接触电阻与界面工程：高性能二维过渡金属硫族化合物器件的进展

Xiongfang Liu [1]，Kaijian Xing [2, 3]，Chi Sin Tang [*, 4]，Shuo Sun [1]，Pan Chen [1]，Dong-Chen Qi [5, 6]，Mark B. H. Breese [4, 7]，Michael S. Fuhrer [2,5]，Andrew T. S. Wee [*, 8]，Xinmao Yin [*, 1]

[1] 上海市高温超导重点实验室、量子科学与技术研究所、物理学系，上海大学，中国上海 200444[2] 物理与天文学学院，莫纳什大学，克莱顿，维多利亚州 3800，澳大利亚[3] 理学院，皇家墨尔本理工大学，墨尔本，维多利亚州 3001，澳大利亚[4] 新加坡同步辐射光源（SSLS），新加坡国立大学，新加坡 117603，新加坡[5] 澳大利亚研究委员会未来低能电子技术卓越中心（FLEET），莫纳什大学，克莱顿，维多利亚州 3800，澳大利亚[6] 材料科学中心，昆士兰科技大学，布里斯班，昆士兰州 4001，澳大利亚[7] 化学与物理学院，昆士兰科技大学，布里斯班，昆士兰州 4001，澳大利亚[8] 物理学系，理学院，新加坡国立大学，新加坡 117542，新加坡

*通信联系人：slscst@nus.edu.sg（C.S.T.）；
phyweets@nus.edu.sg（A. T. S. W.）；
yinxinmao@shu.edu.cn（X.Y.）

关键词：
金属–二维过渡金属二硫属化物异质结构、接触电阻、界面工程、费米能级钉扎机制、器件性能

摘要：
先进电子器件的发展有赖于可持续材料开发和开创性的研究突破。传统的半导体电子技术在材料厚度缩放和能源效率方面面临限制。原子级薄的二维过渡金属二硫属化物（TMD）已成为下一代纳米电子学和光电子应用的有力候选材料，具有高电子迁移率、高机械强度和可调带隙等优势。尽管具有这些优点，费米能级钉扎效应仍会在金属–二维过渡金属硫族化合物接触处引入难以通过肖特基-莫特定则预测的不可控肖特基势垒。这些势垒会导致接触电阻升高、电流输送能力受限，从根本上阻碍二维过渡金属二硫族化合物晶体管和集成电路性能的提升。本文简要概述金属/二维过渡金属二硫族化合物界面处的费米能级钉扎效应机制及特殊的接触电阻行为。随后，本文将重点介绍近期在降低二维过渡金属硫族化合物器件接触电阻方面取得的进展，包括界面相互作用与杂化、范德华（vdW）接触、预制金属转移以及电荷转移掺杂。最后，本文将探讨相关挑战，并展望未来的发展前景。

1. 引言：

半导体器件是现代电子学的支柱，推动着各个领域的创新与技术进步。传统半导体，例如硅、锗等元素半导体，以及砷化镓、磷化铟等化合物半导体，在塑造电子器件的发展格局方面发挥了关键作用[1-3]。然而，随着对更高性能和新颖功能的需求持续增长，传统半导体的局限性日益显现。这些局限性包括器件微型化、功耗和工作速度方面的限制，凸显了探索替代材料和器件架构的必要性。

在这场创新探索中，二维过渡金属硫族化合物（TMD）成为希望的曙光。这些原子级薄的材料具有诸多卓越特性，包括高载流子迁移率、柔性和光学可调性，因此在场效应晶体管、太阳能电池、生物传感器、吸收体

和光探测器 [4-7]。与块体材料相比，二维过渡金属硫族化合物具有独特的量子限域效应和更高的表面积体积比，为器件微型化和性能提升带来了前所未有的机遇。要实现采用二维过渡金属硫族化合物的高性能先进器件，关键在于建立高效的金属接触。这些接触充当电流输入和输出过程的通道，从根本上影响器件的整体性能 [8-10]。然而，这一领域面临的一项严峻挑战是肖特基势垒的存在；该势垒源于金属-二维过渡金属硫族化合物界面处的费米能级钉扎效应，会阻碍电荷载流子输运 [11,12]。

在二维过渡金属硫族化合物器件的制备过程中，金属沉积等工艺可能造成严重的晶格缺陷和界面损伤，导致不可避免的费米能级钉扎效应，并形成高电阻接触。克服这一挑战对于充分释放二维过渡金属硫族化合物器件的潜力至关重要，因为过高的接触电阻会严重限制器件性能指标，如速度、功耗和可靠性 [13,14]。在此背景下，解决二维过渡金属硫族化合物材料中的接触电阻问题，已成为器件工程师和材料科学家共同关注的关键领域。实现低电阻金属接触不仅能提升电荷载流子输运效率，还有助于实现先进器件功能。

已有多篇综述对过渡金属硫族化合物的接触电阻和界面工程进行了良好总结 [11,15-19]。Schulman 等 [17]和 Allain 等 [15]均对金属-过渡金属硫族化合物接触的基本认识和界面动力学进行了全面阐述，同时介绍了克服接触电阻的界面工程策略。在过去5年中，通过开发新的界面工程技术并获得新的认识，降低接触电阻方面取得了显著进展。这些技术和认识包括界面杂化（过渡金属硫族化合物金属化[20]、形成边缘接触[9,21]以及插入缓冲层[22]）、范德华接触[10]、预制金属转移[23]和电荷转移掺杂[24]。近两年发表的综述，尤其是 Wang 等 [11] 和 Ma 等 [19] 的综述，在帮助读者了解接触策略、作用机制以及多种已开发的二维电子器件方面颇有见地。为了实现

高性能基于二维过渡金属硫族化合物的电子器件，并将其应用于自旋电子学应用、催化、储能和神经形态计算系统等新兴领域（图1）[16,25-27]，必须深入理解并战略性地实施这些不同方法。此时，随着金属/二维TMD界面工程需求不断增长，与自旋电子器件和光电子器件，尤其是*p*型电子器件相关的新兴领域受到推动，人们对这类低维系统产生了浓厚兴趣[28-30]。过去3年，针对金属/二维TMD界面开展了大量研究，尤其是考虑到其在高性能基于二维过渡金属硫族化合物的器件方面的巨大潜力；然而，在二维过渡金属硫族化合物接触电阻和界面工程快速取得科学进展的同时，仍必须考虑最终目标，即开发这些基础技术并将其与先进制造工艺相结合。

在这篇综述中，我们将深入探究费米能级钉扎效应的奥秘，以及它对过渡金属硫族化合物材料接触电阻的影响。通过深入探讨这一现象的物理基础，我们旨在全面阐释二维过渡金属硫族化合物器件面临的接触电阻挑战。此外，我们还将细致考察多种旨在克服这些挑战的界面工程策略，包括界面相互作用与杂化（涵盖TMD金属化、边缘接触、插入缓冲层），以及范德华接触、预制金属转移和电荷转移掺杂。通过系统分析，我们力求揭示克服二维过渡金属硫族化合物材料接触电阻障碍的可行途径，为开发效率和功能性均出类拔萃的高性能电子器件铺平道路。

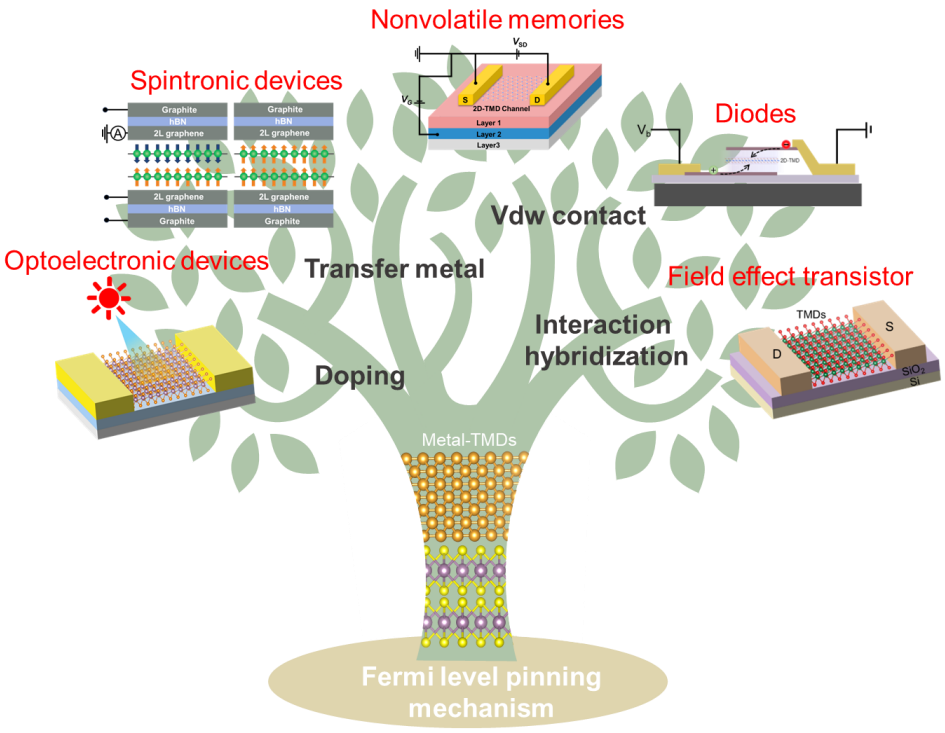


图1. 各种高效的低接触电阻和界面工程技术的出现，使低维过渡金属二硫属化物（TMD）材料得以应用于众多电子、光电子和自旋电子学领域。

2. 二维过渡金属硫族化合物材料的金属接触

2.1 理想传统半导体的金属接触

欧姆接触和肖特基接触是金属与传统半导体之间的两种主要接触形式。在理想条件下，金属与传统半导体之间相应的电流-电压曲线是一条直线，表明欧姆接触的接触电阻可忽略不计。然而，在传统的金属/半导体界面中，平衡条件不再类似于存在价带与导带之间能隙的体相系统。相反，界面处存在连续分布的局域态，这些局域态可能被占据，也可能为空。为了实现界面处的电荷平衡并满足带隙内的电荷平衡，直至所谓的电荷中性能级、E_{CNL}的局域态会被占据，而其上方的局域态则为空。因此，为满足平衡条件，界面处的费米能级必须位于该值或接近该值，即$E_{\mathrm{F}} = E_{\mathrm{CNL}}$ [31]。传统半导体在界面处的价带和导带

因此，半导体能带会相应弯曲并固定在界面处（图 2a-b）。这会形成界面耗尽区，该区域内的电荷通过费米能级的微小偏移来平衡，使其偏离 E_{CNL}，从而确保半导体-金属界面处达到电荷平衡。在理想金属–传统半导体接触中，肖特基势垒的高度主要受金属功函数影响 [32,33]。因此，肖特基势垒高度（SBH）等于金属功函数 $q \cdot \phi_m$ 与半导体电子亲和能 $q \cdot \chi$之差。内建电势 V_{bi}等于金属功函数 $q \cdot \phi_m$ 与半导体功函数 $q \cdot \phi_s$之差。因此，SBH 和 V_{bi} 可用以下公式表示：

$$SBH = q \cdot \phi_m - q \cdot \chi \tag{1}$$

$$V_{bi} = q \cdot \phi_m - q \cdot \phi_s \tag{2}$$

需要指出的是，较高且较宽的肖特基势垒会损害器件性能，因为电荷耗尽会导致界面电阻异常增大。在极端情况下，整个界面层的电荷都可能耗尽，因而无法测得电导率 [34,35]。

选择具有合适功函数的金属，可以最大限度地降低理想金属/传统半导体界面的肖特基势垒高度。调节界面电荷密度的另一种重要方法是在金属-传统半导体异质结两端施加偏置电压 [36,37]。考虑金属与 n型半导体之间的接触，其中 $q \cdot \phi_m > q \cdot \phi_s$，施加正向偏压可以减小$V_{bi}$ 与耗尽区宽度之间的差异，从而增加界面电荷注入。相反，反向电压会增大V_{bi} 与耗尽区宽度之间的差异，进而增大接触电阻（图 2c-d）。然而，实际金属/传统半导体界面的肖特基势垒高度无法通过施加偏置电压来调节。

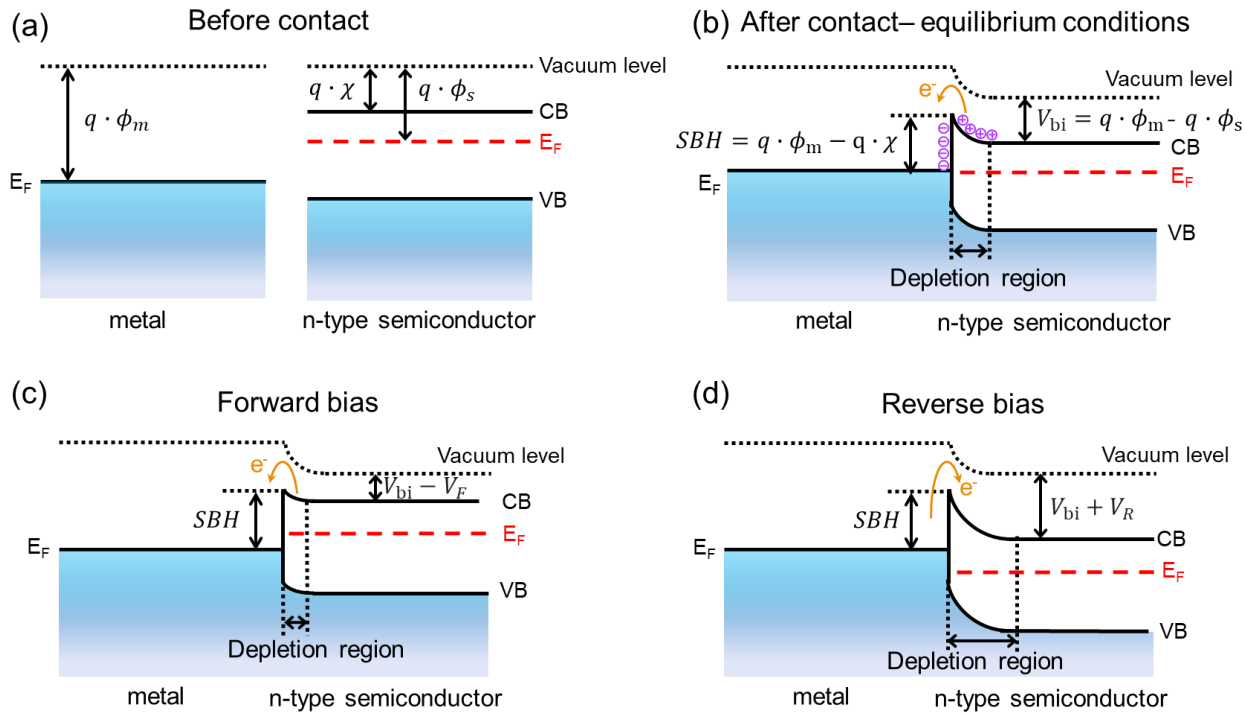


图 2. (a) 接触前，独立金属和半导体（n型）的能带图。其中，$q \cdot \phi_m > q \cdot \phi_s$。肖特基势垒的能带图：(b) 平衡条件下，(c) 正向偏压 V_F 和 (d) 反向偏压 V_R。在正向偏压下，大量电子可以从半导体流向金属。

2.2 费米能级钉扎

与传统半导体相比，某些二维过渡金属硫族化合物具有多项优势，包括高载流子迁移率、可调带隙、大比表面积和机械柔性[18,38]。这些特性使其在各类电子器件，尤其是场效应晶体管（FET）中极具应用前景。将二维过渡金属硫族化合物集成到电子应用中的关键步骤，是在二维过渡金属硫族化合物与金属电极、连接器和支撑衬底之间建立可靠接触[8-10]。金属/二维过渡金属硫族化合物界面的结构和电学性质深刻影响纳米电子器件的性能。实现欧姆接触对于确保电子器件中金属与二维过渡金属硫族化合物之间的高效相互作用至关重要。鉴于金属–二维过渡金属硫族化合物接触具有卓越特性，亟需全面理解其基本原理。

与理想金属–传统半导体接触不同，费米能级钉扎对金属–二维过渡金属硫族化合物接触有着显著影响。因此，金属与过渡金属硫族化合物材料之间的肖特基势垒对金属功函数的变化不太敏感，这使得难以通过调整金属功函数，使其与二维过渡金属硫族化合物材料的功函数相匹配来实现欧姆接触[39]。尽管费米能级钉扎的负面影响已广为人知，但这一现象的起因尚无定论。在一项涉及机械剥离 MoS_2，的研究中，McDonnell 等人将费米能级钉扎归因于表面缺陷以及与化学相关的 MoS_2 化学计量比变化[40]。Addou 等人开展的另一项全面实验研究证实，结构缺陷、类金属缺陷、硫族元素空位及其他元素杂质是导致费米能级钉扎的主要原因[41]。另有实验和计算研究发现，由于非均匀性和界面晶格应变，Au、Pd 和 Ag 等金属纳米结构的存在会直接影响金属–过渡金属硫族化合物接触的界面性质和电子性质[42-44]。

还有研究将费米能级钉扎的起始归因于吸附污染物形成的表面态，McDonnell等人[45]的研究进一步支持了这一观点。具体而言，通过比较高真空（~1×10^{-6} mbar）和超高真空（~1×10^{-9} mbar）条件下 Ti-MoS_2 界面的形成过程，可以发现界面会形成 TiO_2。金属钛可与界面处的 MoS_2 迅速发生反应，形成单质钼、Mo_xS_y和 Ti_xS_y，进而主导接触行为，并导致相对较高的接触电阻[46]。相反，沉积的 TiO_2 不会与 MoS_2 层发生反应。然而，TiO_2 污染物的意外引入会导致热边界电阻增加[47,48]，进而影响界面接触性质。

此外，值得注意的是，材料集成和器件制造工艺不可避免地会导致界面化学反应、互扩散以及缺陷诱导带隙态[49]，这些状态可作为电子或空穴的储库，从而钉扎费米能级[49,50]。此类晶格缺陷和界面损伤可能由辐照或电离技术引起；在这些技术中，金属沉积过程中高能原子轰击接触区域，并导致强烈的局部加热[13,14]。在III–V族半导体中通常可以观察到此类效应[51]。

通过密度泛函理论（DFT）计算，Gong*et al.*报告称，金属-MoS_2 接触处的费米能级钉扎机制，作为金属/二维过渡金属硫族化合物界面的独特机制，有别于传统金属-半导体结中的钉扎效应[52]。金属–二维过渡金属硫族化合物界面处的费米能级钉扎源于两种主要机制。具体而言，电荷重新分布诱导界面偶极子形成，进而导致金属功函数发生变化。计算结果表明，对于 Al 等具有较深 d带的金属衬底，其 d带能级低于 *s* 带和 *p* 带，因而有效金属功函数增大；而对于 Ag、Au、Ir、Pd 和 Pt 等其他衬底，功函数则降低。这些结果总体上与另一项计算研究一致。该研究涉及多种第I—IV族金属在 MoS_2 上的吸附，并观察到 MoS_2-金属体系的功函数降低[53]。然而，另一项研究表明，电荷转移方向（进而影响偶极子方向）取决于界面构型，如铂纳米颗粒吸附于 MoS_2[54]上的情况所示。

Gong 等人提出的第二种机制是带隙态的形成，这与金属诱导带隙态（MIGS）不同。后者主要呈现 Mo *d*轨道特征，这是由于层内 S–Mo 键合减弱，并与界面处的金属–S相互作用有关。然而，Kerelsky 等人在图 3a-b 中展示的扫描隧道显微（STM）研究得出了不同结论：MoS_2-金属界面 2 nm 范围内电子性质的形成主要由局域态密度主导，这与 MIGS 的特征一致（图 3c）[55]。Chen 等人在另一项密度泛函理论（DFT）研究中提出了反对 Gong 等人所述第二种机制的论据；该研究考察了吸附在 Ir、Pd 和 Ru 衬底上的单层 MoS_2，并记录到部分费米能级钉扎，以及电荷从金属衬底向单层 MoS_2 转移（图 3d-e）[56]。尽管该研究中也有迹象表明 MIGS 机制存在，但单层 MoS_2的厚度限制了费米能级钉扎的程度，因为界面态的形成受到空间范围的限制[57]。

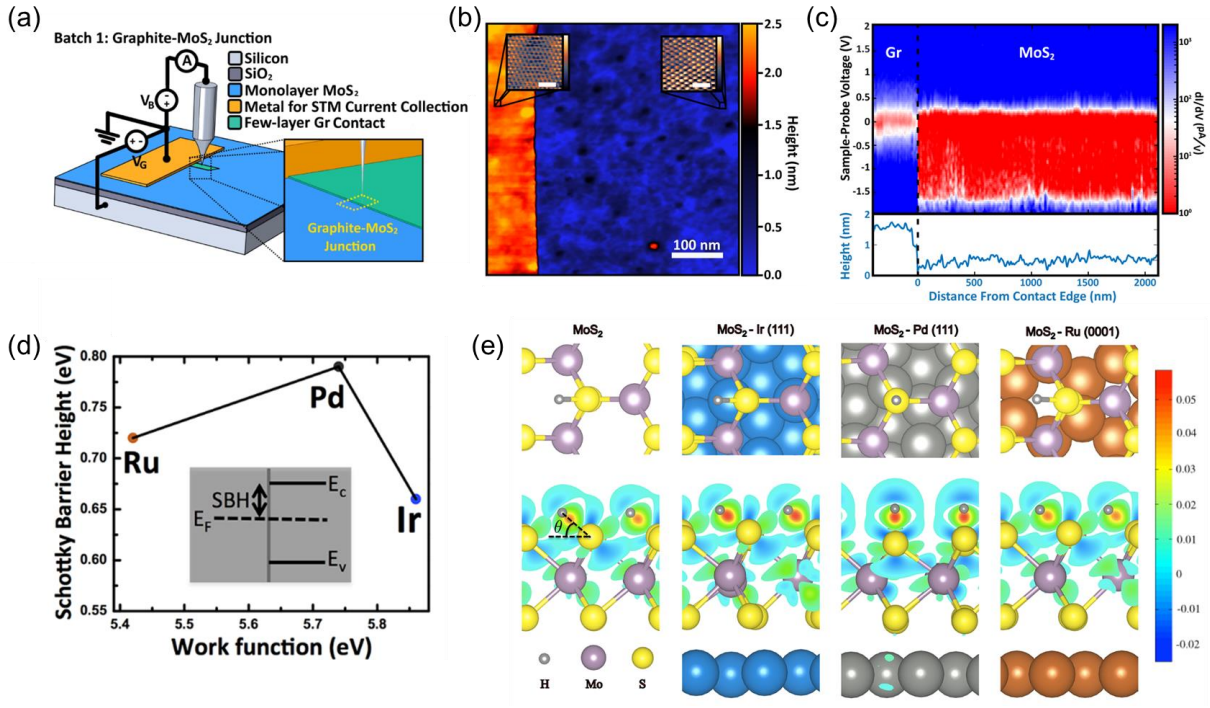


图3. 石墨-MoS_2 结的实验装置。(a) 器件示意图；(b) 单层-MoS_2, 上方石墨电极边缘处的STM形貌图；(c) 样品上的短（~9 nm）dI/dV线剖面的彩图，以及图底部标示的接触边缘大致位置。(d) 金属-MoS_2 界面的肖特基势垒高度取决于相应的功函数；(e) 顶视图和截面图，显示自由悬空MoS_2, 、MoS_2/Ir、MoS_2/Pd和MoS_2/Ru的电荷转移密度。(a)–(c) 改编自参考文献[55]，经美国化学会许可，版权归2017年所有。(d) 根据参考文献[56]转载，经美国化学会许可，版权归2013年所有。

2.3 金属-TMD接触基础

二维过渡金属硫族化合物与金属界面处的结构和电子行为会显著影响二维电子器件的性能[58]。金属–二维过渡金属硫族化合物接触包括共价键接触和范德华界面，这一点已由先前针对 MoS_2/Ti 和 MoS_2/Au 等体系的理论研究指出[59,60]。然而，界面处费米能级钉扎的出现，会削弱通过在二维TMD表面沉积金属或进行光刻而形成的异质结构的性能[15,39,52]。由.....开展的原子尺度表征研究

扫描透射电子显微镜（STEM）对金属–二维过渡金属硫族化合物界面提供了重要证据，表明器件性能的下降与界面金属原子侵入导致接触层中的二维过渡金属硫族化合物受损有关[39,61,62]。为规避这一问题，研究人员探索了通过插入额外范德华层（如石墨烯[63]或六方氮化硼（hBN）[64]）来进行界面工程。为寻求金属-TMD界面处理想的范德华接触，研究人员还研究了金属薄膜的机械转移[61]以及亚单层铟的注入[10]。

一些研究提出，MoS_2/金系统等金属-TMD接触具有范德华性质，而非共价键性质。去除金衬底后，单层MoS_2 的光学和电子性质与直接剥离到绝缘衬底上的半导体1H相相似[65–67]。这表明金属衬底赋予过渡金属硫族化合物层的界面效应具有可逆性[66,68]；然而，仍需共同努力来理解金属-TMD接触处的相互作用及这些相互作用所产生的影响。

为进一步理解过渡金属硫族化合物-金属相互作用的本质，Popov从头算密度泛函理论研究等人开展了一项研究，以探究接触区域的几何结构、成键和电子结构的影响[59]。结果表明，与能与金形成有利硫醇键的化学不饱和硫不同，MoS_2 中的硫原子已完全饱和，不会与Au原子形成强键。这导致MoS_2层中的硫原子与最近的邻近Au原子之间存在较大间距–该间距大于Au-S共价键长。该距离有效抑制了任何高效的波函数重叠，因而在Au-MoS_2 界面之间形成物理间距和隧穿势垒，使电子注入效率低下。对于Ti-MoS_2 接触，硫原子与最近Ti原子之间的距离明显小于Au-MoS_2 界面处的距离。原则上，由于费米能级处具有更高的态密度以及更高的界面载流子密度，这使MoS_2/Ti成为更有利的体系。然而，实验研究仍表明Ti-过渡金属硫族化合物接触中的电荷注入受到限制[69]。尽管其对于电子注入而言是低效接触[70]，但采用Au接触的场效应晶体管系统通常具有最低的接触电阻，这归因于Au-过渡金属硫族化合物接触处较弱的费米能级钉扎效应[71]。

3. 界面效应与接触工程：克服接触电阻的最新进展

金属–二维过渡金属硫族化合物接触中固有的费米能级钉扎效应，使二维过渡金属硫族化合物与金属之间难以实现精确的能带对齐，导致能带垂直方向上形成肖特基势垒。这些较高的肖特基势垒对实现理想的欧姆接触构成了重大障碍。因此，目前的研究工作集中于探索各种工程策略来克服这一挑战，旨在减弱界面费米能级钉扎并提升金属–二维过渡金属硫族化合物器件的器件性能。尽管实验诱导因素可能导致接触电阻和费米能级钉扎的出现，但通过金属沉积和光刻工艺[12,72]，这些不利影响或许能够得到缓解。然而，潜在的界面相互作用过程，例如金属与过渡金属硫族化合物体系之间的范德华力和杂化，源于材料的固有性质。因此，解决这些过程是一个更为根本、也更具挑战性的问题。

3.1 界面相互作用与杂化

界面杂化工程（如图4所示）会显著影响费米能级钉扎。利用二维过渡金属硫族化合物与金属之间的界面相互作用和原子级杂化，是借助费米能级钉扎效应改善欧姆接触的有效策略[12]。界面杂化工程主要包括两种策略。首先，增强二维过渡金属硫族化合物与金属之间的相互作用，可直接调控界面杂化。强化这种相互作用能够促进二维过渡金属硫族化合物的金属化，从而有效减轻费米能级钉扎效应的不利影响。其次，减弱金属与二维过渡金属硫族化合物之间的相互作用，以实现较弱的界面杂化，可通过减少带隙态的存在来减轻费米能级钉扎效应。

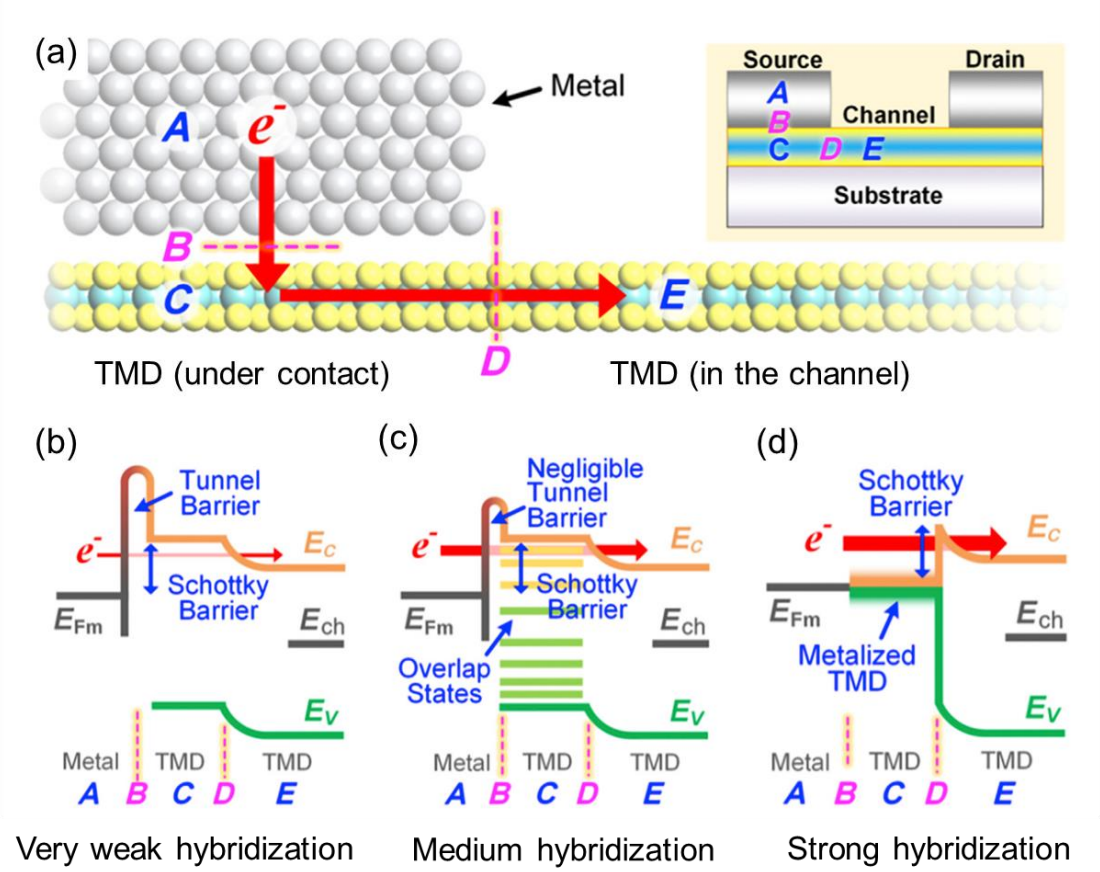


图4。（a）典型金属-MoS_2 接触截面示意图（n型顶接触）。三个区域以字母A、C和E表示，将它们分隔开的两个界面为B和D。红色箭头表示从接触金属（A）到MoS_2 沟道（E）的电子注入路径。插图中展示了典型背栅场效应晶体管的沟道区域以及源极和漏极连接。（b）–（d）三种界面杂化类型的能带图。（b）极弱杂化导致范德华隧穿势垒的能带图。（c）中等杂化诱导界面态的能带图。（d）强杂化导致过渡金属硫族化合物金属化的能带图。（a）–（d）经美国化学会许可转载自参考文献[60]，版权归美国化学会所有，2014年。

3.1.1 强界面杂化

界面杂化强度主要依据若干关键标准进行评估，包括二维过渡金属硫族化合物带隙内的轨道重叠、肖特基势垒和隧穿势垒 [60]。通常，较小的原子尺寸，以及在二维过渡金属硫族化合物和金属中使用相同的金属元素

导致物理间距减小，具体而言，是金属原子与硫属化物原子在z方向上的最近核间距。这些减小的物理间距可能形成极薄的隧穿势垒和强烈的轨道重叠 [60]。原子轨道数量的增加及其较大的尺寸 在E_F 附近对金属与二维过渡金属硫族化合物轨道的实空间重叠具有显著影响，从而导致金属–二维过渡金属硫族化合物接触中强烈的能带杂化 [20]。这种强烈的轨道重叠会导致二维过渡金属硫族化合物能带结构发生显著畸变，并使原始带隙中出现重叠态。因此，接触区域下二维过渡金属硫族化合物的电子性质会发生显著改变，表现为二维过渡金属硫族化合物的强烈金属化以及显著降低的肖特基势垒 [73]。消除肖特基势垒并消除金属/二维过渡金属二硫族化合物界面处的费米能级钉扎效应，是理想欧姆接触的目标。

在实验方面，Li 等人报道，通过单层-MoS_2 与半金属Sb（$01\bar{1}2$）之间的能带杂化，可将[illegible]界面处发生电荷转移（图5a），并有效地将MoS_2 导带向下拉至E_F以下。利用转移长度法（TLM）器件，测得由MoS_2–Sb（$01\bar{1}2$ ）构成的场效应晶体管具有优异的接触电阻R_c，其数值为 42 Ω·μm。导通态电流达到1.23 $mA\cdot\mu m^{-1}$ ，开关比超过10^8 ，本征栅极延迟为74 fs。所有这些数值均优于此前的报道。Kim 等人发表的独立密度泛函理论结果进一步证实了这些实验结果，表明MoS_2与In导带边缘态之间形成的杂化，是MoS_2 与金属接触之间实现欧姆电荷注入的微观起源（图5b） [74]。

通过硫族元素空位和间隙原子进行掺杂，是调控金属与二维过渡金属硫族化合物之间相互作用的另一类有前景的方法。硫族元素空位可增强二维过渡金属硫族化合物与各种金属之间的轨道重叠。这是因为这类空位会减小金属−2D-过渡金属硫族化合物接触处的界面物理距离，进而抑制隧穿势垒并降低接触电阻。有趣的是，由于界面电荷转移开始发生，硫族元素空位会使过渡金属硫族化合物–钯接触从 n 型界面转变为 p 型界面 [71]。在间隙掺杂过程中，掺杂的硫族原子会与金属原子相互作用，从而缩短键合距离，并改善某些材料中的电荷注入

金属–2D-TMD 界面 [71]。该方法可有效降低以下材料的接触电阻：MoS_2 与铬和钯、$MoSe_2$ 与金、WS_2 与金，以及 WSe_2 与铬和镍 [75,76]。

通过边缘接触法也可以实现强界面杂化 [21]。TMD与金属之间的边缘接触，其物理间距远小于顶接触。更小的物理间距以及二维过渡金属二硫属化物边缘处悬挂键的存在，会增强边缘接触界面的杂化 [60,77]。与顶接触相比，这种结构能够增强载流子注入，并形成更窄的隧穿势垒。Wang 等人报道了一维边缘接触的制备方法（图5c-d）[78]。在这种情况下，三维金属电极通过金属化的一维石墨烯边缘与单层石墨烯相连 [79-81]。尽管载流子注入仅限于石墨烯层的一维原子边缘，接触电阻仍可低至100Ω·μm。然而，由于接触面积很小，边缘接触法在技术上难以实现。基于此，Song，等人提出了一种新技术——利用热稳定二维金属$_9PtTe_2$ 作为外延模板，使单层MoS_2 横向生长，从而制备低电阻边缘接触（图5e）。

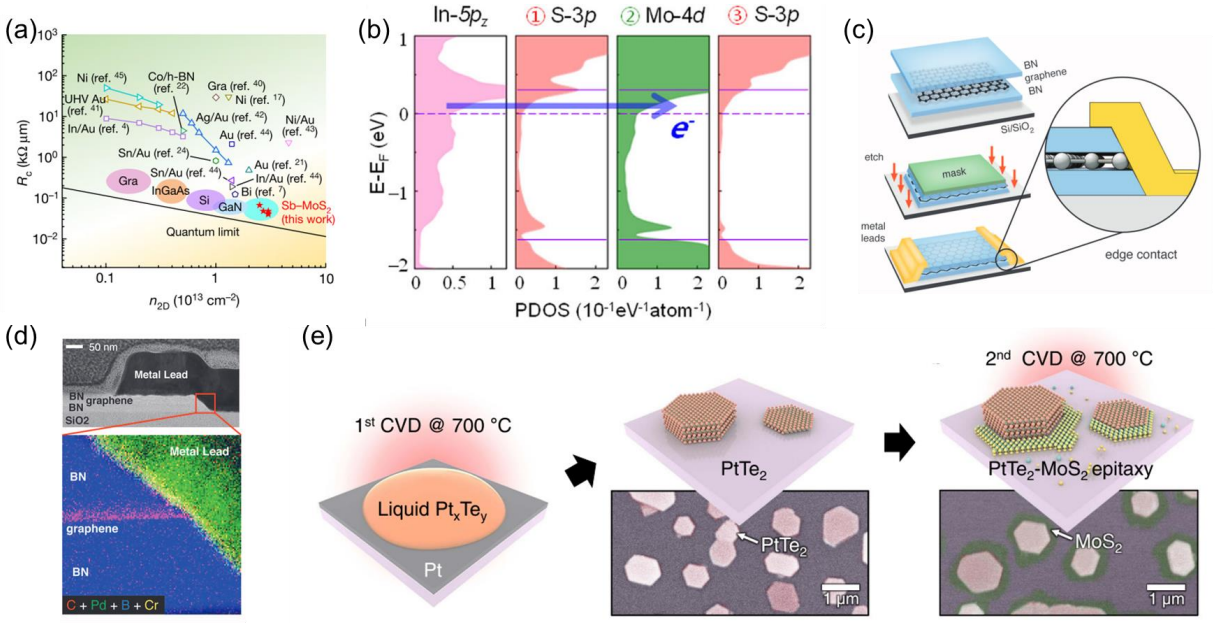


图5. (a) 示意图显示了在载流子浓度（n_{2D}）为 3×10^{13} cm^{-2} 时，42 Ω μm 的最低接触电阻（R_c），非常接近量子极限。(b) 这四种图案化分别对应 In-5p_z、S-3p、Mo-4d 和 S-3p 轨道的投影态密度。粗箭头表示电子从 In 注入这些 MoS_2 带隙态。

(c) 边缘接触制备工艺示意图，以及(d) 上图：边缘接触几何结构的高分辨率扫描透射电子显微镜图像。下图：石墨烯边缘-金属界面的伪彩色电子能量损失谱图。(e) 通过两步生长形成MoS_2-$PtTe_2$ 横向异质结构。第一步是采用化学气相沉积（CVD）法，在700 °C的生长温度下生长$PtTe_2$ 薄片。第二步是采用CVD法，在700 °C的生长温度下沿$PtTe_2$ 边缘制备MoS_2 。插图为各步骤产物的扫描电子显微镜（SEM）图案。图(a)经许可转载自参考文献[20]，版权归Springer Nature Limited所有，2023年。图(b)经许可转载自参考文献[74]，版权归Springer Nature Limited所有，2021年。图(c)-(d)经许可转载自参考文献[78]，版权归美国科学促进会所有，2013年。图(e)经许可转载自参考文献[9]，版权归Springer Nature Limited所有，2022年。

3.1.2 适度的界面杂化

不同于上一节 3.1.1 中提到的基于强金属–二维过渡金属硫族化合物杂化的接触工程，消除费米能级钉扎效应的另一种方法是减弱界面杂化 [16]。金属与二维过渡金属硫族化合物之间的适度相互作用会诱导金属诱导带隙态，使费米能级钉扎在二维过渡金属硫族化合物的带隙中，并提高肖特基势垒高度 [82]。通过在空间上分隔材料来降低界面态密度，可以从根本上缓解费米能级钉扎程度。正如 Gupta 等人在一项实验与理论研究中提出的，可通过在金属与二维过渡金属硫族化合物材料之间添加由超薄绝缘层构成的中间接触层来实现空间分隔 [83]。该技术可以减弱电子波函数从金属层中的传播，从而减少界面带隙态的形成，而界面带隙态会导致费米能级钉扎。在绝缘体/二维过渡金属硫族化合物界面处，添加绝缘层会导致偶极矩的形成，从而降低肖特基势垒高度。然而，实现最佳绝缘层厚度至关重要，因为引入该绝缘层会形成隧穿势垒，阻碍金属层与过渡金属二硫属化物层之间的载流子注入。

近期的研究进展凸显了超薄中间层在调控和改善二维过渡金属硫族化合物与金属电极之间界面性质方面的有效性。例如，Lizzit等人的密度泛函理论计算结果表明，增大金属与二维过渡金属硫族化合物之间的距离能够有效地

抑制金属诱导带隙态的形成并降低肖特基势垒高度（图6a）[82]。Andrews提出的另一种策略等人在MoS_2-Ti场效应晶体管中采用超薄二维过渡金属硫族化合物（$MoSe_2$/WSe_2）作为接触界面层，可显著降低肖特基势垒高度和接触电阻率[22]，进而显著提升器件性能（图6b）。Jang等人展示了一种金属−界面层−2D-TMD接触结构，在MoS_2与金属电极之间加入超薄ZnO中间层（见图6c）[84]。这种方法通过解除费米能级钉扎有效降低界面无序，并增强界面层/金属界面处的相互作用，从而降低肖特基势垒和接触电阻。同时，也有人提出插入碳化硅界面层，以减小强费米能级钉扎的干扰影响。以来咱已显示出良好前景，

尽管二维过渡金属硫族化合物与金属之间适度的杂化会产生金属诱导带隙态，但用半金属

属硫族化合物与半金属铋的接触，有效抑制了金属诱导带隙态，并使过渡金属硫族化合物在与铋接触时自发形成简并态（见图6d）[57]。通过这一方法，MoS_2–Bi场效应晶体管实现了零肖特基势垒高度、123 Ω·μm 的接触电阻以及 1,135 μA·μm^{-1} 的导通态电流密度。

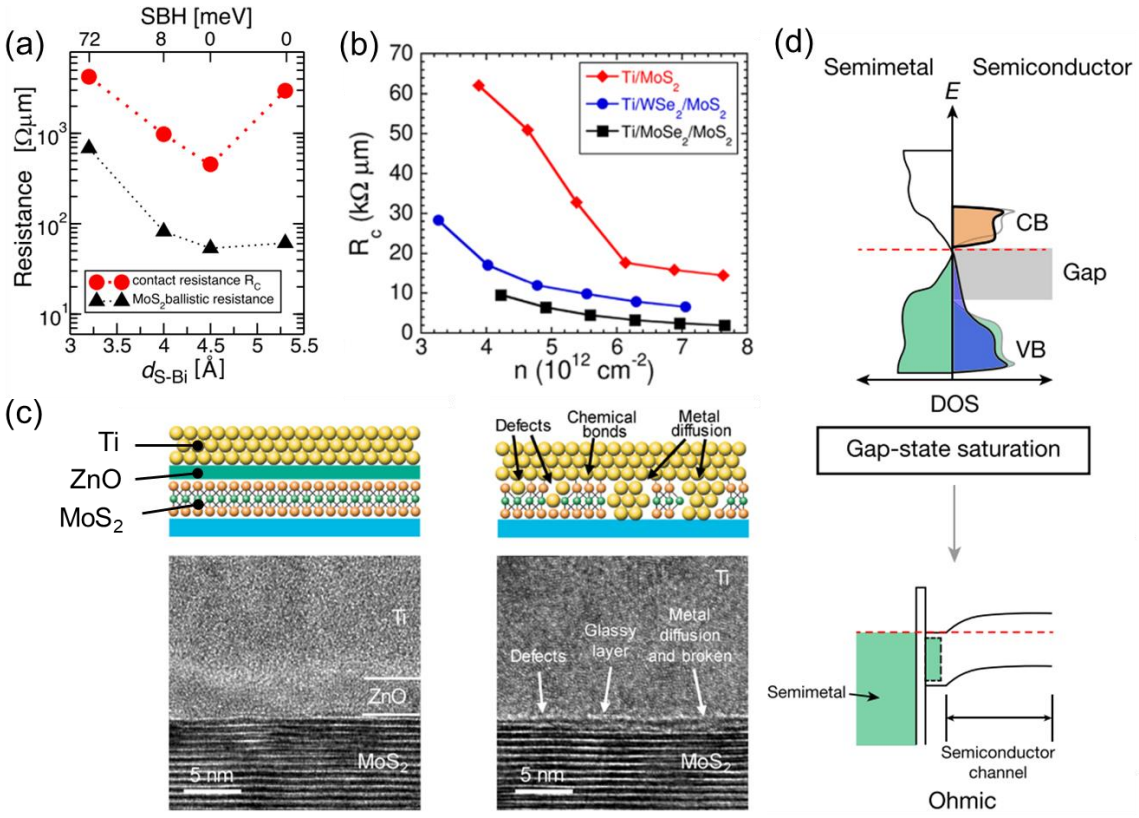


图 6. (a) Bi–MoS_2 接触中不同距离 d_{S-Bi} 对应的肖特基势垒高度（黑点）和接触电阻（红点）。(b) 比较 Ti/MoS_2，、Ti/WSe_2/MoS_2，、Ti/$MoSe_2$/MoS_2 接触在不同载流子浓度下提取的接触电阻。(c) 横截面示意图和透射电子显微镜图像显示，与 Ti/MoS2 接触（右）相比，Ti/ZnO/MoS_2 接触（左）具有更洁净的金属–半导体界面。(d) 半金属 Bi 在费米能级处较低的态密度会强烈抑制金属诱导带隙态，并抑制 TMD 中自发形成的简并态。(a) 面板转载自参考文献 82，经美国化学会许可，版权 © 2022。(b) 面板转载自参考文献 22，经美国化学会许可，版权 © 2020。(c) 面板转载自参考文献84，经美国化学会许可，版权 © 2020。(d) 面板转载自参考文献 57，经 Springer Nature Limited 许可，版权 © 2021。

根据本节介绍的一系列策略和已报道的研究，已有明确证据表明，具有强原子杂化能力的金属与二维过渡金属硫族化合物相结合，是接触材料的优良候选方案。与此同时，通过金属与

二维过渡金属硫族化合物通常需要额外的工序，例如插入缓冲层，或使用半金属材料替代金属接触。因此，强杂化和减弱的杂化路径都为实现最佳欧姆接触提供了有效策略。

3.2 范德华接触

尽管在二维过渡金属硫族化合物与三维金属基底之间制备优质范德华接触仍颇具挑战，但通过剥离石墨烯[63,86]和金属[61]，利用多层过渡金属二硫属化物形成范德华接触则取得了更大的成功，这得益于其能够形成无缺陷且洁净的范德华界面。具体而言，Wang等报道了一种单层-MoS_2与10 nm厚铟金属之间的超洁净范德华接触，其上覆盖着100 nm厚的金电极（In/Au），如图7a所示。环形暗场扫描透射电子显微镜和X射线光电子能谱证实了该超洁净范德华接触[10]。除表现出相较于其他电极材料最低的接触电阻（图7b–c）外，场效应晶体管系统的线性输出特性也表明不存在肖特基势垒（图7d）[10]。通过沉积In/Au合金接触，在其他CVD生长的二维过渡金属硫族化合物中也实现了类似的优质接触，包括NbS_2（图7e）、WS_2（图7f）和WSe_2（图7g–h）。这些结果表明，采用In/Au接触能够形成无缺陷且超洁净的范德华界面。

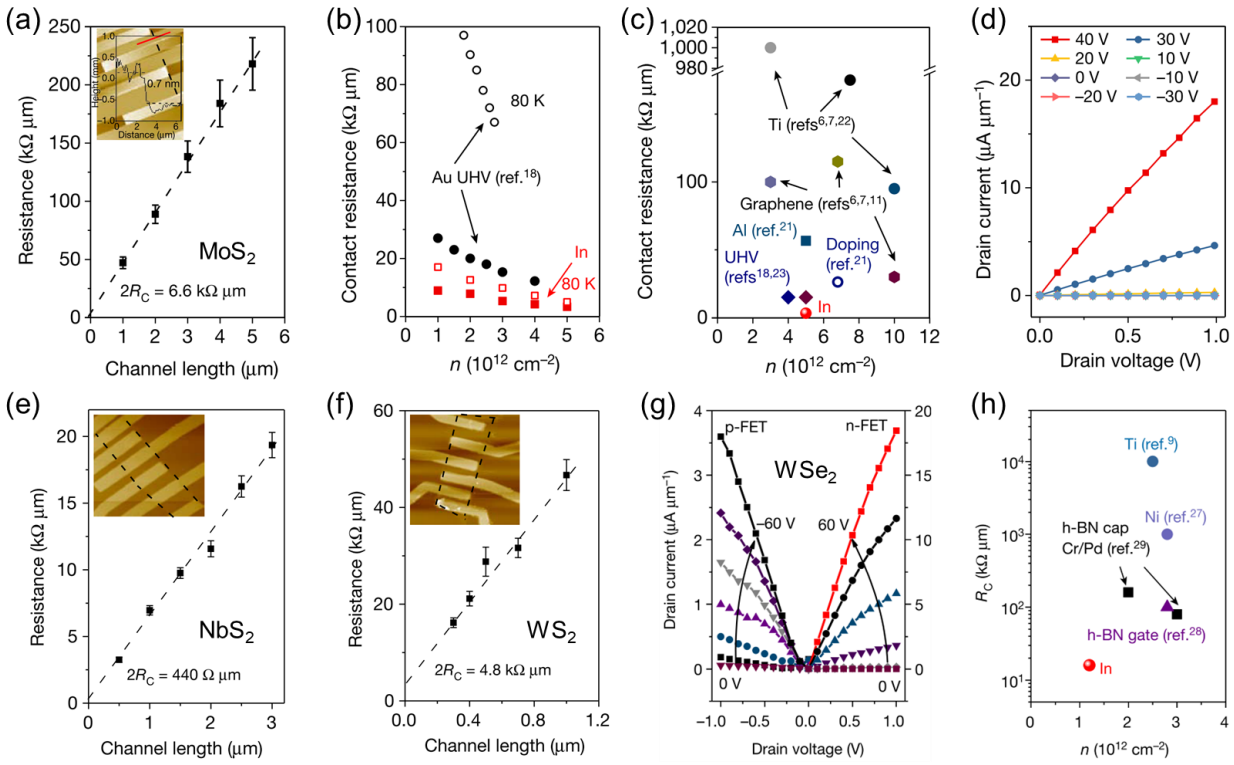


图7。 **各种基底上超洁净In/Au电极的接触电阻和器件特性**

二维过渡金属硫族化合物。（a）MoS_2-In/Au的接触电阻。（b）室温（实心点）和80 K（空心点）下，MoS_2 上In/Au电极的接触电阻与载流子浓度*n*的关系。并与金电极进行比较。（c）不同类型电极材料的接触电阻比较。（d）MoS_2- In/Au接触的线性输出特性表明不存在接触势垒。（e）单层-NbS_2, 上In/Au电极的接触电阻，以及（f）单层-WS_2的接触电阻。（g）双极性WSe_2- In/Au接触的线性输出特性；（h）与其他电极材料的接触电阻比较。图版（a–h）经许可转载自 参考文献10，Springer Nature Limited，版权所有 © 2019。

与此同时，值得注意的是，采用传统支撑载体聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）将过渡金属硫族化合物材料转移到所需的栅介质基底时，界面残留物往往会限制器件性能。为缓解这一问题，Mondal 等人提出了一种利用聚碳酸亚丙酯（PPC）作为支撑载体进行无残留湿法转移的方法 [87]。与传统 PMMA 相比，PPC 中的 C=O 键较少，因此其在过渡金属二硫属化物表面上的吸附能较弱。因此，经 PPC 转移的样品可获得超洁净、无残留的表面. 并具有均匀的

界面过渡金属二硫属化物的分布，从而在场效应晶体管器件中实现约 78 Ωμm 的超低欧[illegible]用热可分解聚碳酸丙烯酯作为缓冲层，实现了金属与二维过渡金属二硫属化物之间原子级洁净且锐利的范德华接触，这一点已通过多种显微表征得到证实[72]。

为制备稳健的电接触，同时尽量减少样品退化和无序的影响，大气氧化问题尤其给空气敏感型二维过渡金属二硫族化合物带来了挑战[88]。已有研究提出了应对这一挑战的策略。例如，Telford 等人利用电子束光刻和反应离子刻蚀在六方氮化硼中制备了一个孔洞，随后图案化形成填满该空腔的金属接触[89]。这一工作开创性地实现了在绝缘六方氮化硼薄片上散入金属接触；这类薄片因其出色的封装性能而广受认可[87]。接下来，可将这种六方氮化硼结构层压到二维薄片上，例如图 8a–c 所示的 $NbSe_2$, $MoTe_2$ 和石墨烯。由于无需对金属接触进行光刻图案化，这一技术能够尽量减少金属-TMD接触处的残留物和结构损伤的[illegible] ~10^2 Ω·μm 的量级。而且，空气敏感型单层-$NbSe_2$ 保持了较低的正常态电阻，超导转变温度为 ~3.7 K，这表明其范德华接触洁净且器件质量较高，并且长时间内保持稳定[90,91]。

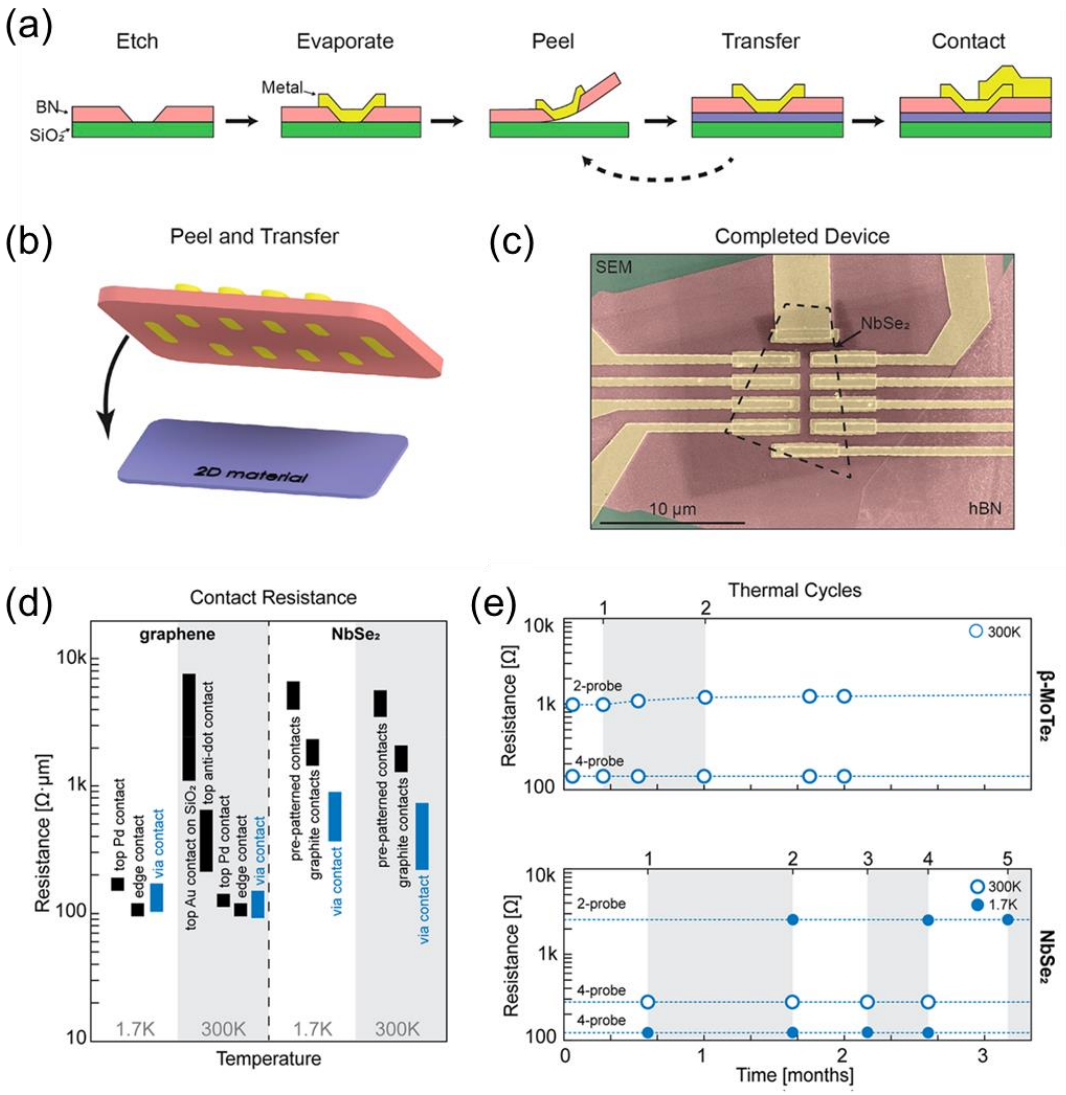
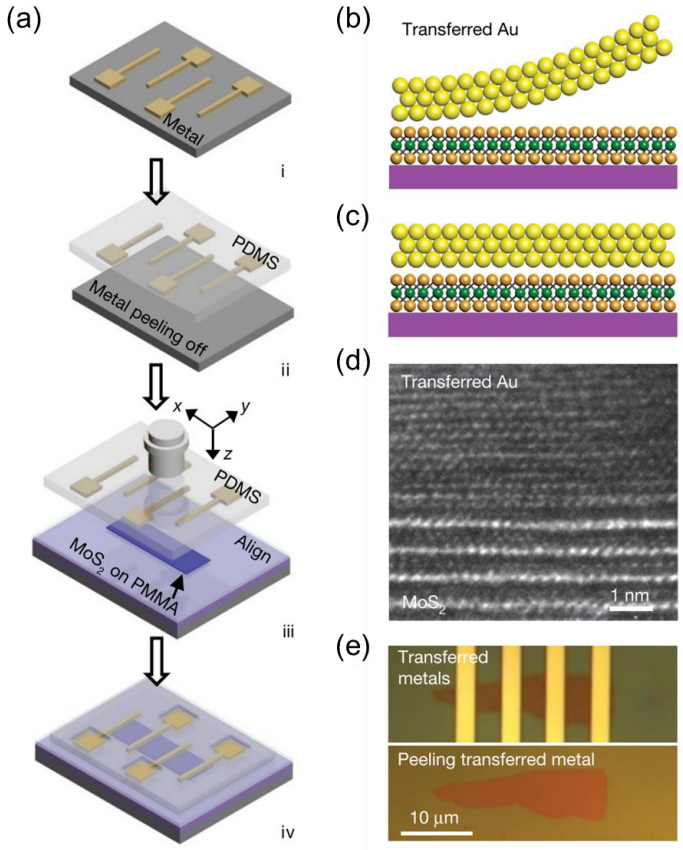


图8. (a) 接触制备工艺：将金属接触嵌入绝缘六方氮化硼薄片中，随后层压到二维TMD薄片上。(b) 在二维TMD薄片上定位接触；(c) 以 $NbSe_2$ 接触系统为例进行扫描电子显微镜成像。 (d) 比较 $NbSe_2$ 系统的接触电阻与其他已报道技术。(e) 随时间和热循环变化，带接触的 $NbSe_2$ （上）和 $MoTe_2$ （下）的二探针和四探针正常态电阻。多种配置均显示电阻随时间保持稳定。(a)–(e) 经许可转载自 参考文献 92，美国化学会版权所有，2018年。

3.3 预制金属转移

在光刻工艺中沉积金属接触的传统技术，可能不可避免地将污染物引入金属/二维TMD界

对过渡金属硫族化合物表面造成物理损伤和退化。这些影响最终导致接触性能不佳和器件[illegible]金属薄膜转移到少层 MoS_2 薄片上（图9a），且不产生任何界面化学键合[61]。这形成了不含化学无序和费米能级钉扎的范德华界面，界面系统的透射电子显微镜成像对此作了展示（图9b–e）。由于不存在这些外部实验因素的干扰，该接触的肖特基势垒可依据不受任何钉扎效应影响的肖特基-莫特定则进行有效预测[93,94]。然而，这项技术的可扩展性受到限制，因为最终需要通过对准光刻，露出热塑性聚合物下方的接触电极。为了解决这一问题，Went等人开发了金属接触转移技术：光刻图案化步骤在独立的供体衬底上进行，而非直接在器件上进行（图10a–b）[95]。利用该技术制备的垂直肖特基结 WS_2 太阳能电池采用银和金作为非对称功函数接触电极，表现出整流行为，开路电压超过 500 mV（图10c）。这与采用蒸镀接触电极制备的器件所表现出的电阻性行为形成对比。



图图9. 范德华金属–MoS_2 结的示意图和结构表征。(a) 层压的三维金属薄膜转移至少层 MoS_2 薄片上的示意图。(b–c) 转移的金电极位于 MoS_2 薄片上方的截面示意图；(d) 透射电子显微镜成像显示了原子级锐利、洁净的金属-半导体界面。(e) MoS_2-金器件的光学图像，上图为转移后的电极，下图为机械剥离转移电极后的图像。(a)–(e) 经许可转载自参考文献[61]，版权归 Springer Nature Limited 所有，2018年。

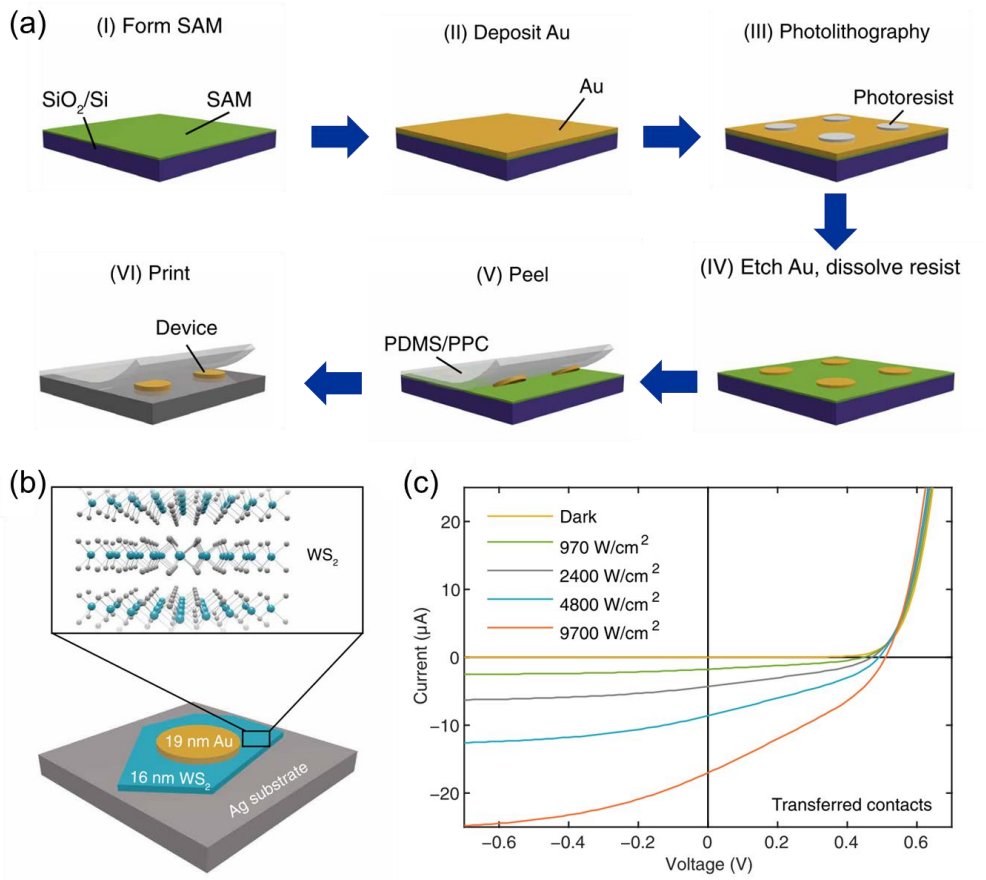


图10. 具有转移接触电极的肖特基结多层 WS_2太阳能电池的金属转移工艺示意图。（a）金属转移工艺流程。（b）具有原子层三维表示的器件结构示意图。（c）器件的功率依赖性电流-电压特性，显示出整流行为，开路电压高于 500 mV。（a）–（c）经美国科学促进会许可转载自参考文献 [95]，版权所有 © 2019。

Kong 等人采用预制的 Au 电极对，并将其物理层压到 WSe_2 薄片[23]上。与电子束光刻[illegible]

[illegible]

Kong 等人展示了一种晶圆级通用电极转移技术，通过使用聚合物缓冲层实现与半导体的[illegible]

3.4 电荷转移掺杂

通常，二维过渡金属硫族化合物与金属接触，以制备具有n型或p型掺杂的场效应晶体管。高功函数的过渡金属硫族化合物（例如MoS_2）有利于n型掺杂（图11a-b），而低功函数的过渡金属硫族化合物（例如WSe_2）则倾向于p型掺杂，从而有利于电子转移至金属[39]。金属/二维过渡金属二硫族化合物界面处的费米能级钉扎效应往往会将金属的费米能级钉扎在接近过渡金属硫族化合物价带的位置[12]。因此，n型器件最为常见。正如前文所述，n型电接触有多种降低接触电阻的方法。而对于包括某些类别晶体管和发光二极管在内的p型系统，在这些系统中电子导电并不理想或空穴导电更具优势，获得低接触电阻的p型电接触仍然是一项挑战。解决这一问题的另一种策略是对半导体-金属接触进行掺杂，以降低肖特基势垒高度，从而更有效地促进载流子通过界面的量子力学隧穿。尽管这种方法已被证明能够有效地在传统硅基金属氧化物半导体场效应晶体管中建立欧姆接触，但要在二维半导体系统中精确控制和界定掺杂工艺，仍面临诸多挑战[99,100]。

表面电荷转移掺杂法已成为绕过上述限制、为二维过渡金属硫族化合物器件构建p型欧姆接触的最有效方法之一，即使在低温区也适用[101]。该技术依赖二维薄膜与周围环境之间的电荷转移，转移媒介包括表面吸附物、吸附层/介电覆盖层和衬底[102,103]。二维材料裸露的基面为掺杂剂通过化学键合或物理吸附附着于表面提供了有利环境，从而促进掺杂过程。该方法能够促进界面电荷转移，同时最大限度地减少在掺杂材料晶格结构中引入大量缺陷，从而在很大程度上保留其基本输运特性[104]。与会在二维晶格中造成缺陷的传统离子注入工艺不同，表面电荷转移掺杂具有选择性区域掺杂的特点，且处理温和，不会在薄膜中产生任何无序；同时，掺杂剂与半导体二维过渡金属硫族化合物层之间的电子亲和能差异会导致载流子注入或抽取，从而调控系统的电导率（图11c）。

基于这一前提，Wang 等人报道了蒸镀高功函数金属（Pt 和 Pd）

于二维过渡金属硫族化合物上，以形成洁净的范德华接触，从而有效缓解金属—二维过渡金属硫族化合物界面处的费米能级钉扎效应，并实现了纯 p 型场效应晶体管 [105]。这类 p 型场效应晶体管具有优异的输出特性，饱和空穴电流约为 4 μA μm^{-1} （图11d-e）。此外，Chen 等人提出了一种新方法，采用高电子亲和能过渡金属氧化物 MoO_3, ，对电极下方的单层 WSe_2 进行重度掺杂，随后形成欧姆行为的单层 WSe_2 场效应晶体管，其工作温度低至 10 K [24]。随后，Xie 等人[106]利用 WSe_2/α-$RuCl_3$ 异质结构中的强空穴转移掺杂和高电导率，制备了高性能 p 型 WSe_2 场效应晶体管。这是因为与 α-$RuCl_3$ 的导带底相比，WSe_2 具有显著更高的价带顶（见图11f插图），为实现低电阻 p 型 WSe_2 晶体管提供了有利条件。该方法报道的开态漏极饱和电流最高可达 35 μA μm^{-1}，室温下开关比为 ~10^9（图11f-g）。Das 等人 [107]的另一项研究则通过在厚层 $MoSe_2$ 和 WSe_2 中以 V、Nb 和 Ta 替位掺杂过渡金属，实现了 p 型二维场效应晶体管。他们巧妙地设计了一种新型 p 型二维场效应晶体管，由单层二维过渡金属硫族化合物沟道和掺杂多层接触区构成。该策略实现了高于 ~10^4 的开关电流比和低至 ~2-5 kΩ μm 的接触电阻。此外，高电负性的金属 Pd 可充当电子受体，从而在金属—过渡金属硫族化合物界面形成强杂化。

双层 WSe_2 与金属层之间的层间耦合也会改变界面电子能带结构，而自旋轨道耦合则会改变 WSe_2–金接触处的极性[71,108]。这些因素共同使金属–过渡金属硫族化合物体系呈现 p 型。

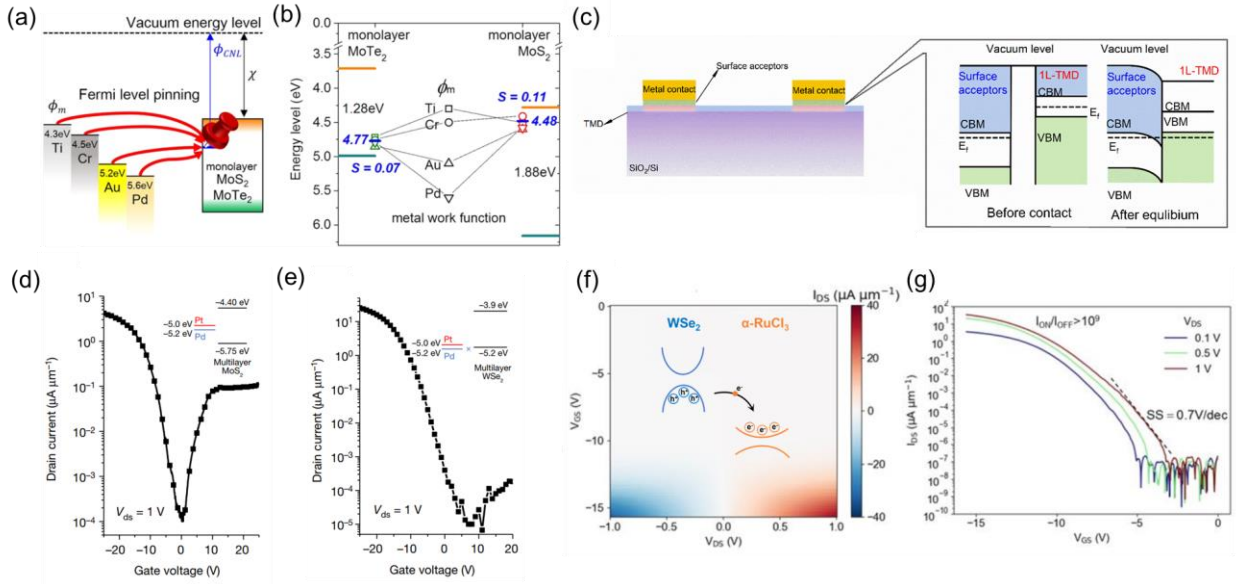


图11。（a）各种金属和单层过渡金属硫族化合物的能带结构。（b）金属–MoS_2/过渡金属硫族化合物界面处费米能级钉扎效应示意图。（c）高电子亲和能表面受体与二维材料之间电荷转移过程的示意图。漏源电流随栅源电压变化的关系：（d）MoS_2-钯和（e）WSe_2-铂接触，与n型相比呈现出更优异的p型特性。（f）单层WSe_2 场效应晶体管的输出映射显示，最大I_{DS} （漏源电流）为35 μA $μm^{-1}$。插图为WSe_2 与α-$RuCl_3$的能带对齐。箭头指示电子流方向。（g）不同漏源电压下漏源电流的开关比。（a）–（b）图经许可转载自参考文献[39]，版权归美国化学会所有，2017年。（d）–（e）图经许可转载自参考文献[105]，版权归Springer Nature Limited所有，2022年。（f）–（g）图经许可转载自参考文献[106]，版权归美国化学会所有，2024年。

4. 应用

4.1 电子器件

二维过渡金属硫族化合物材料凭借其独特而优异的电子性质，在电子器件领域得到了广泛应用。电子器件种类繁多，包括二极管、场效应晶体管、集成电路、非易失性存储器[105,109,110] 等。为了提升器件性能并优化其效率，必须尽可能降低接触电阻，以满足新一代电子器件的需求。一种新颖的方法已被提出

由 Sheng 等人在制备基于二维过渡金属二硫属化物的晶体管时，采用软等离子体处理去除硫端原子，并将中间的钼原子与金属电极直接连接 [109]。通过软等离子体处理去除硫原子会改变过渡金属硫族化合物的能带结构，并将原有的金属-半导体接触转变为金属-金属接触，从而提升所制备场效应晶体管的性能。Kim 等人还展示了引入氧化锌纳米线栅场效应晶体管可获得良好的开关电流比 [110]。具体而言，研究人员利用长的一维氧化锌纳米线作为栅电极，制备了二维过渡金属二硫属化物沟道场效应晶体管和二维过渡金属二硫属化物互补非易失性存储器。Wang 等人报道了采用高功函数金属电子束蒸发技术制备的具有二极管特性的高性能场效应晶体管 [105]。该电子束蒸发技术在高功函数金属与二维过渡金属硫族化合物之间形成了无界面缺陷范德华接触。MoS_2 和 WSe_2 器件的功率输出、功率转换效率、响应度和外量子效率等关键性能均处于已报道结果中的最高水平 [105]。

4.2 自旋电子器件

对于采用二维过渡金属二硫属化物（二维过渡金属硫族化合物）的器件，亟需开发新的工[illegible]的集成引起了广泛关注。采用这种结构的战略考量，源于石墨烯狄拉克锥位于过渡金属二硫属化物材料半导体带隙内这一有利位置。这种空间排布可确保π带的存在，同时有利于有效引入来自过渡金属二硫属化物层的自旋轨道耦合效应[111-113]。Dankert 和 Dash 展示了在室温下通过电栅调控石墨烯-MoS_2 范德华异质结构中自旋流及其寿命的可调性[illegible]。研究[illegible]构中，WS_2 或 MoS_2 可引发各向异性自旋动力学 [115,116]。面内自旋与面外自旋的寿命相差超过一个数量级，且面外自旋的寿命更长。这一发现表明，过渡金属二硫属化物层的强自旋-谷耦合印刻在异质结构中，进而影响传播的自旋[117]。Ghiasi 等人在另一项 $MoSe_2$-石墨烯异质结构研究中也观察到了类似现象

显示面外自旋的寿命长了一个数量级（$\tau_{\perp}\approx$40 ps），相比之下，面内自旋的寿命为（$\tau_{/\!/}\approx$3.5 ps）[118]。因此，自旋电子学及自旋电子器件对于过渡金属二硫属化物材料将变得愈发重要。

4.3 光电子器件

除了卓越的电子和自旋性质外，二维过渡金属硫族化合物的光学特性，尤其是其单层厚度

化合物作为光电子材料的吸引力。源于其固有的透明性、机械柔性、丰富的带隙选择以及便捷的材料加工能力。通过调控过渡金属硫族化合物层的数量，还可以调节带隙，使其成为适用于不同波长的高效光探测器[121,122]。此外，与半导体对应相相比，金属相和准金属相过渡金属硫族化合物表现出显著更高的光电流，因此在各种光电子器件应用中具有广泛用途[ ]。Yamaguchi 等开展的研究采用了一系列实验技术，包括扫描光电流显微镜

5. 总结与展望

5.1 总结

在本综述中，我们回顾了金属与传统半导体以及二维过渡金属二硫属化物（TMD）接触的不同情况。选择功函数匹配的金属电极，是降低金属-传统半导体接触中肖特基势垒的一种简单有效的方法。然而，金属功函数值并不能直观地预测二维过渡金属硫族化合物材料的接触特性。以往研究表明，由于界面缺陷、金属诱导带隙态（MIGS）和化学畸变，费米能级钉扎（FLP）是克服金属/二维过渡金属硫族化合物界面接触电阻的主要障碍。因此，克服接触电阻的关键在于消除或减弱金属–二维过渡金属硫族化合物接触中的费米能级钉扎。为此，人们已提出多种工程策略

来应对金属接触中费米能级钉扎的挑战–二维过渡金属硫族化合物。通过界面杂化工程、范德华接触、金属机械转移和电荷转移掺杂，可以实现无费米能级钉扎的接触。较大的原子轨道、较小的物理间距、硫族元素空位、硫族元素间隙掺杂以及边缘接触，均可促进金属/二维过渡金属硫族化合物界面发生强烈的轨道杂化，从而降低肖特基势垒。插入缓冲层能够消除金属诱导带隙态，并在适度界面杂化的情况下促进载流子注入。预制金属转移和超洁净范德华接触也能提升纳米尺度下的器件性能。鉴于这类材料性质脆弱，表面转移掺杂法已被证明是为过渡金属硫族化合物材料形成 p 型欧姆接触的有效方法。

5.2 展望

尽管金属–二维过渡金属硫族化合物接触前景广阔、发展潜力不断提升，但要针对特定应用优化其性能，仍面临诸多挑战。实现低接触电阻和高效电荷载流子注入仍是一项艰巨任务，需要复杂的工程解决方案，并精确控制界面特性。尽管如此，研究人员已投入大量精力，通过理论计算和实验结果，寻找适用于形成欧姆接触的金属材料。这些研究工作的主要目标是尽可能降低并克服阻碍二维过渡金属硫族化合物器件发展的接触电阻。理解金属-二维过渡金属硫族化合物界面处费米能级钉扎的机制至关重要，因此有必要进一步从科学角度阐明这一问题。此外，旨在降低接触电阻的策略也面临诸多障碍。界面杂化研究的预测表明，金属与过渡金属二硫属化物之间的强杂化可以使下方的过渡金属二硫属化物金属化，并消除隧穿势垒，从而降低接触电阻。然而，实际条件带来了挑战：过渡金属硫族化合物具有原子尺度厚度和洁净表面，容易受到环境表面吸附物的影响，因而限制了杂化 [39]。插入缓冲层虽可改变过渡金属硫族化合物与金属之间的界面，但其降低接触电阻的效果有限。将界面杂化工程拓展至超薄二维半导体器件仍是一个有待解决的问题 [126]。为推动未来发展，样品制备和接触组装过程中提高金属–二维过渡金属硫族化合物界面的纯净度至关重要。

还需要进一步研究，以克服界面杂化工程中的强费米能级钉扎和高接触电阻等挑战。成功降低金属–二维过渡金属硫族化合物接触的接触电阻，对于实现优异的器件性能至关重要。

从更长远的时间尺度来看，必须考虑这样一个最终目标：将这些基础技术与先进制造工艺开发并整合起来，并将其规模化，以服务于未来先进的电子、光电子、能源及新兴技术 [127]。尽管这似乎是在二维过渡金属硫族化合物系统领域对接触电阻进行规模化提升和优化的概括，但在推动该领域发展并最终将其应用于实际器件时，必须综合考虑有关基本范德华机制、器件工程、制造技术和方法学的复杂细节。因此，针对特定应用设计和制备优化的金属–二维过渡金属硫族化合物接触，需要对接触电阻进行精确控制，并实现高效的电荷载流子注入 [128]。从分子尺度到器件尺度对缺陷进行适当管理，并确保器件和接触结构完整性，对于保障器件可靠性和耐久性至关重要。

可扩展性是另一项亟待妥善解决的重大挑战。尽管实验室环境下已成功降低接触电阻，但从实验室规模的研究过渡到大规模制造仍是首要挑战 [27]。因此，这一规模化过程需要创新方法和技术进步，而这些方法和技术可能尚未成熟，甚至目前还不存在。随着用于扩大器件制造工艺规模的新技术和工程技术不断发展，同样重要的是，确保基于TMD的器件和接触系统在实际条件下保持可靠、耐用且稳健。这需要全面的表征和新颖的材料工程策略，以确保基于TMD的器件能够切实应用于我们的日常生活中，让技术发挥无处不在的作用。上述考量的基础在于对TMD材料合成、器件制造和性能评估协议进行标准化。这些因素将确保各个研究领域和工业应用中的一致性与可靠性 [19]。技术挑战也要求开展跨学科合作，并采用创新的器件设计方法。

总之，在材料科学和工程技术同步发展的背景下，促进跨学科合作至关重要。这是因为这种集体协作方式是释放基于TMD的器件全部潜力、推动其在各种应用领域广泛普及的关键。尽管挑战依然存在，但基于范德华接触的基于TMD的器件和系统拥有巨大潜力，持续推动着全球研发工作。 通过应对这些工程挑战并抓住新的创新机遇，这一方兴未艾的二维过渡金属硫族化合物与金属接触领域，有望在未来数年乃至数十年间为电子、光电子、能源及新兴技术的发展作出重要贡献。

最后但同样重要的是，二维过渡金属硫族化合物材料精妙的电子、自旋和光学性质，以及基于这类材料的实用器件，已逐渐崭露头角。尽管接触电阻领域仍有一些尚未解决的挑战，我们仍有信心地预期，二维过渡金属硫族化合物将成为先进应用的重要新材料。

利益冲突

作者声明不存在利益冲突。

致谢

本研究得到国家自然科学基金（项目编号：52172271、12374378、52307026）、国家重点研发计划（项目编号：2022YFE03150200）和上海市科技创新行动计划（项目编号：22511100200、23511101600）的资助。X. L 感谢国家留学基金管理委员会（CSC）（项目编号：202306890069）的支持。C.S.T 感谢新加坡国立大学新兴科学家奖学金的支持。S.S. 感谢国家自然科学基金（项目编号：12304199）、上海市科学技术委员会和上海市“维纳斯启航”计划（项目编号：23YF1412600）的支持。A. T. S. W 感谢新加坡教育部通过教育部第二层级项目（项目编号：MOE-T2EP50122-0020）提供的资助。

参考资料

1 Xiang, J. 等. Ge/Si纳米线异质结构作为高性能场效应晶体管. 《自然》 441, 489-493, doi:10.1038/nature04796 (2006). 2 Gudiksen, M. S., Lauhon, L. J., Wang, J., Smith, D. C. & Lieber, C. M. 用于纳米光子学和电子学的纳米线超晶格结构生长. 《自然》 415, 617-620 (2002). 3 Ganjipour, B., Wallentin, J., Borgstro¨m, M. T., Samuelson, L. & Thelander, C. 基于InP-GaAs异质结构纳米线的隧穿场效应晶体管. 《ACS Nano》 6, 3109-3113 (2012). 4 Mak, K. F. & Shan, J. 二维半导体过渡金属二硫族化物的光子学与光电子学. 《Nature Photonics》 10, 216-226, doi:10.1038/nphoton.2015.282 (2016). 5 Dutta, R. 等. 用于多功能光电传感器的间接带隙二维过渡金属二硫族化物的光学增强. 《Advanced Materials》 35, e2303272, doi:10.1002/adma.202303272 (2023). 6 Gong, C. 等. 基于二维新型各向异性过渡金属二硫族化物的电子与光电子应用. Adv Sci (Weinh) 4, 1700231, doi:10.1002/advs.201700231 (2017). 7 Hoang, A. T., Hu, L., Katiyar, A. K. & Ahn, J.-H. 用于柔性电子学的二维层状材料及异质结构. 《Matter》 5, 4116-4132, doi:10.1016/j.matt.2022.10.016 (2022). 8 Wang, J. 等. 转移至二维半导体的金属栅极，实现低于1 V的工作电压和近乎理想的亚阈值摆幅. 《Science Advances》 7, eabf8744 (2021). 9 Song, S. 等. 基于无缝横向金属-半导体结的原子晶体管，转移长度低于1 nm. 《Nature Communications》 13, 4916, doi:10.1038/s41467-022- 32582-9 (2022). 10 Wang, Y. 等. 三维金属与二维半导体之间的范德华接触. 《自然》 568, 70-74, doi:10.1038/s41586-019-1052-3 (2019). 11 Wang, Y. & Chhowalla, M. 在二维过渡金属二硫族化物上制备洁净电接触. 《Nature Reviews Physics》 4, 101-112 (2022). 12 Liu, X., Choi, M. S., Hwang, E., Yoo, W. J. & Sun, J. 费米能级钉扎依赖型二维半导体器件：挑战与前景. 《Advanced Materials》 34, e2108425, doi:10.1002/adma.202108425 (2022). 13 Kwon, G. 等. 金属与二维半导体之间无相互作用且无缺陷的范德华接触. 《Nature Electronics》 5, 241-247, doi:10.1038/s41928-022-00746- 6 (2022). 14 Zan, R. 等. 通过石墨烯封装控制二硫化钼中的辐射损伤. 《ACS Nano》 7, 10167–10174 (2013). 15 Allain, A., Kang, J., Banerjee, K. & Kis, A. 二维半导体的电接触. 《Nature Materials》 14, 1195-1205, doi:10.1038/nmat4452 (2015). 16 Zhao, Y. 等. 二维层状过渡金属二硫族化物晶体管的掺杂、接触与界面工程. 《Advanced Functional Materials》 27, 1603484, doi:10.1002/adfm.201603484 (2017). 17 Schulman, D. S., Arnold, A. J. & Das, S. 二维材料及器件的接触工程. 《Chemical Society Reviews》 47, 3037-3058, doi:10.1039/c7cs00828g (2018). 18 Zheng, Y., Gao, J., Han, C. & Chen, W. 二维材料的欧姆接触工程. 《Cell Reports Physical Science》 2, 100298, doi:10.1016/j.xcrp.2020.100298 (2021). 19 Ma, L., Wang, Y. & Liu, Y. 二维过渡金属二硫族化物的范德华接触

二硫属化物。《化学评论》124, 2583–2616, doi:10.1021/acs.chemrev.3c00697 (2024). 20 Li, W. 等. 逼近二维半导体接触的量子极限。《自然》613, 274-279, doi:10.1038/s41586-022-05431-4 (2023). 21 Wu, X. 等. 通过层间杂化降低过渡金属二硫属化物异质结构中的界面载流子陷阱。《纳米研究》14, 1390-1396, doi:10.1007/s12274-020-3188-8 (2020). 22 Andrews, K., Bowman, A., Rijal, U., Chen, P.-Y. & Zhou, Z. 利用二维半导体插层改善二硫化钼晶体管的接触和器件性能。《ACS Nano》14, 6232- 6241, doi:10.1021/acsnano.0c02303 (2020). 23 Kong, L. 等. 通过范德华金属集成实现无掺杂互补型二硒化钨电路。《自然·通讯》11, 1866, doi:10.1038/s41467-020-15776-x (2020). 24 Chen, Y.-H. 等. 使用高电子亲和势非晶三氧化钼实现单层二硒化钨场效应晶体管的P型欧姆接触。《ACS应用电子材料》4, 5379-5386, doi:10.1021/acsaelm.2c01053 (2022). 25 Liao, W. 等. 面向下一代电子器件的二维过渡金属二硫属化物界面工程：最新进展与挑战。《纳米尺度视野》5, 787-807, doi:10.1039/c9nh00743a (2020). 26 Yang, R. 等. 用于光催化的二维过渡金属二硫属化物。《德国应用化学》62, e202218016, doi:10.1002/anie.202218016 (2023). 27 Yin, X. 等. 二维过渡金属二硫属化物的最新进展：金属相和准金属相的相变与应用。《Chemical Society Reviews》50, 10087-10115, doi:10.1039/d1cs00236h (2021). 28 Chuang, S. 等. 高功函数氧化钼接触实现的二硫化钼 P 型晶体管和二极管。《 Nano Lett 》 14, 1337-1342, doi:10.1021/nl4043505 (2014). 29 Takeyama, K. 等. 使用p+-二硫化钼/二硒化钨范德华界面实现二硒化钨低温p型欧姆接触。《应用物理快报》117, doi:10.1063/5.0016468 (2020). 30 Borah, A., Nipane, A., Choi, M. S., Hone, J. & Teherani, J. T. 使用单层掺杂剂实现超薄二硒化钨的低电阻P型欧姆接触。《ACS应用电子材料》3, 2941-2947, doi:10.1021/acsaelm.1c00225 (2021). 31 Skachkov, D., Liu, S.-L., Wang, Y., Zhang, X.-G. & Cheng, H.-P. 肖特基势垒物理的第一性原理理论。《物理评论B》104, 045429, doi:10.1103/PhysRevB.104.045429 (2021). 32 Zhou, S. 等. 氧空位修饰的二氧化钛/氧终止Ti_3C_2复合材料：揭示氧空位与高功函数碳化钛之间的双重作用。《Advanced Functional Materials》33, 2307702, doi:10.1002/adfm.202307702 (2023). 33 Liao, P.-Y. 等. 面向单片-D集成的BEOL顶栅ALD In2 70, 20523 3 2058, 101109 2023 3235313 2023 O场效应晶体管瞬态热电协同优化。《IEEE电子器件学报》- doi: . /ted. . ( ). 34 Cheng, Z. 等. 稳定界面态下可移动离子动力学导致双肖特基势垒的功率损耗持续降低。《物理评论应用》17, 034042 101103 17034042 2022 doi: . / PhysRevApplied. . ( ). 35 Sun, H., Xu, Z., Zhang, D., Peng, L. & Lai, X. 基于第一性原理计算的电荷重排对二氧化钛/石墨界面接触电阻的影响。《应用表面科学》635, 157640, doi:10.1016/j.apsusc.2023.157640 (2023). 36 Liu, M. 等. 基于第一性原理的钴插层双层SnS2/单层SnS2结中的各向异性低肖特基势垒与输运性质。《ACS应用

电子材料》5, 2115-2121, doi:10.1021/acsaelm.2c01790 (2023). 37 Neamen, D. A. 《半导体物理与器件：基本原理》。（McGraw-Hill, 2012）。38 Reidy, K. 等. 直接观察二维/三维半导体/金属异质结构激子光谱的亚纳米级变化。《Nano Letters》23, 1068-1076, doi:10.1021/acs.nanolett.2c04749 (2023). 39 Kim, C. 等. 单层二硫族钼化物电学金属接触处的费米能级钉扎。《ACS Nano》11, 1588-1596, doi:10.1021/acsnano.6b07159 (2017). 40 McDonnell, S., Addou, R., Buie, C., Wallace, R. M. & Hinkle, C. L. 二硫化钼中的缺陷主导掺杂与接触电阻。《ACS Nano》8, 2880-2888 (2014). 41 Addou, R., Colombo, L. & Wallace, R. M. 天然二硫化钼的表面缺陷。《ACS Appl Mater Interfaces》7, 11921-11929, doi:10.1021/acsami.5b01778 (2015). 42 Saidi, W. A. 应变和金属厚度对金属-二硫化钼接触的影响。《J Chem Phys》141, 094707, doi:10.1063/1.4893875 (2014). 43 Gong, C. 等. 物理气相沉积单层二硫化钼上的金属接触 7, 1135011357 2013 .《ACS Nano》- ( ). 44 Sun, Y. 等. 利用表面等离激元增强拉曼散射探测MX_2-金属界面的局部应变。《Nano Lett》14, 5329-5334, doi:10.1021/nl5023767 (2014). 45 McDonnell, S., Smyth, C., Hinkle, C. L. & Wallace, R. M. 二硫化钼-钛接触界面反应。《ACS Appl Mater Interfaces》8, 8289-8294, doi:10.1021/acsami.6b00275 (2016). 46 English, C. D., Shine, G., Dorgan, V. E., Saraswat, K. C. & Pop, E. 改善二硫化钼场效应晶体管中的接触电阻。第72届器件研究会议, 193-194 (2014). 47 Lee, S. M., Cahill, D. G. & Allen, T. H. 溅射氧化物薄膜的热导率。《物理评论B》52, 253-257, doi:10.1103/PhysRevB.52.253 (1995). 48 Hopkins, P. E., Phinney, L. M., Serrano, J. R. & Beechem, T. E. 表面粗糙度和氧化层对铝/硅界面热边界电导的影响。《物理评论B》82, 085307, doi:10.1103/PhysRevB.82.085307 (2010). 49 Spicer, W. E., Chye, P. W., Skeath, P. R., Su, C. Y. & Lindau, I. 关于肖特基势垒与III–V族半导体-绝缘体界面态形成的统一新模型。《Journal of Vacuum Science and Technology》16, 1422-1433, doi:10.1116/1.570215 (1979). 50 Daw, M. S. & Smith, D. L. 半导体表面空位的能级。《J. Vac. Sci. Technol.》17, 1028-1031 (1980). 51 Shi, Y. 等. 以石墨烯为生长模板的二硫化钼层范德华外延。《Nano Lett》12, 2784-2791, doi:10.1021/nl204562j (2012). 52 Gong, C., Colombo, L., Wallace, R. M. & Cho, K. 金属-二硫化钼界面发生部分费米能级钉扎的特殊机制。《Nano Lett》14, 1714-1720, doi:10.1021/nl403465v (2014). 53 Saidi, W. A. 金属在二硫化钼（001）表面吸附和生长形貌的变化趋势。《Crystal Growth & Design》15, 3190-3200, doi:10.1021/acs.cgd.5b00269 (2015). 54 Saidi, W. A. 铂纳米颗粒在二硫化钼（001）表面成核与生长的密度泛函理论研究。《Crystal Growth & Design》15, 642-652, doi:10.1021/cg5013395 (2015). 55 Kerelsky, A. 等. 金属与重掺杂单层二硫化钼界面处不存在带隙。《Nano Lett》17, 5962-5968, doi:10.1021/acs.nanolett.7b01986 (2017). 56 Chen, W., Santos, E. J., Zhu, W., Kaxiras, E. & Zhang, Z. 调控电子和化学

吸附在过渡金属衬底上的单层二硫化钼的性质。Nano Lett 13, 509- 514, doi:10.1021/nl303909f (2013). 57 Shen, P. C. 等。半金属与单层半导体之间的超低接触电阻。《自然》593, 211-217, doi:10.1038/s41586-021-03472-9 (2021). 58 Liu, Y., Huang, Y. & Duan, X. 二维材料出现之前及之后的范德华集成。《自然》567, 323-333, doi:10.1038/s41586-019-1013-x (2019). 59 Popov, I., Seifert, G. & Tomanek, D. 单层MoS2电接触的设计：一项计算研究。Phys Rev Lett 108, 156802, doi:10.1103/PhysRevLett.108.156802 (2012). 60 Kang, J., Liu, W., Sarkar, D., Jena, D. & Banerjee, K. 单层过渡金属二硫属化物半导体的金属接触计算研究。Physical Review X 4, 031005, doi:10.1103/PhysRevX.4.031005 (2014). 61 Liu, Y. 等。范德华金属-半导体结向肖特基-莫特极限迈进。《自然》557, 696-700, doi:10.1038/s41586-018-0129-8 (2018). 62 Wu, R. J. 等。利用原子分辨率可视化二维场效应晶体管中的金属-MoS2接触。Physical Review Materials 3, 111001(R) doi:10.1103/PhysRevMaterials.3.111001 (2019). 63 Chee, S. S. 等。利用石墨烯/银电极降低高迁移率MoS(2)场效应晶体管的肖特基势垒高度。Adv Mater 31, e1804422, doi:10.1002/adma.201804422 (2019). 64 Murthy, A. A. 等。通过六方氮化硼隧穿接触介导二维异质结构中的本征输运。Nano Lett 18, 2990-2998, doi:10.1021/acs.nanolett.8b00444 (2018). 65 Desai, S. B. 等。金介导剥离制备超大尺寸、光电性能完美的单层材料。Adv Mater 28, 4053-4058, doi:10.1002/adma.201506171 (2016). 66 Velicky, M. 等。金辅助剥离厘米级过渡金属二硫属化物单层的机制。ACS Nano 12, 10463-10472, doi:10.1021/acsnano.8b06101 (2018). 67 Gramling, H. M. 等。直接从多层源材料转移图案化单层WS2和MoS2，实现空间精确定位，特征尺寸大于104 μm2。ACS Applied Electronic Materials 1, 407-416, doi:10.1021/acsaelm.8b00128 (2019). 68 Blue, B. T. 等。Au杂化诱导的2 7, 025021, 2 2 101088 2053 1583 6 34 2020H-MoS金属性。D Materials doi: . / - /ab d ( ). 69 Park, J. 等。自供能单原子层Nb掺杂WSe2光电晶体管的光电导特性。ACS Photonics 10, 2930-2940, doi:10.1021/acsphotonics.3c00654 (2023). 70 Radisavljevic, B., Radenovic, A., Brivio, J., Giacometti, V. & Kis, A. 单层MoS2晶体管。Nat Nanotechnol 6, 147-150, doi:10.1038/nnano.2010.279 (2011). 71 Kumar, J. & Shrivastava, M. 硫属元素缺陷引入金属诱导带隙态的作用及其对金属–TMD界面化学的影响。ACS Omega 8, 10176-10184, doi:10.1021/acsomega.2c07489 (2023). 72 Kong, L. 等。晶圆级通用范德华金属-半导体接触。Nat Commun 14, 1014, doi:10.1038/s41467-023-36715-6 (2023). 73 Zhong, H. 等。单层和双层MoS2与金属接触的界面性质：超越能带计算。Sci Rep 6, 21786, doi:10.1038/srep21786 (2016). 74 Kim, B.-K. 等。铟与MoS2之间真正的欧姆范德华接触的起源。npj 2D Materials and Applications 5, 9, doi:10.1038/s41699-020-00191-z (2021).

75 Ansh 等。硫属元素辅助增强TMD–金属界面处的原子轨道相互作用及硫钝化，以全面提升二维TMD场效应晶体管的性能。IEEE Transactions on Electron Devices 67, 717-724, doi:10.1109/ted.2019.2958338 (2020). 76 Ansh 等。通过硫辅助金属诱导间隙态工程，实现二硒化钨（WSe2）场效应晶体管中的选择性电子或空穴传导。IEEE Transactions on Electron Devices 67, 383-388, doi:10.1109/ted.2019.2956781 (2020). 77 Parto, K. 等。二维过渡金属二硫属化物的一维边缘接触：揭示肖特基势垒各向异性在MoS2/金属界面电荷输运中的作用。Physical Review Applied 15, 064068, doi:10.1103/PhysRevApplied.15.064068 (2021). 78 Wang, L. 等。二维材料的一维电接触。《科学》342, 614–617 (2013). 79 Leonard, F. & Talin, A. A. 一维和二维纳米材料的电接触。Nat Nanotechnol 6, 773-783, doi:10.1038/nnano.2011.196 (2011). 80 Matsuda, Y., Deng, W.-Q. & III, W. A. G. 基于量子力学的端接触金属-石墨烯和金属-纳米管界面的接触电阻。J. Phys. Chem. C 114, 17845 17850 2010– ( ). 81 Smith, J. T., Franklin, A. D., Farmer, D. B. & Dimitrakopoulos, C. D. 通过接触区域图案化降低石墨烯器件中的接触电阻。ACS Nano 7, 3661–3667 (2013). 82 Lizzit, D., Khakbaz, P., Driussi, F., Pala, M. & Esseni, D. n/p型过渡金属二硫属化物金属接触中的欧姆行为：肖特基势垒与隧穿势垒的权衡。ACS Applied Nano Materials 6, 5737-5746, doi:10.1021/acsanm.3c00166 (2023). 83 Gupta, S. 等。通过在金属-界面层-半导体接触中进行界面层掺杂降低接触电阻率。Journal of Applied Physics 113, 234505, doi:10.1063/1.4811340 (2013). 84 Jang, J. 等。利用ZnO中间层实现洁净界面接触，降低MoS2晶体管的接触电阻。ACS Applied Materials & Interfaces 12, 5031-5039, doi:10.1021/acsami.9b18591 (2020). 85 Fang, Q. 等。通过插入SiC层以非侵入方式改善MoS(2)/金属接触的肖特基势垒。Phys Chem Chem Phys 23, 14796-14802, doi:10.1039/d1cp00842k (2021). 86 Liu, Y. 等。利用石墨烯电极实现二硫化钼的无势垒接触。Nano Lett 15, 3030-3034, doi:10.1021/nl504957p (2015). 87 Mondal, A. 等。通过无残留转移实现过渡金属二硫属化物场效应晶体管的低欧姆接触电阻和高开关比。Nature Nanotechnology 19, 34 43, 101038 41565 023 01497 2023 - doi: . /s - - -x ( ). 88 El-Bana, M. S. 等。二维NbSe2场效应晶体管中的超导性。Superconductor Science and Technology 26, 125020, doi:10.1088/0953-2048/26/12/125020 (2013). 89 Li, L. H., Cervenka, J., Watanabe, K., Taniguchi, T. & Chen, Y. 原子级薄氮化硼纳米片的强抗氧化性。ACS Nano 8, 1457−1462 (2014). 90 Xi, X. 等。超导NbSe2原子层中的伊辛配对。《自然·物理》12, 139- 143, doi:10.1038/nphys3538 (2016). 91 Tsen, A. W. 等。二维晶体超导体中量子金属的性质。《自然·物理》12, 208-212, doi:10.1038/nphys3579 (2016).

92 Telford, E. J. 等. 用于二维材料无光刻接触及保护的方法. Nano Lett 18, 1416-1420, doi:10.1021/acs.nanolett.7b05161（2018年）. 93 Mott, N. F. 晶体整流器理论. Proc. R. Soc. Lond. A 171, 27–38（1939）. 94 Tung, R. T. 肖特基势垒高度的物理与化学. Applied Physics Reviews 1, 011304, doi:10.1063/1.4858400（2014）. 95 Went, C. M. 等. 一种用于垂直肖特基结过渡金属二硫属化物光伏器件范德华接触的新型金属转移工艺. Sci. Adv. 5, eaax6061（2019）. 96 Liu, L. 等. 用于亚1 nm MoS2垂直晶体管的转移式范德华金属电极. Nature Electronics 4, 342-347, doi:10.1038/s41928-021-00566-0（2021）. 97 Liu, G. 等. 石墨烯辅助金属转移印刷，用于金属电极与二维材料的晶圆级集成. Nature Electronics 5, 275-280, doi:10.1038/s41928-022-00764-4（2022年）. 98 Kaijian Xing, D. M., Weiyao Zhao, Abdulhakim Bake, David Cortie, Jingying Liu, Thi-Hai- Yen Vu, James Hone, Alastair Stacey, Mark T. Edmonds, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Qingdong Ou, Dong-Chen Qi, Michael S. Fuhrer. 用于范德华器件制造的任意金属电极拾取放置转移. arXiv, http://arxiv.org/abs/2405.12830 （ 2024 年） . 99 Das, S., Chen, H. Y., Penumatcha, A. V. & Appenzeller, J. 采用钪接触的高性能多层MoS_2晶体管. Nano Lett 13, 100-105, doi:10.1021/nl303583v（2013）. 100 Movva, H. C. P. 等. 双栅WSe_2场效应晶体管中的高迁移率空穴. 《ACS Nano》9, 10402−10410 （2015）. 101 Chen, W., Chen, S., Qi, D. C., Gao, X. Y. & Wee, A. T. S. 外延石墨烯的表面转移p型掺杂. J. Am. Chem. Soc 129, 10418–10422（2007）. 102 Younas, R., Zhou, G. & Hinkle, C. L. 面向超微缩晶体管的过渡金属二硫属化物掺杂展望：挑战与机遇. 《应用物理快报》122, 160504 doi:10.1063/5.0133064（2023）. 103 Zhang, X., Shao, Z., Zhang, X., He, Y. & Jie, J. 低维纳米结构的表面电荷转移掺杂，助力高性能纳米器件. 《Advanced Materials》28, 10409-10442, doi:10.1002/adma.201601966（2016）. 104 Ma, J. 等. 基于Cs2CO3n掺杂和MoO3 p掺杂载流子传输层的高功率效率有机发光二极管. Semiconductor Science and Technology 24, 035009, 101088 0268 1242 24 3 035009 2009 doi: . / - / / /（ ）. 105 Wang, Y. 等. 二维过渡金属二硫属化物的p型电接触. 《自然》610, 61-66, doi:10.1038/s41586-022-05134-w（2022年）. 106 Xie, J. 等. p型单层WSe_2的低电阻接触. Nano Lett 24, 5937-5943, doi:10.1021/acs.nanolett.3c04195（2024年）. 107 Das, S. 等. 高性能p型二维场效应晶体管的设计策略.（预印本）, https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3322027/v1，提交于：2023年9月. 108 Wang, Y. 等. WSe2金属界面中是否存在p型欧姆接触？Nanoscale 8, 1179 1191, 101039 5 06204 2016 - doi: . /c nr g（ ）. 109 Sheng, Y. 等. 一种基于二维材料晶体管的新型接触工程方法. Journal of Materials Science & Technology 69, 15-19, doi:10.1016/j.jmst.2020.05.079（2021）.

110 Kim, T. 等. 采用ZnO纳米线栅极、用于扩展非易失性存储应用的二维TMD沟道晶体管. 《Advanced Functional Materials》30, 2004140, doi:10.1002/adfm.202004140（2020）. 111 Liu, Y. & Shao, Q. 面向高能效自旋轨道力矩器件的二维材料 . 《 ACS Nano 》 14, 9389-9407, doi:10.1021/acsnano.0c04403（2020）. 112 Gmitra, M., Kochan, D., Högl, P. & Fabian, J. 石墨烯/过渡金属二硫属化物上的平庸与反转狄拉克能带及量子自旋霍尔态的出现. 《物理评论B》93, 155104, doi:10.1103/PhysRevB.93.155104（2016）. 113 Wang, Z. 等. 半导体过渡金属二硫属化物上石墨烯中“设计型”自旋轨道相互作用的起源与强度. Physical Review X 6, 041020, doi:10.1103/PhysRevX.6.041020（2016）. 114 Dankert, A. & Dash, S. P. 室温下范德华异质结构中自旋流的电栅极控制. 《自然·通讯》8, 16093, doi:10.1038/ncomms16093（2017年）. 115 Benítez, L. A. 等. 室温下石墨烯–过渡金属二硫属化物异质结构中的强各向异性自旋弛豫. Nature Physics 14, 303-308, doi:10.1038/s41567-017-0019-2（2018年）. 116 Wang, T., Vila, M., Zaletel, M. P. & Chatterjee, S. 自旋轨道耦合石墨烯多层结构中自旋与谷的电控制. Physical Review Letters 132, 116504, doi:10.1103/PhysRevLett.132.116504（2024年）. 117 Ahn, E. C. 面向自旋电子器件的二维材料. npj 2D Materials and Applications 4, 17, doi:10.1038/s41699-020-0152-0（2020）. 118 Ghiasi, T. S., Ingla-Aynes, J., Kaverzin, A. A. & van Wees, B. J. 过渡金属二硫属化物/石墨烯异质结构中显著的近邻诱导自旋寿命各向异性. Nano Lett 17, 7528-7532, doi:10.1021/acs.nanolett.7b03460（2017年）. 119 Mondal, A., Yadav, P. V. K. & Ashok Kumar Reddy, Y. 面向高性能光探测器的多种二维材料器件架构工程综述. Materials Today Communications 34, 105094, doi:10.1016/j.mtcomm.2022.105094（2023）. 120 Zou, Y. 等. 具有超高光响应度的高温柔性WSe(2)光探测器. 《自然·通讯》13, 4372, doi:10.1038/s41467-022-32062-0（2022年）. 121 Zha, J. 等. 基于二维材料与纳米光子学的红外光探测器. 《Advanced Functional Materials》32, 2111970, doi:10.1002/adfm.202111970（2021）. 122 Qiu, Q. & Huang, Z. 从紫外到太赫兹波段的二维材料光探测器. 《Advanced Materials》33, e2008126, doi:10.1002/adma.202008126（2021）. 123 Wang, Y. 等. 溶液法制备的MoS(2)/有机铅三卤化物钙钛矿光探测器. 《Advanced Materials》29, 1603995, doi:10.1002/adma.201603995（2017年）. 124 Zhai, W. 等. 纳米材料的相工程：过渡金属二硫属化物. 《化学评论》124, 4479–4539, doi:10.1021/acs.chemrev.3c00931（2024年）. 125 Yamaguchi, H. 等 . 相工程单层 MoS2 中光激发电荷载流子动力学的空间分辨研究 . 《ACS Nano》9, 840–849（2015）. 126 Batool, S., Idrees, M., Han, S. T., Roy, V. A. L. & Zhou, Y. 二维材料的电接触：当前进展与未来展望. Small 19, 2206550, doi:10.1002/smll.202206550（2023）. 127 Gao, L. 等. 兼容硅工艺的二维材料集成电路接触工程. 《纳米研究》16, 12471-12490, doi:10.1007/s12274-023-6167-z（2023）.

128 Kim, J. 等通过单原子层隧穿效应改善 WS(2) /MoTe(2) 异质结构中的接触电阻。*Adv Sci (Weinh)* **8**，e2100102，doi:10.1002/advs.202100102（2021）。