，这些过程与表面吸附物有关；吸附物可与缺陷位点、界面陷阱及沟道内的缺陷结合[24–26]。MoS_2 中的本征硫空位会引入类施主缺陷态[22] ，这些缺陷态充当电荷陷阱和环境物种的优先吸附位点[47], ，从而显著扰动沟道静电特性。此类缺陷已被认定为 MoS_2 场效应晶体管迟滞的关键成因[45]。涂覆 PBTTT-C14 后迟滞显著降低，可由以下原因解释。首先，聚合物与 MoS_2[37], 形成范德华界面，构成洁净界面，既不会引入额外陷阱态，也不会扰动沟道静电特性。当能级匹配有利时，这种界面能够实现高效的界面电荷转移。由于 p型 PBTTT-C14 与 n型 MoS_2, 之间的能级匹配有利，MoS_2 中的电子会大量转移至聚合物，其中包括与类施主硫空位相关的电子[48], ，从而有效使这些缺陷发生电学失活。Park等人[49] 证明，范德华有机物/MoS_2 界面处的电荷转移掺杂会使硫空位缺陷态发生电学失活，这与我们观察到的滞后抑制现象一致。这凸显了 PBTTT-C14 在实现 E模式工作及获得高度稳定器件特性方面的有效性。

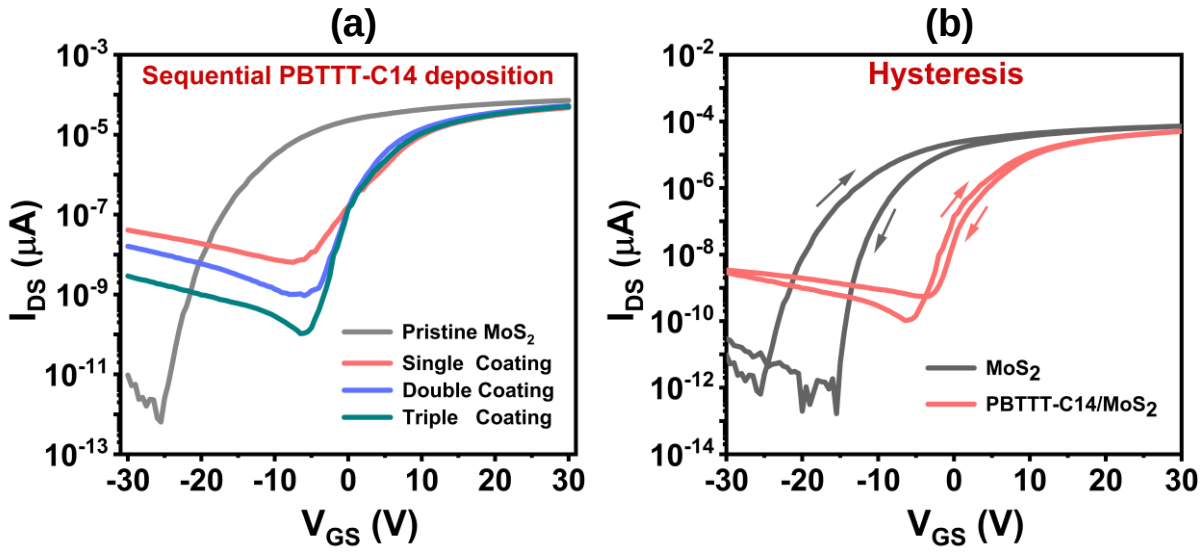

图3。（a）关态电流（I_{off}）随 PBTTT-C14 层厚度的变化，表明增加聚合物厚度会降低 I_{off}；（b）涂覆 PBTTT-C14 前后的转移特性滞后，显示表面处理后滞后大幅减小（~ 85 %）。

为进一步阐明电荷转移和费米能级对齐的作用，我们接下来研究了另外两种有机聚合物。第一种是 P3HT（聚(3-己基噻吩-2,5-二基)），这是一种能级与 PBTTT-C14 相近的 p型共轭聚合物；第二种是 N2200（Poly{[N,N′-双(2-辛基十二烷基)-萘-1,4,5,8-双（二羧酰亚胺）-2,6-二基]- alt-5,5′-(2,2′-联噻吩)}），这是一种 n型共轭聚合物，其 LUMO（最低未占分子轨道）能级（~ −4.1 eV）[50] 与 n型 MoS_2 的导带（~ −4.0 eV）[51], 紧密对齐，因此能量偏移很小，电荷转移极少。按照与 PBTTT-C14 相同的流程，将 P3HT 旋涂到 MoS_2场效应晶体管上。P3HT 的化学结构和器件的光学图像分别如图4(a)和图4(b)所示。与 PBTTT-C14 类似，它使 V_{th} 明显正向偏移，从 −2.1 V 增至 +14.5 V（总偏移 ≈16.6 V），从而使器件转变为增强型工作，如图4(c)所示。滞后几乎被完全抑制，如图4(d)所示。总体而言，PBTTT-C14 和 P3HT 的费米能级较深，能够轻易从 MoS_2, 中抽取电子，从而诱导强烈的 p型电荷转移掺杂和滞后抑制。

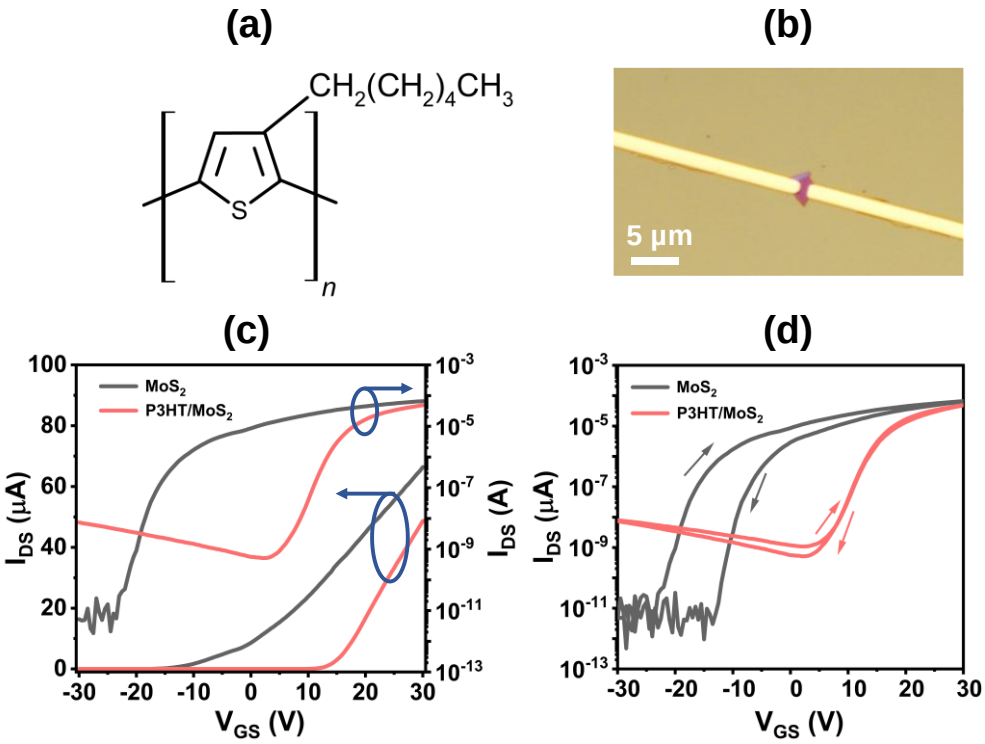

图 4：（a）P3HT 的化学结构，（b）制备器件的光学图像，（c）未处理和涂覆 P3HT 的 MoS_2 场效应晶体管在线性和对数尺度下的转移特性，显示 V_{th} 从 −2.1 V 移至 +14.5 V（V_{DS} = 5 V 时），并从耗尽型工作转变为增强型工作；（d）未处理器件和 P3HT/MoS_2 场效应晶体管的双向扫描转移特性，展示了滞后抑制（V_{DS} = 5 V）。

相比之下，涂覆 N2200 后（其化学结构和器件的光学图像分别如图5(a)和图5(b)所示），V_{th} 从 −13.8 V 移至 −8.3 V，对应的正向偏移总量仅为 ~5.5 V，且晶体管仍以耗尽型模式工作，如图5(c)所示。滞后有所减小，从 11.2 V 降至 5.6 V（~ 50 %），如图5(d)所示。由于 N2200 和 MoS_2 均为 n型，且二者的 LUMO 与导带能级紧密对齐，因此能量偏移不足以驱动显著的界面电荷转移。请注意，N2200 涂覆器件的关态电流仍然较低，因为作为 n型材料，它不会促进负栅极电压下的导电，因此任何潜在的漏电路径实际上都不会被激活。总的来说，PBTTT-C14 和 P3HT 与 N2200 在 MoS_2 场效应晶体管上的表现对比，清楚地突显了费米能级对齐对电荷转移的关键影响。

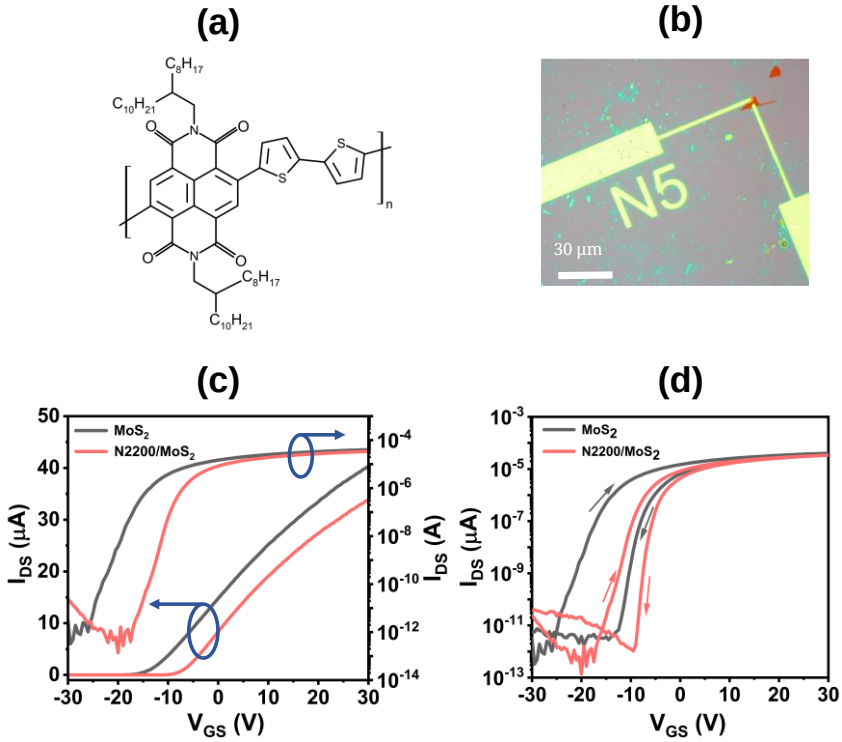

图5. (a) N2200的化学结构，(b) 制备器件的光学图像，(c) 原始及涂覆N2200的 MoS_2 场效应晶体管的线性和对数尺度转移特性，显示在V_{DS} = 2 V时阈值电压从−13.8 V偏移至−8.3 V，但未实现增强型工作；(d) 原始及N2200/MoS_2 场效应晶体管的双向扫描转移特性，显示滞后抑制了~ 50%（V_{DS} = 2 V）。

接下来，我们讨论这种 V_{th} 调制背后的物理机制。原始 MoS_2 场效应晶体管中负阈值电压（V_{th}）的起因是本征硫空位，它们充当施主型缺陷[22] ，并在沟道中贡献高密度的自由电子，使器件呈现常开型[52,53]。涂覆聚合物后，我们预计会产生显著的界面相互作用，从而降低 MoS_2 沟道中的自由电子密度，并有效降低费米能级。因此，现在需要更高的栅极电压才能达到导电起始，使器件向增强型工作转变。定量而言，自由电子密度（n）的降低量可通过关系式 $\Delta n = C_{ox}\Delta V_{th}/q$求得，其中 C_{ox}为单位面积栅电容，q 为元电荷，ΔV_{th}为观测到的阈值电压偏移。对于 PBTTT-C14涂层器件，自由电子密度的总降低量约为 1.67×10^{12} cm^{-2}；对于 P3HT，为 1.79×10^{12} cm^{-2}；而涂覆 N2200 后的降低量较小，仅为 5.93×10^{11} cm^{-2}，表明其电子抽取能力较弱。PBTTT-C14 和 P3HT 对自由电子密度的这种强调制使器件能够从耗尽型转变为 E-

模式工作，而 N2200 仅能部分降低载流子密度，因此无法诱导 E模式工作。图6(a → d)示意性展示了两种聚合物作用下 MoS_2 沟道中自由电子密度的相对降低。MoS_2 沟道中自由电子的抽取主要由其与聚合物涂层之间的费米能级对齐所决定。在 PBTTT-C14 和 P3HT 中，聚合物的费米能级远低于 MoS_2, 的费米能级，从而产生强大的电子转移驱动力；相比之下，N2200 的费米能级接近对齐，因此电子抽取能力弱得多。相应的能带排列示意于图6(e → h)中。具体而言，原始多层 MoS_2 场效应晶体管的导带（CB）位于约 −4.0 eV，价带（VB）接近 −5.2 eV；由于本征 n型掺杂[51]，费米能级位于接近导带的位置。PBTTT-C14 是一种 p型聚合物，其最高占据分子轨道（HOMO）/最低未占分子轨道（LUMO）能级分别为 −5.1 eV/−3.1 eV[54], ；而 P3HT 的 HOMO/LUMO 能级分别为 −5.2 eV/−3.2 eV[55]。由于这些 p型聚合物的费米能级接近其 HOMO 能级，而后者显著低于 MoS_2 的费米能级，因此电子会从 MoS_2 转移到聚合物中，并具有强大的能量驱动力。这种高效的电子抽取降低了 MoS_2 沟道中的自由电子密度，并使 MoS_2 的费米能级向下移动。相比之下，N2200 是一种 n型聚合物，其 HOMO/LUMO 能级分别为 −5.5 eV/−4.1 eV，且其费米能级接近 LUMO[50]。

由于 N2200 的最低未占分子轨道仅略低于 MoS_2 导带边缘，因此可用于电子抽取的能带偏移很小，导致电荷转移显著减弱。因此，V_{th} 偏移幅度有限，无法实现完全的增强型工作模式。这表明，界面费米能级对齐决定了电荷转移，调节载流子浓度，并直接影响阈值电压。界面电荷转移对抑制滞后也起着关键作用。如前所述，MoS_2 场效应晶体管的滞后既有外因[24] （吸附物、水分），也有内因（硫空位态）[56,57] 。外源性吸附物通常结合在硫空位位点上，这意味着滞后效应中相当一部分可归因于硫空位诱导的陷阱态[52]。当 PBTTT-C14 或 P3HT 从 MoS_2 沟道中抽取电子时，这些硫空位相关陷阱会得到电子钝化。可用于电荷俘获/去俘获的活性陷阱态减少后，滞后窗口便大幅缩小。PBTTT-C14 和 P3HT 的滞后抑制效果最为显著，这与它们相比 N2200 具有更强的电荷转移能力相符。

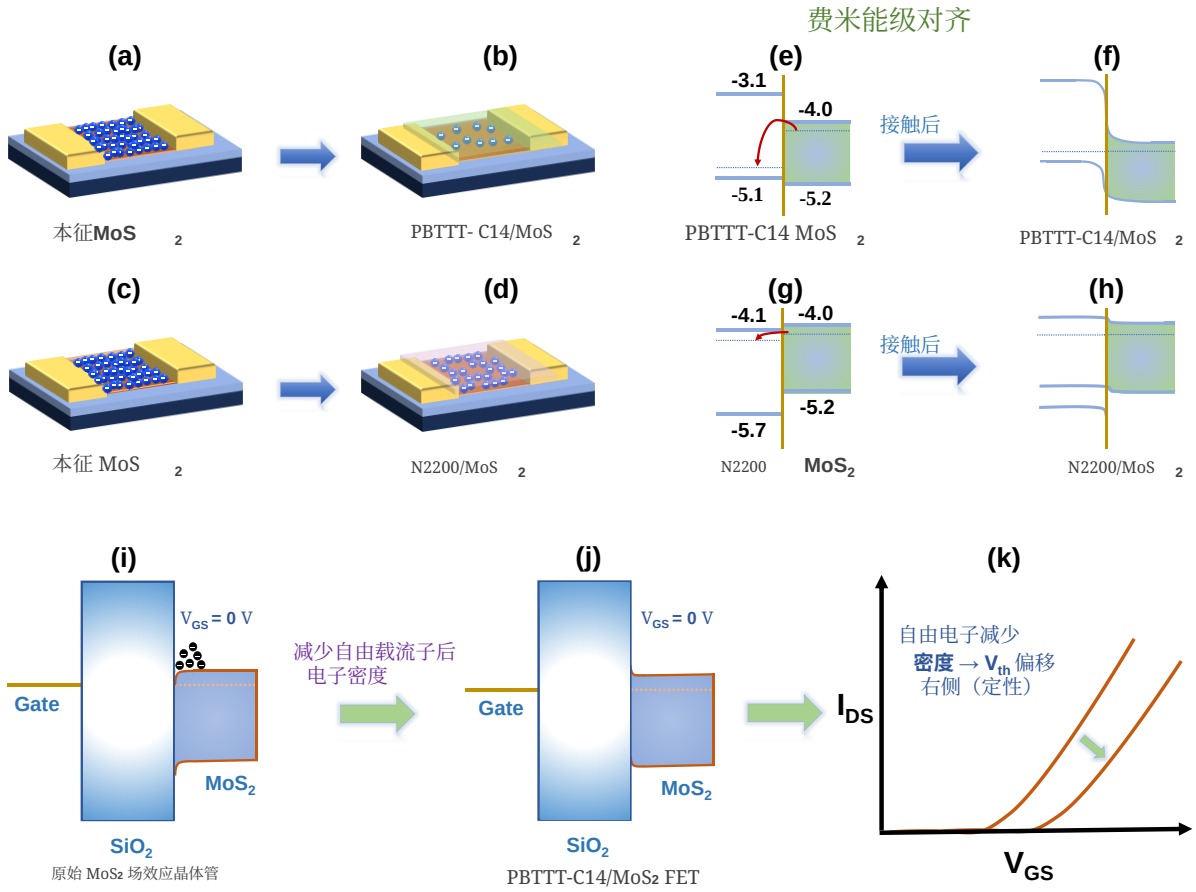

图6. **(a → d)** 示意图展示了PBTTT-C14和N2200聚合物涂层导致MoS_2沟道中自由电子相对减少的情况，突显了PBTTT-C14实现的更强电子抽取效果。**(e → h)** 示意图展示了MoS_2 与PBTTT-C14和N2200的能带排列。(i) 在V_{GS} = 0 V下，未处理的背栅MoS_2 FET的能级示意图，此时费米能级接近导带，因此产生有限的导电性并呈现耗尽型工作模式。(j) 在V_{GS} = 0 V下PBTTT-C14涂层的影响，显示费米能级降低且沟道导电性受到抑制，因此需要施加正栅极偏压才能开启器件。(k) 相应的电学表现，表现为I_{DS}与V_{GS} 特性曲线中明显的正向V_{th} 偏移。

聚合物涂层对 MoS_2/栅极界面能带图的影响示意如图6（i 至 k）所示。在本征 MoS_2 沟道中，硫空位会提供大量自由电子，使费米能级接近导带，并使器件即使在栅极偏压为零时也能导电，如图6(i)中的能级图所示。涂覆 PBTTT-C14 后，界面电荷转移会从 MoS_2, 中抽取自由电子，使费米能级降低，并有效抬高导带边缘，如图所示

图6(j)。这会在沟道中形成势垒，必须施加正栅极电压才能克服该势垒并实现电子注入。由此产生的 I_{DS} Vs. V_{GS} 特性通过阈值电压显著正向偏移直接反映了这一效应，如图6(k)示意所示。为进一步确认电子耦合的作用，我们在 MoS_2 场效应晶体管上沉积了绝缘聚合物聚二甲基硅氧烷（PDMS）。PDMS 的化学结构如图7(a)所示，器件的光学图像如图7(b)所示。沉积 PDMS 后，器件的 V_{th} 没有显著偏移（图7(c)），滞后也没有明显变化（图7(d)）。这些结果证实，单纯的物理封装不会显著调控电学性质，凸显了界面电子相互作用对于实现有效器件调控的必要性。表1总结了上述不同聚合物涂层下 MoS_2 场效应晶体管的 V_{th} 调控和滞后行为。表2总结了已报道的调节 MoS_2 场效应晶体管阈值电压和控制滞后的策略。总之，本研究表明，在费米能级对齐的驱动下，MoS_2 向 p 型聚合物（PBTTT-C14、P3HT）的可控界面电荷转移，可实现大幅且稳定的 V_{th} 正向偏移、转变为增强型工作模式，并显著抑制滞后。这些结果凸显了有机-无机异质结构在可调谐、高性能二维晶体管技术中的潜力，其利用了物理钝化和界面电子耦合的双重机制。

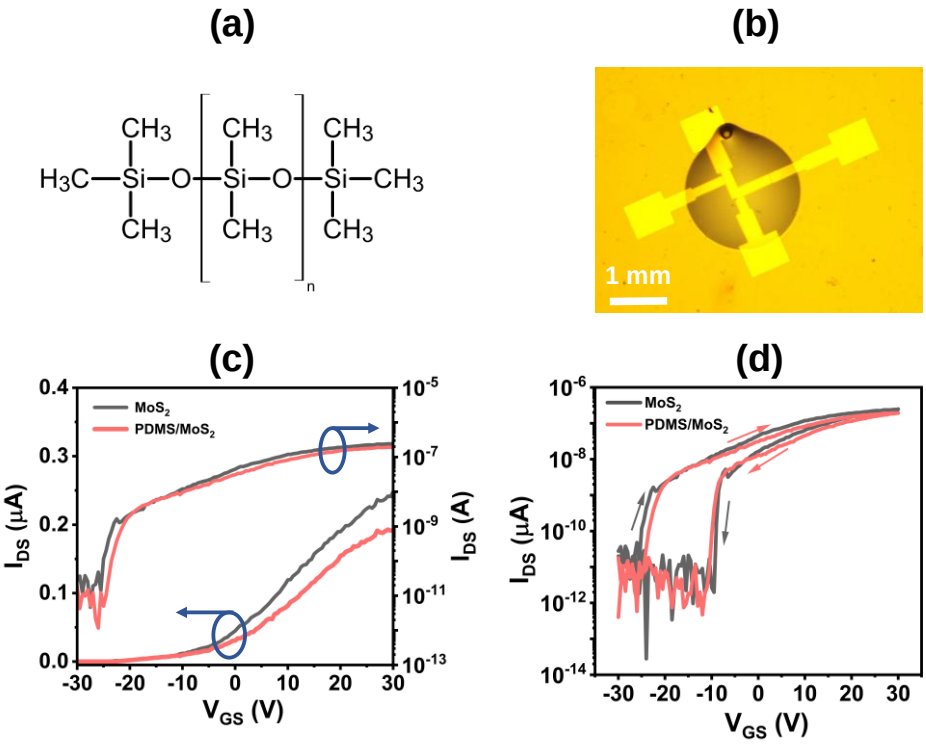

图7。(a) PDMS（聚二甲基硅氧烷）的化学结构，(b) 器件的光学图像，(c) 原始和 PDMS 涂层 MoS_2 场效应晶体管在线性和对数尺度下的转移特性，显示在 V_{DS} = 1 V 时阈值电压（V_{th}）没有显著变化，(d) 原始和 PDMS 涂层 MoS_2 场效应晶体管的双向扫描转移特性（在 V_{DS} = 1 V 时）。

表1. 聚合物涂层引起的 MoS_2 场效应晶体管电学变化总结。

聚合物	聚合物-**Type**	V_{th} (原始状态，V)	V_{th} (涂层后，**V)**	**ΔV_{th} (V)**	工作 **mode**	滞后（原始 **→ 涂覆，V**）
PBTTT-C14	p型	-9.6	+5.9	+15.5	D → E	8.8 → 1.3 (~85%↓)
P3HT	p型	-2.1	+14.5	+16.6	D → E	9.5 → 0 (~100%↓)
N2200	n型	-13.8	-8.3	+5.5	D → D	11.2 → 5.6 (~50%↓)
PDMS	绝缘	-5	-5	0	D → D	16.1 → 13.6 (~15%↓)

表2. 已报道的用于调节 MoS_2 场效应晶体管阈值电压和滞后控制的策略比较。

方法	材料 / 所用修饰剂	V_{th} 的偏移 /V_{turn}	操作 **mode**	对滞后的影响	参考文献
表面改性 与自组装单分子层搭配	十八烷基三氯硅烷（OTS）	~ +1 V	D→ E模式	原始器件几乎无滞后；OTS 几乎没有影响	31
聚合物介电层工程	CYTOP	+5.7 V	D→ E模式	未报告	28
栅极金属功函数工程	钯作为栅极金属	~ +1 V	D→ E模式	未报告	27
分子表面装饰	F4TCNQ	最大值 ~ +74 (动态 随 V_d 变化的偏移)	D→ 耗尽型	滞后增加了 ~20 V	58
等离子体处理	NH_3 等离子体	+ 1.5 V	E→ E模式	未报道	30
表面电荷-转移掺杂	有机p型掺杂剂 Magic Blue层	~ +100 V	0 V → E-mode	未报告	59
等离子体处理	Ar 等离子体 + O_2 浴	~ +40 伏	D → E模式	未报告	18

分子电荷转移掺杂	F4TCNQ	> 30 V	D → 耗尽型	未报告	60
介电缓冲层工程	CYTOP	+9.65	D→ 耗尽型	未报告	61
封装	h-BN	~ +10 V	D → 耗尽型	完全无滞后	19
界面钝化	APTES	~ –2 V	D→ 耗尽型	23 → 10.8（53%）	33
旋涂–辅助沉淀	$CsPbBr_3$ 纳米簇	–2.82 V	E→ E模式	29 → 21 (27 %)	35
等离子体处理和钝化	O_2 等离子体 (30 s) + Al_2O_3 钝化	~ +5 伏	D→ 耗尽型	14.6 → 0.8（94%）	62
表面处理采用 p 型有机聚合物	PBTTT-C14	+15.5 V	D → E模式	8.8 → 1.3 (85%)	本工作

结论：总之，我们证明，通过采用 p 型有机聚合物 PBTTT-C14 和 P3HT 对多层 MoS_2场效应晶体管进行界面工程，可以同时实现（1）阈值电压（V_{th}）调控和（2）强效滞后抑制。涂覆 PBTTT-C14 后，V_{th} 从 –9.6 V 移至 +5.9 V，从而有效地将常开型耗尽型（D-mode）器件转变为增强型（E-mode）工作，并将滞后从 8.8 V 降至 1.3 V（~85%）。这一行为源于 MoS_2/聚合物界面处的界面电荷转移，其驱动力是有利的能级匹配。与此一致，能级与 PBTTT-C14 相近的 P3HT 也产生了类似的调控效果；而 n 型聚合物 N2200 仅使 V_{th} 从 –13.8 V 小幅移至 +8.3 V，未能实现 E-mode 工作，同时将滞后从 11.2 V 降至 5.6 V（~50%），凸显了聚合物与 MoS_2 之间能级匹配的关键作用。使用绝缘聚二甲基硅氧烷进行的对照实验表明，V_{th} 和滞后均无显著变化，进一步证实单纯的物理封装并不足够，界面处的电子相互作用至关重要。我们在多个器件中验证了这些效应的再现性和稳定性。总体而言，我们的研究结果表明，经过定制的有机-无机异质结构为 V_{th} 调控、滞后抑制以及高性能、低功耗二维电子器件的设计提供了一种可靠策略。

致谢：作者衷心感谢印度孟买理工学院（IIT Bombay）和印度政府大学拨款委员会（UGC）提供的经费支持及奖学金。作者还诚挚感谢 IIT Bombay 纳电子学卓越中心（CEN）和工业研究与咨询中心（IRCC）提供器件制造和表征设施的使用条件。

利益冲突：
作者声明不存在利益冲突。

参考文献：

(1) Waldrop, M. M. 摩尔定律的芯片时代已近尾声。Nature 2016, 530 (7589), 144–147. https://doi.org/10.1038/530144a. (2) Young, K. K. 全耗尽型 SOI MOSFET 中的短沟道效应。IEEE Trans. Electron Devices 1989, 36 (2), 399–402. https://doi.org/10.1109/16.19942. (3) Liu, C.; Chen, H.; Wang, S.; Liu, Q.; Jiang, Y.-G.; Zhang, D. W.; Liu, M.; Zhou, P. 面向下一代计算技术的二维材料。Nat. Nanotechnol. 2020, 15 (7), 545–557. https://doi.org/10.1038/s41565-020-0724-3. (4) Schwierz, F. 石墨烯晶体管。Nat. Nanotechnol. 2010, 5 (7), 487–496. https://doi.org/10.1038/nnano.2010.89. (5) Novoselov, K. S.; Geim, A. K.; Morozov, S. V.; Jiang, D.; Zhang, Y.; Dubonos, S. V.; Grigorieva, I. V.; Firsov, A. A. 原子级薄碳膜中的电场效应。Science (1979). 2004, 306 (5696), 666–669. https://doi.org/10.1126/science.1102896. (6) Kim, K.; Choi, J.-Y.; Kim, T.; Cho, S.-H.; Chung, H.-J. 石墨烯在硅基半导体器件中的作用。Nature 2011, 479 (7373), 338–344. https://doi.org/10.1038/nature10680. (7) Jariwala, D.; Sangwan, V. K.; Lauhon, L. J.; Marks, T. J.; Hersam, M. C. 半导体二维过渡金属二硫族化物的新兴器件应用。ACS Nano 2014, 8 (2), 1102–1120. https://doi.org/10.1021/nn500064s. (8) Wang, Q. H.; Kalantar-Zadeh, K.; Kis, A.; Coleman, J. N.; Strano, M. S. 二维过渡金属二硫属化物的电子学与光电子学。Nat. Nanotechnol. 2012, 7 (11), 699–712. https://doi.org/10.1038/nnano.2012.193.

(9) Patra, U.; Saha, S.; Das, S.; Raturi, M.; Biswas, A.; Sahu, B. P.; Lodha, S.; Dhar, S. 理解环境与介电覆盖对通过化学气相沉积技术生长的 WS_2 单层电学性质的影响。J. Appl. Phys. 2025, 138 (17). https://doi.org/10.1063/5.0294595. (10) Venkata Subbaiah, Y. P.; Saji, K. J.; Tiwari, A. 原子级薄 MoS_2：一种用途广泛的非石墨烯二维材料。Adv. Funct. Mater. 2016, 26 (13), 2046–2069. https://doi.org/10.1002/adfm.201504202. (11) Bhatia, S.; Bisht, R. S.; Ahmed, R.; Kumar, P. MoS_2 场效应晶体管关键电学参数与层数之间的权衡。ACS Appl. Electron. Mater. 2025, 7 (15), 6891–6897. https://doi.org/10.1021/acsaelm.5c00734. (12) Ghosh, S.; Laishram, A. D.; Kumar, P. 基于 Gr/MoS_2 的垂直场效应晶体管微型化与性能改进研究的仿真。Adv. Theory Simul. 2025, 8 (9). https://doi.org/10.1002/adts.202500139. (13) Pollmann, E.; Sleziona, S.; Foller, T.; Hagemann, U.; Gorynski, C.; Petri, O.; Madauß, L.; Breuer, L.; Schleberger, M. 在金上剥离的大面积二维 MoS_2：直接实验探测金属-半导体界面。ACS Omega 2021, 6 (24), 15929–15939. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01570. (14) Patra, U.; Mujeeb, F.; K, A.; Israni, J.; Dhar, S. 通过化学气相沉积技术在 SiO_2 衬底上可控生长毫米级连续双层 MoS_2 薄膜。Surfaces and Interfaces 2025, 58, 105825. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.105825. (15) Chuang, H.-J.; Chamlagain, B.; Koehler, M.; Perera, M. M.; Yan, J.; Mandrus, D.; Tománek, D.; Zhou, Z. 低电阻二维/二维欧姆接触：实现高性能 WSe_2 , MoS_2 , 和 $MoSe_2$ 晶体管的通用方法。Nano Lett. 2016, 16 (3), 1896–1902. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b05066. (16) Yan, H.; Wang, Y.; Li, Y.; Phuyal, D.; Liu, L.; Guo, H.; Guo, Y.; Lee, T.-L.; Kim, M.; Jeong, H. Y.; Chhowalla, M. 高k介电材料氧化锆与二维二硫化钼之间洁净的范德华界面。Nat. Electron. 2025, 8 (10), 906–912. https://doi.org/10.1038/s41928-025-01468-1. (17) Leong, W. S.; Li, Y.; Luo, X.; Nai, C. T.; Quek, S. Y.; Thong, J. T. L. 通过表面处理调控 MoS_2 场效应晶体管的阈值电压。《纳米尺度》2015, 7 (24), 10823–10831. https://doi.org/10.1039/C5NR00253B. (18) Rai, A. K.; Shah, A. A.; Dar, A. B.; Kumar, J.; Shrivastava, M. 利用氩等离子体诱导的 p 型掺杂技术，将 MoS_2 场效应晶体管的本征耗尽模式特性重构为高性能增强模式运行。Small Methods 2025, 9 (3). https://doi.org/10.1002/smtd.202401001. (19) Liu, S.; Yuan, K.; Xu, X.; Yin, R.; Lin, D.; Li, Y.; Watanabe, K.; Taniguchi, T.; Meng, Y.; Dai, L.; Ye, Y. 无滞后的六方氮化硼封装二维

半导体晶体管、NMOS和CMOS反相器。《先进电子材料》 2019年, 5 (2). https://doi.org/10.1002/aelm.201800419. (20) Wani, S.-S.; Hsu, C. C.; Kuo, Y.-Z.; Darshana Kumara Kimbulapitiya, K. M. M.; Chung, C.-C.; Cyu, R.-H.; Chen, C.-T.; Liu, M.-J.; Chaudhary, M.; Chiu, P.-W.; Zhong, Y.-L.; Chueh, Y.-L. 利用碱金属氟化物作为介电封盖层增强二硫化钼场效应晶体管的电输运性质。ACS Nano 2024年, 18 (16), 10776–10787. https://doi.org/10.1021/acsnano.3c11025. (21) Younas, R.; Zhou, G.; Hinkle, C. L. 面向超缩放晶体管的过渡金属二硫属化物掺杂展望：挑战与机遇。《应用物理学快报》 2023年, 122 (16). https://doi.org/10.1063/5.0133064. (22) Qiu, H.; Xu, T.; Wang, Z.; Ren, W.; Nan, H.; Ni, Z.; Chen, Q.; Yuan, S.; Miao, F.; Song, F.; Long, G.; Shi, Y.; Sun, L.; Wang, J.; Wang, X. 二硫化钼中缺陷诱导局域态的跳跃输运。《自然通讯》 2013年, 4 (1), 2642. https://doi.org/10.1038/ncommms3642. (23) Late, D. J.; Liu, B.; Matte, H. S. S. R.; Dravid, V. P.; Rao, C. N. R. 单层MoS_2场效应晶体管中的滞后。ACS Nano 2012年, 6 (6), 5635–5641. https://doi.org/10.1021/nn301572c. (24) Shimazu, Y.; Tashiro, M.; Sonobe, S.; Takahashi, M. 环境效应对二硫化钼场效应晶体管转移特性滞后的影响。Scientific Reports 2016年, 6 (1), 30084. https://doi.org/10.1038/srep30084. (25) Li, T.; Du, G.; Zhang, B.; Zeng, Z. 多层MoS_2 场效应晶体管中滞后的缩放行为。《应用物理学快报》 2014年, 105 (9). https://doi.org/10.1063/1.4894865. (26) Kaushik, N.; Mackenzie, D. M. A.; Thakar, K.; Goyal, N.; Mukherjee, B.; Boggild, P.; Petersen, D. H.; Lodha, S. MoS_2场效应晶体管中的可逆滞后反转。NPJ 2D Mater. Appl. 2017年, 1 (1), 34. https://doi.org/10.1038/s41699-017- 0038-y. (27) Wang, H.; Yu, L.; Lee, Y.-H.; Shi, Y.; Hsu, A.; Chin, M. L.; Li, L.-J.; Dubey, M.; Kong, J.; Palacios, T. 基于双层MoS_2晶体管的集成电路。《纳米快报》 2012年, 12 (9), 4674–4680. https://doi.org/10.1021/nl302015v. (28) Yoo, G.; Choi, S. L.; Lee, S.; Yoo, B.; Kim, S.; Oh, M. S. 采用含氟聚合物栅介电层的多层MoS_2晶体管的增强型工作模式。《应用物理学快报》 2016年, 108 (26). https://doi.org/10.1063/1.4955024. (29) Leong, W. S.; Li, Y.; Luo, X.; Nai, C. T.; Quek, S. Y.; Thong, J. T. L. 通过表面处理调控MoS_2场效应晶体管的阈值电压。《纳米尺度》 2015年, 7 (24), 10823–10831. https://doi.org/10.1039/C5NR00253B. (30) Kang, M.; Hong, W.; Lee, I.; Park, S.; Park, C.; Bae, S.; Lim, H.; Choi, S.-Y. 通过NH_3等离子体实现少层MoS_2场效应晶体管的可调掺杂策略

处理。ACS应用材料与界面 2024年, 16 (33), 43849–43859. https://doi.org/10.1021/acsami.4c08549. (31) Roh, J.; Ryu, J. H.; Baek, G. W.; Jung, H.; Seo, S. G.; An, K.; Jeong, B. G.; Lee, D. C.; Hong, B. H.; Bae, W. K.; Lee, J.; Lee, C.; Jin, S. H. 通过十八烷基三氯硅烷实现多层MoS_2 场效应晶体管的阈值电压控制及其在增强型逻辑门驱动的有源矩阵量子点显示器中的应用。Small 2019年, 15 (7). https://doi.org/10.1002/smll.201803852. (32) Li, X.; Sun, R.; Guo, H.; Su, B.; Li, D.; Yan, X.; Liu, Z.; Tian, J. 利用有机溶剂对过渡金属二硫属化物进行可控掺杂。《先进电子材料》 2020, 6 (3). https://doi.org/10.1002/aelm.201901230. (33) Han, K. H.; Kim, G.-S.; Park, J.; Kim, S.-G.; Park, J.-H.; Yu, H.-Y. 利用3-氨丙基三乙氧基硅烷钝化降低MoS_2 晶体管的阈值电压滞回及其在改善突触行为中的应用。ACS应用材料与界面 2019年, 11 (23), 20949–20955. https://doi.org/10.1021/acsami.9b01391. (34) Liu, N.; Baek, J.; Kim, S. M.; Hong, S.; Hong, Y. K.; Kim, Y. S.; Kim, H.-S.; Kim, S.; Park, J. 提高高性能多层MoS_2 场效应晶体管的稳定性。ACS应用材料与界面 2017年, 9 (49), 42943–42950. https://doi.org/10.1021/acsami.7b16670. (35) Kang, Y. Z.; An, G. H.; Jeon, M.-G.; Shin, S. J.; Kim, S. J.; Choi, M.; Lee, J. B.; Kim, T. Y.; Rahman, I. N.; Seo, H. Y.; Oh, S.; Cho, B.; Choi, J.; Lee, H. S. 通过$CsPbBr_3$ 2023年, 23 19 8914 8922 101021 3 02293 -纳米团簇的直接表面沉淀进行电荷转移掺杂，提高MoS_2 场效应晶体管的迁移率并降低滞后。《纳米快报》 ( ), – . https://doi.org/ . /acs.nanolett. c . (36) Jana, S. P.; Shivangi; Gupta, S.; Gupta, A. K. 通过六甲基二硅氮烷（HMDS）封装提升MoS_2/SiO_2 场效应晶体管的性能。《应用物理学快报》 2024年, 124 (24). https://doi.org/10.1063/5.0204634. (37) Lee, G.-H.; Lee, C.-H.; van der Zande, A. M.; Han, M.; Cui, X.; Arefe, G.; Nuckolls, C.; Heinz, T. F.; Hone, J.; Kim, P. 基于无机与有机范德华体系的异质结构。APL Mater. 2014年, 2 (9). https://doi.org/10.1063/1.4894435. (38) Kang, S. J.; Lee, G.; Yu, Y.; Zhao, Y.; Kim, B.; Watanabe, K.; Taniguchi, T.; Hone, J.; Kim, P.; Nuckolls, C. 基于石墨烯与六方氮化硼异质结构的有机场效应晶体管。Adv. Funct. Mater. 2014年, 24 (32), 5157–5163. https://doi.org/10.1002/adfm.201400348. (39) Kumar, P.; Shivananda, K. N.; Zajączkowski, W.; Pisula, W.; Eichen, Y.; Tessler, N. 分子堆积或形貌与化学结构或加工条件之间的关系：对电子性质的影响。Adv. Funct. Mater. 2014年, 24 17 2530 2536 101002 201303571 ( ), – . https://doi.org/ . /adfm. . (40) Bisht, R. S.; Kumar, P. 基于接触几何结构与分子堆积的多晶PBTTT-C14聚合物器件中的反向阻变机制，用于

神经形态存储器。《材料化学杂志 C：材料》2025, 13 (26), 13404–13414. https://doi.org/10.1039/D5TC01372K. (41) Petoukhoff, C. E.; Kosar, S.; Goto, M.; Bozkurt, I.; Chhowalla, M.; Dani, K. M. 共轭聚合物/MoS_2 有机/二维异质结中的电荷转移动力学。《分子系统设计与工程》2019, 4 (4), 929–938. https://doi.org/10.1039/C9ME00019D. (42) Jariwala, D.; Howell, S. L.; Chen, K.-S.; Kang, J.; Sangwan, V. K.; Filippone, S. A.; Turrisi, R.; Marks, T. J.; Lauhon, L. J.; Hersam, M. C. 并五苯与 MoS_2形成的混合型栅极可调谐范德华 p–n 异质结。《纳米快报》2016, 16 (1), 497–503. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b04141. (43) Bisht, R. S.; Kumar, P. 影响垂直有机场效应晶体管性能的各种因素的模拟研究。《工程研究快报》2023, 5 (3), 035040. https://doi.org/10.1088/2631-8695/acf029. (44) Liu, H.; Liu, D.; Yang, J.; Gao, H.; Wu, Y. 基于有机半导体的柔性电子：从图案化组装到集成应用。Small 2023, 19 (11). https://doi.org/10.1002/smll.202206938. (45) Gu, M.; Kim, T.; Jeon, D.; Lee, D.; Park, J.; Kim, T. MoS_2中费米能级滞后与基于硫空位的陷阱之间的相关性。ACS Appl. Electron. Mater. 2024, 6 (11), 8525–8531. https://doi.org/10.1021/acsaelm.4c01808. (46) Ortiz-Conde, A.; García Sánchez, F. J.; Liou, J. J.; Cerdeira, A.; Estrada, M.; Yue, Y. MOSFET 阈值电压提取方法的最新进展综述。《微电子可靠性》2002, 42 (4–5), 583–596. https://doi.org/10.1016/S0026-2714(02)00027-6. (47) Al Mamun, M. S.; Sainoo, Y.; Takaoka, T.; Ando, A.; Komeda, T. MoS_2 场效应晶体管转移特性中的滞后：气体、温度和光照效应。RSC Adv. 2024, 14 (49), 36517–36526. https://doi.org/10.1039/D4RA04820B. (48) Li, L.; Long, R.; Bertolini, T.; Prezhdo, O. V. 硫吸附原子和空位以不同机制加速 MoS_2 中的电荷复合：时域从头算分析。《纳米快报》2017, 17 (12), 7962–7967. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b04374. (49) Park, J. H.; Sanne, A.; Guo, Y.; Amani, M.; Zhang, K.; Movva, H. C. P.; Robinson, J. A.; Javey, A.; Robertson, J.; Banerjee, S. K.; Kummel, A. C. 通过电荷转移范德华界面对过渡金属二硫属化物进行缺陷钝化。Sci. Adv. 2017, 3 (10). https://doi.org/10.1126/sciadv.1701661. (50) Su, W.; Meng, Y.; Guo, X.; Fan, Q.; Zhang, M.; Jiang, Y.; Xu, Z.; Dai, Y.; Xie, B.; Liu, F.; Zhang, M.; Russell, T. P.; Li, Y. 基于具有高结晶度的含氟宽带隙聚合物给体的高效、热稳定全聚合物太阳能电池。《材料化学杂志 A：材料》2018, 6 (34), 16403–16411. https://doi.org/10.1039/C8TA05376F.

(51) Trainer, D. J.; Putilov, A. V.; Di Giorgio, C.; Saari, T.; Wang, B.; Wolak, M.; Chandrasena, R. U.; Lane, C.; Chang, T.-R.; Jeng, H.-T.; Lin, H.; Kronast, F.; Gray, A. X.; Xi, X.; Nieminen, J.; Bansil, A.; Iavarone, M. 层间耦合诱导的单层至少层 MoS_2价带边缘位移。Scientific Reports 2017, 7 (1), 40559. https://doi.org/10.1038/srep40559. (52) Kim, I. S.; Sangwan, V. K.; Jariwala, D.; Wood, J. D.; Park, S.; Chen, K.-S.; Shi, F.; Ruiz-Zepeda, F.; Ponce, A.; Jose-Yacaman, M.; Dravid, V. P.; Marks, T. J.; Hersam, M. C.; Lauhon, L. J. 化学计量比对化学气相沉积生长的 MoS_2的光学和电学性质的影响。ACS Nano 2014, 8 (10), 10551–10558. https://doi.org/10.1021/nn503988x. (53) Lee, I.; Kang, M.; Park, S.; Park, C.; Lee, H.; Bae, S.; Lim, H.; Kim, S.; Hong, W.; Choi, S. 使用沟道保护层和氧等离子体修复化学气相沉积生长的 MoS_2 场效应晶体管中的施主缺陷态。Small 2024, 20 (2). https://doi.org/10.1002/smll.202305143. (54) Cochran, J. E.; Junk, M. J. N.; Glaudell, A. M.; Miller, P. L.; Cowart, J. S.; Toney, M. F.; Hawker, C. J.; Chmelka, B. F.; Chabinyc, M. L. 电掺杂聚合物中的分子相互作用与有序性：PBTTT 与 F4TCNQ 的共混物。《大分子》2014, 47 (19), 6836–6846. https://doi.org/10.1021/ma501547h. (55) Petoukhoff, C. E.; Kosar, S.; Goto, M.; Bozkurt, I.; Chhowalla, M.; Dani, K. M. 共轭聚合物/MoS_2 有机/二维异质结中的电荷转移动力学。《分子系统设计与工程》2019, 4 (4), 929–938. https://doi.org/10.1039/C9ME00019D. (56) Cao, B.; Wang, Z.; Xiong, X.; Gao, L.; Li, J.; Dong, M. 滞后可逆的 MoS_2 晶体管。《新化学杂志》2021, 45 (27), 12033–12040. https://doi.org/10.1039/D1NJ01267C. (57) Shu, J.; Wu, G.; Guo, Y.; Liu, B.; Wei, X.; Chen, Q. MoS_2 场效应晶体管中滞后的内在起源。《纳米尺度》2016, 8 (5), 3049–3056. https://doi.org/10.1039/C5NR07336G. (58) Kii, H.; Nouchi, R. 在空气中工作的分子修饰 MoS_2 场效应晶体管中，大于 90 V/V 的漏极诱导阈值电压漂移。ACS Appl. Electron. Mater. 2025, 7 (11), 5282–5289. https://doi.org/10.1021/acsaelm.5c00627. (59) Tarasov, A.; Zhang, S.; Tsai, M.; Campbell, P. M.; Graham, S.; Barlow, S.; Marder, S. R.; Vogel, E. M. 使用分子还原剂和氧化剂对大面积三层 MoS_2 进行可控掺杂。《先进材料》2015, 27 (7), 1175–1181. https://doi.org/10.1002/adma.201404578. (60) Wang, J.; Ji, Z.; Yang, G.; Chuai, X.; Liu, F.; Zhou, Z.; Lu, C.; Wei, W.; Shi, X.; Niu, J.; Wang, L.; Wang, H.; Chen, J.; Lu, N.; Jiang, C.; Li, L.; Liu, M. F4TCNQ–MoS_2 范德华界面内的电荷转移：实现电学性质调控和气体传感应用。Adv. Funct. Mater. 2018, 28 (51). https://doi.org/10.1002/adfm.201806244.

(61) Lee, H. S.; Shin, J. M.; Jeon, P. J.; Lee, J.; Kim, J. S.; Hwang, H. C.; Park, E.; Yoon, W.; Ju, S.; Im, S. 在玻璃基底上制备的少层 MoS_2 –有机薄膜混合互补反相器像素。Small 2015年，11 (18)，2132–2138。https://doi.org/10.1002/smll.201402950. (62) Liu, N.; Baek, J.; Kim, S. M.; Hong, S.; Hong, Y. K.; Kim, Y. S.; Kim, H.-S.; Kim, S.; Park, J. 提升高性能多层 MoS_2 场效应晶体管的稳定性。ACS应用材料与界面 2017年，9 (49)，42943–42950。https://doi.org/10.1021/acsami.7b16670.