边缘-基二维α-In_2Se_3-MoS_2 铁电体电场效应器件

Debopriya Dutta[1], Subhrajit Mukherjee[1], Michael Uzhansky[1], Pranab K. Mohapatra[2], Ariel Ismach[2] 和 Elad Koren[1*]

[1]纳米尺度电子材料与器件实验室，材料科学与工程学院，以色列理工学院，海法，3200003，以色列。

[2]材料科学与工程系，特拉维夫大学，拉马特阿维夫，特拉维夫，*6997801*，以色列。

[*]电子邮箱 – eladk@technion.ac.il

摘要 -

基于二维材料的异质结构有望实现协同功能，而这些功能在各自独立的材料中往往无法实现。本文利用 α-In_2Se_3 中的铁电极化翻转，在部分重叠的 α-In_2Se_3-MoS_2 基铁电半导体场效应器件中构建多级非易失性导电状态。具体而言，我们展示了 α-In_2Se_3 相互耦合的铁电性如何基于一种新颖的边缘态驱动机制，在 n-i 和 n-i-n 型结构之间实现非易失性切换，为亚纳米级非易失性器件微型化铺平道路。此外，诱导的非对称极化可增强光生载流子的分离，使器件在可见光范围内实现极高的 ~ 1275 A/W 光响应度，并对覆盖其上的 MoS_2 单层中明亮的 A 和 B 激子发射通道进行强非易失性调制。我们的研究结果表明，利用部分重叠的 α-In_2Se_3-MoS_2基铁电场效应晶体管中的可切换极化，在构建多模态、非易失性纳米级电子和光电子器件方面具有巨大潜力。

Key词语：二维材料、In_2Se_3, MoS_2, 相互耦合的铁电性、光电探测器。

引言 –

过渡金属二硫属化物（TMDC），尤其是 MoS_2，凭借优异的环境稳定性[1,2]，、高迁移率[3,4]，、高开关比[5,6]和出色的光响应度[7,8]，一直是备受关注的二维半导体材料。此外，其较大的带隙使其成为制造多模态光电子器件[9]的有望候选材料。在基于二维材料的工作场效应器件中实现导电状态非易失性控制的方法中，构建铁电材料异质结构是一条颇具前景的途径。这种独特的器件几何结构为多种先进应用开辟了空间，包括场效应器件（FET）[10]，、换能器[11]，、传感器[12]，、非易失性存储器[13]，、神经形态器件[14,15]，、能量采集器件[16]等。尽管基于 $BaTiO_3$，、$BiFeO_3$，和 $Pb(Zr, Ti)O_3$ 的传统压电材料已用于此类应用[17–20]，但含有大量界面电子态的截断界面会显著劣化材料相较于本征状态下的电子特性，尤其是在缩小器件尺寸时。为克服这些挑战，采用二维形态的铁电材料势在必行。值得注意的是，二维异质结构的原子级薄特性也有望实现对材料边缘局部电子性质的原子尺度调制；近期已有研究利用这一特性，在垂直 MoS_2 器件[21]中展示了亚纳米栅长。

在具有纯面外（OOP）或面内（IP）极化特征的二维铁电体中，例如 $CuInP_2S_6$[22]，1、T-WTe_2[23]，、SnTe[24] 等，In_2Se_3 因其在单层极限[25–33]下仍存在稳定的面内与面外耦合铁电性而备受关注。α-In_2Se_3 的铁电性源于中心硒原子层相对于相邻铟原子层的位移，这一位移打破了晶体的中心对称性，产生了两个能量简并的极化态[31]。这一独特特性使 In_2Se_3 成为新兴人工智能、信息处理和存储应用的潜在候选材料。此外，其较强的光吸收[34]，、显著的光响应[35] 以及随相变化的可见光至红外波段带隙[36]，使其在光电子学领域具有优势。

本文研究了基于铁电 In_2Se_3 和半导体硫化钼 MoS_2 的范德华异质结构的光电特性。具体而言，器件沟道由单层

或少层硫化钼 MoS_2, 构成，同时在器件沟道的一半下方、硫化钼 MoS~ 50 与硅 SiO_2介电层[3] 之间插入一层薄的 In_2 Se_2 （厚度为 nm）（图 1a、b）。

我们的实验表明，对 In_2Se_3 进行选择性极化可显著调控 MoS_2 沟道中的导电性，从而产生明显的“开启”和“关断”状态；在 V_G = - 20 V 和 0 V 下，最大比值分别为 ~ 10^4 和 50。此外，在不同极化条件下还展示了非易失性多级光响应；施加 - 90 V 的负栅极电压后，光响应度最高可达 ~ 1275 A/W，高于其他采用 MoS_2 或 In_2Se_3 基光电子器件的报道[7,8,29,37–41]。通过开尔文探针力显微镜（KPFM），我们发现，观测到的器件电导率调制对应于器件沟道内狭窄的电势调制，这是由经 α-In_2Se_3 极化的边缘引起的（图1c、d）。尤其是，彼此耦合的铁电极化会主动调节 MoS_2 中的沟道载流子浓度，使其在二极管式 n-i 结与 n-i-n 结之间实现非易失性切换。后一种情况可由一种新颖的边缘诱导结机制解释，该机制有望实现具有超短半导体沟道的铁电场效应晶体管，其器件架构类似于近期报道的设计[21]。最后，基于单层 MoS_2 的异质结构铁电场效应晶体管表现出非易失性、依赖于极化的明亮 A 和 B 激子沟道光致发光（PL）；这一现象可由异质结构电子能带排列的变化解释。本文展示的偶极调制铁电场效应晶体管可用于制造功能性多模态光电子存储器件，其沟道尺寸有望窄至亚纳米级，在逻辑、存储、神经形态和光电子应用方面具有广阔前景。

结果 –

首先，采用标准胶带剥离法[42]将少层 α-In_2Se_3 剥离至覆盖有 300 nm 热氧化层的重掺杂 p 型硅衬底上。类似地，将少层 MoS_2 剥离至 SiO_2/Si 上，随后使用干式黏弹性印章[41] 将其确定性转移至 α-In_2Se_3 薄片上方，使器件沟道仅有一半位于 In_2Se_3 上方（图1a、b）。采用电子束光刻制备源漏电极，并将下方的 p 型掺杂硅用作背栅。施加负、正背栅电势后 In_2Se_3-MoS_2 异质结构的原子构型分别如图1a和图1b所示。具体而言，In_2Se_3 层的原子排列会因外加电场极性不同而改变，从而产生交替的极化态。负向面外极化时，中心 Se 原子垂直向上移向顶部 In 原子，产生向下（↓）的净面外极化，如红色箭头所示。正向极化时，中心 Se 原子垂直向下移向底部 In 原子，产生向上（↑）的净面外极化，如红色箭头所示。由于耦合作用，面内极化也随之改变，形成不同的极化状态（分别为 → 和 ← ）。相互关联的面内和面外极化遍布薄片的整个结构。这种偶极变化会诱导上方 MoS_2 中的载流子迁移，从而形成载流子浓度不同的局部区域（图1a、b插图）。负向极化时，面外偶极（绿色椭圆）取向使负电荷中心邻近上方的 MoS_2, ，排斥电子并形成本征‘i’型区域；图1c所示的实测电势分布证实了这一点。正向极化时，特定的偶极排列使正电荷中心邻近上方的 MoS_2，吸引电子并形成电子掺杂‘n’型区域（图1d）。值得注意的是，在这种构型中，面内偶极（红色椭圆）的特定取向会在材料边缘处形成狭窄的‘i’型区域（下文将详述）。图1e展示了异质结构器件的原子力显微镜形貌，以及沿红色虚线的高度剖面。测得剥离的 MoS_2 厚度为 ~ 25 nm，而 In_2Se_3/MoS_2 结构的累积高度为 ~ 75 nm（即 In_2Se_3 厚度为 50 nm）。图1f展示了异质结构器件不同区域的拉曼光谱及其光学图像（插图）。MoS_2 区域的拉曼光谱有两个明显峰，分别位于 ~ 385 cm^{-1} 和 407 cm^{-1}., 对应于 E^1_{2g} 和 A_{1g} 模态[5], 。关于

异质结构区域中，除硫化钼的峰外，还观察到 105 cm^{-1}、178 cm^{-1} 和 192 cm^{-1} 处的额外峰，分别对应于 α-In_2Se_3[27,43,44]，中的 A_1(LO + TO)、A_1(LO) 和 A_1(TO) 声子模。由 LO − TO 分裂导致的 A_1(LO) 和 A_1(TO) 峰表明，α- In_2Se_3[29] 晶体缺乏反演对称性且具有铁电性。图中还展示了转移前的 α-In_2Se_3 的拉曼光谱，以供比较。

图2展示了异质结构器件的截面高分辨率扫描透射电子显微镜（STEM）图像及能量色散X射线光谱（EDS）图。异质结构中原子尺度的晶体结构以及无缺陷、洁净的界面体现了样品质量（图2b、c、f）。显然，In_2Se_3 边缘由多个高度不同的台阶组成，从而形成了延伸的结区。还在边缘部分（图2d、e）及层叠异质结区域（图2f）采集了元素组成映射，以展示接触性质。通过将各元素分布图分别叠加到 HADAAF 图像上，生成了伪彩色元素分布图，清晰显示器件的有源部分由顶部少层硫化钼构成，其部分覆盖在下方的 In_2Se_3 上。

二维 In_2Se_3 中的铁电极化及其随后通过栅极电压进行的调控，可用于调制 FeFET[45] 的电子能带结构，进而调控相邻 MoS_2 半导体沟道的光电特性。为研究这种偶极诱导的非易失性器件特性，通过施加特定的栅极偏置电压脉冲并持续 30 秒，随后撤去栅极电压并评估异质结器件的电流-电压特性，对 In_2Se_3 进行了静电极化。图3a展示了 FeFET 在三种不同极化条件下测得的电流-电压输出特性，即未极化以及在 ± 90 V 下极化的情况（测量在撤去栅极偏置电压 2 分钟后进行，以便释放感应的电子陷阱电荷并使电流水平稳定，具体讨论见下文）。实现完全极化翻转所需的相对较高开关电压，归因于 300 nm 厚的 SiO_2 介电层，其导致器件沟道[29,45]中的感应垂直电场较弱。由于极化条件不同，沟道电导出现了明显调制。特别是，在正（负）栅极极化之后，底层 α-In_2Se_3 中的极化方向朝上（朝下），MoS_2, 的电导率

沟道显著降低（升高），从而实现了两种不同的稳定导电态，即“开启”态和“关断”态。此外，负栅极极化后的电流-电压特性曲线呈现类二极管行为，这归因于 In_2Se_3 支撑区域与非支撑 MoS_2 区域之间形成了结，具体讨论见下文。更值得注意的是，正栅极极化后观察到沟道电导反直觉地处于较低状态；鉴于所获得的偶极极化，原本预期 MoS_2 沟道中的电子浓度会增加。这种器件特性可由一种新颖的边缘态驱动机制加以解释，该机制会在器件沟道中心形成突变势垒，具体将在下文进一步讨论。

图3b展示了器件在不同栅极电压扫描范围下、V_D = 2 V时的转移特性。随着所施加的扫描范围增大，观察到顺时针滞后行为逐渐增强（见补充章节）（图3b插图）。这种转移特性归因于 α-In_2Se_3[15,46], 的铁电性，可用于显著调控硫化钼$_2$ 沟道的电导率（在施加−20 V栅极电势时，电流幅值最多可相差~ 4 个数量级），从而实现非易失性存储器操作（请注意，测得的电流值在“开启”状态下显著较大，即~ 10 μA；相比之下，几何尺寸相近的、基于In_2Se_3 的场效应晶体管器件通常具有较低的电流水平[29,47–49]，处于nA至pA范围，表明电流几乎不会流经In_2Se_3 层）。

为评估铁电场效应晶体管中“开启”和“关断”状态的保持特性与稳定性，我们监测了交替极化条件下的时间分辨电流测量结果。施加 ± 90 V 栅极电压脉冲 30 秒后测量数据保持特性，结果如图3c所示。补充章节中还提供了采用线性时间尺度绘制的其他图（图 S1a、b）。从图中可以看出，电流趋于稳定并呈线性变化；在 0.1 V 的读出电压下，两个截然不同的导电态至少能保持一小时，且 I_{on}/I_{off} 几乎没有衰减。通过对线性时间尺度[50–53]下稳定后的电流水平进行线性外推，可以认为，即使经过一年以上的时间，两种导电态的电流比仍有望保持在 ~ 10，这表明该器件在长期数据保持方面潜力巨大。此外，我们通过记录施加 0.1 V 漏极偏置电压后的电流值来表征器件耐久性；在交替施加 ± 90 V 栅极极化电压后 2 分钟进行测量，循环次数超过 100 次（图3d）。I_{on} 和 I_{off} 两种状态下的电流水平均表现出

没有出现偏差，交替极化 100 个循环后仍保持 开关比为 ~ 60 。我们的结果表明，通过控制铁电 In_2Se_3, 的极化状态，可以将铁电场效应晶体管用作非易失性存储开关。需要指出的是，工作中的铁电场效应晶体管器件的滞回行为可能既源于界面电荷陷阱，也源于铁电开关；栅极电压撤去后的最初~ 20 几分钟内出现的电流变化（图3c）也印证了这一点。尽管本文不讨论对陷阱和铁电极化各自贡献的定量分析，但保持特性研究表明，在负向和正向极化条件下，器件均可形成稳定的非易失性导电态；这些状态与最初 20 分钟内的电流变化明显不同（陷阱似乎在这一阶段发挥主要作用）。同样，经过数百次连续正向和负向极化后，存储窗口仍保持一致，这强有力地表明，在我们的器件中，铁电开关效应占主导地位，而非电荷俘获[54,55]。

负栅极电压驱动后观察到的二极管式特性表明，硫化钼$_2$ 沟道[56], 中形成了横向 n-i 结，使该器件有望用于光探测应用。为评估铁电场效应晶体管在光探测应用中的功能，我们研究了其极化依赖光响应：在漏极电压为 2 V 时，器件在施加不同栅极脉冲后接受白光光源（420–720 nm；见方法部分）交替照明（图4a）。图4b展示了电流—时间曲线中放大后的部分（图4a中的黑色虚线框所示）。显然，计算得到的光电流（见补充图 S2）受到诱导极化的显著影响。此外，施加 + 90 V 正栅极脉冲后，光响应度仅为~ 1.46 A/W；而施加 - 90 V 负栅极脉冲后，测得的最高光响应度为~ 1275 A/W（图4c）。光响应度如此显著的提升（~ 3 个数量级）归因于器件中形成了横向 n-i 结，详见下文讨论。补充章节的表 T1 汇总了不同几何结构的硫化钼$_2$ 基器件的光响应度对比。类似地，施加 - 90 V 栅极脉冲后，计算得到的探测率也较高，为~ 12 x 10^{11} Jones。补充图 S3 展示了各极化条件下的光开关过程及相应的上升和下降时间。值得注意的是，与保持特性分析类似，在光开关测量开始时，正栅极极化后观察到电流变化，这可能是由脱陷效应引起的；不过，

其对相对光电流的影响可以忽略不计。这表明带电陷阱主要分布在 In_2硒$_3$ 薄膜下方，远离异质结界面。

为了定量理解潜在的导电调制机制，采用频率调制开尔文探针力显微镜进行了局部表面电势测量。图5a和图5b分别展示了在-90 V和+ 90 V两种极端极化条件下、4个连续循环中，极化后2分钟测得的横跨硫化钼$_2$ 沟道的表面电势和形貌剖面（扫描过程中栅极、源极和漏极触点始终接地）。源极和漏极电极以金黄色方框标出。在漏极触点上方（异质结构上方）测得的非零电势源于金属电极[29,57]下方诱导偶极未被完全电势屏蔽。此外，不同连续循环之间的轻微势变化归因于扫描位置相对于器件沟道发生了小幅漂移。图5c和图5d展示了撤去-90 V和+ 90 V施加的栅极电压后铁电场效应晶体管的表面电势图，显示出明显的n区和i区。可以看出，在正栅极极化和负栅极极化后，未支撑的硫化钼$_2$ 区域上的表面电势几乎保持不变，而在异质结构上

归因于铁电极化，而非电荷俘获。值得注意的是，在正向极化后，器件沟道的中心区域、恰好位于异质结构区域起始处，观察到突发的电势调制。此类势变化对应于横向n-i-n结的形成，如图5d所示。图5f以示意图描述了这种结形成的一种可能解释：由于正向极化，α-In_2Se_3 中的面外偶极发生取向，使极化指向异质界面，如图5f中的红色箭头所示。该偶极场取向与硫化钼$_2$中负电荷的积累相一致。此外，耦合的面内极化导致In_2Se_3 边缘正对面发生突发的电子耗尽，从而在硫化钼$_2$ 沟道中心形成局部势垒。这种电势调制产生了稳健的“关断”状态，如图3中的电流-电压曲线所示。相比之下，在负栅极极化后，偶极取向使其背离α-In_2Se_3-硫化钼$_2$ 异质界面（如图5e中的红色箭头所示），在结两侧测得了1.95 eV的能隙。这种偶极取向耗尽了硫化钼$_2$ 中的负电荷，导致形成

了*n-i*结（图5e），这与图3a所示的二极管式特性以及在此类极化条件下观察到的出色光响应度相一致。正向栅极驱动后较宽的势垒（FHWM为1.5 μm）（图5b）归因于截面高分辨透射电子显微镜分析所观察到的多个In_2Se_3 边缘台阶，以及引入结附近静电屏蔽的多层硫化钼$_2$ (~ 25 nm厚）薄膜。该结果表明，由In_2Se_3 和硫化钼$_2$ 单层组成的结构可能产生明显更尖锐的电势变化，这对于纳米尺度驱动具有很大潜力。

In_2Se_3 与 MoS_2 之间界面处交替变化的偶极场可能会影响单层 MoS_2的光致发光。图6a显示了在不同施加的背栅电压下，于单层化学气相沉积 MoS_2 制成的异质结构区域上方测得的光致发光光谱；图6b则显示了以 A 激子峰归一化后的光致发光强度等高线图。有趣的是，在负向极化下观察到光致发光信号显著增强，此时 MoS_2沟道中的电子浓度相对较低。撤去栅极电压 10 分钟后也能观察到类似的光致发光特性，表明其有望实现高效的光致发光发射切换和记忆效应（图6c和图S4a）。在基于 MoS_2 的场效应器件[58] 以及基于铁电铌酸锂（$LiNbO_3$）的 $MoSe_2$ 异质结构[59]中，也观察到了类似的光致发光变化。此外，在施加正背栅电势时，A激子出现轻微红移，这归因于带负电的三激子浓度[60–62]增加。最后，在负向极化下观察到 B激子到A激子的发射强度比（I_B/I_A）显著提高（见补充图S4b）。观察到的 A 激子和 B 激子发射的光致发光调制，可根据 MoS_2-In_2Se_3 异质结构在向上和向下诱导极化[63] 时不同的电子能带排列来解释（图6d）。具体而言，异质结构从交错型能带排列明显转变为跨越型能带排列，使得施加正栅极电压后光生电子-空穴对的光致发光猝灭更加明显（图6c右）。相比之下，施加负栅极电压后，能带排列有利于光生空穴持续注入 MoS_2 单层，从而增强 A 激子和 B 激子的光致发光发射（图6c左）。因此，负栅极极化后 I_B/I_A 强度比的增加，可能是由于诱导空穴浓度较高，导致激发激子态的寿命缩短；与 A激子态相比，这对 B 激子发射通道的影响可能更大，因为其本征量子产率较低。另一种

一种可能的解释是 MoS_2 层与 In_2Se_3 中的诱导偶极场紧密耦合；由于负栅极极化后 MoS_2 中的载流子浓度较低，该偶极场未能得到充分屏蔽，而正栅极极化后偶极屏蔽则更强[64–66]。尽管如此，仍需开展更多实验和理论研究，以更深入地理解铁电体支撑的 MoS_2 单层体系中光致发光调制的本质。

结论 –

总之，本文展示了对 α-In_2Se_3-MoS_2 基范德华铁电场效应晶体管中光电性质的非易失性调控。栅极控制的铁电极化能够有效影响上层 MoS_2, 中的载流子浓度，在分别进行正向和负向极化后形成 n-i-n 结和 n-i 结。值得注意的是，In_2Se_3, 的面内偶极极化可在异质结构边缘诱导突变式电势调制，因此有望用于具备非易失性存储特性的亚纳米半导体沟道铁电场效应晶体管。基于 FM-KPFM 的表面电势测量验证了局部载流子工程及随后的结形成。此外，由于 n-i 结能够有效分离光生载流子，在白光照射下实现了 ~ 1275 A/W 的优异光响应。最后，研究展示了对明亮的 A 和 B 激子发射通道进行明显的非易失性调制。

方法-

样品制备 -

使用直径为 ~ 4-6 mm 的晶体，对 α-In_2Se_3 (2D Semiconductors) 和 MoS_2 (Manchester Nanomaterials) 进行了机械剥离。对于这两种材料，先机械剥离块体晶体表面的最初几层，以去除表面的天然氧化层，随后再剥离块体晶体，获得薄片。然后，将剥离得到的薄片转移至预先图案化的重度 p 型掺杂硅衬底上，该衬底带有 300 nm 厚的热生长二氧化硅。采用安装在三轴千分尺上的黏弹性聚二甲基硅氧烷 (PDMS)–聚碳酸丙烯酯 (PPC) 印章，通过两阶段干法转移方法制备异质结构。为拾取所需薄片，将印章与薄片接触，并加热至 50 °C 以促进黏附。接着，将 MoS_2 朝下的印章置于预先剥离的 In_2Se_3 上方，然后缓慢使其与衬底接触。随后将衬底加热至 100 °C，使二维材料与印章黏附；冷却回室温后，缓慢提起印章，使 MoS_2 留在下方 In_2Se_3上并与之接触。

化学气相沉积生长的硫化钼$_2$的生长与湿法转移-

采用空间限域化学气相沉积法生长 MoS_2 单层[67,68]。在典型的生长过程中，MoO_3 （99.5 %，Sigma Aldrich）和硫粉（99.95%，Sigma Aldrich）分别用作金属前驱体和硫族元素前驱体。将装有 ~ 3.5 mg MoO_3粉末的陶瓷舟放置在直径为 1 英寸的化学气相沉积炉中央。随后，将表面覆盖 300 nm 热氧化层的硅衬底放在同一陶瓷舟上，抛光面朝上。还在目标基底上方放置了几小片云母片。装有硫粉（~ 350 mg）的陶瓷舟放置在 MoO_3 源-生长基底上游 ~ 22 cm 处。向石英管中通入 250 sccm 高纯氩气（5N）载气，吹扫 10 分钟以启动工艺。随后，以每分钟 15 °C 的速率将炉温升至 750 °C，同时通入 30 sccm 氩气，并将硫族元素前驱体单独加热至 180 °C。在 750 °C 下生长 5 - 10 分钟。随后，通过湿法转移工艺将 MoS_2 样品转移至所需基底；该工艺包括以 3000 rpm 的转速旋涂 MoS_2 单层，使用的溶液为 5 ml 甲苯中含 0.5 wt% 聚苯乙烯（PS）的溶液（[450 mg PS，分子量 280,000 g/mol），旋涂 60 秒。

随后，将基底进行两步烘烤工艺：先在 90 °C 下烘烤 30 分钟，再在 120 °C 下烘烤 15 分钟。为使 MoS_2/PS 组装体从基底上剥离，采用表面能辅助转移技术：将一滴水滴在基底的一处裸露边缘，组装体便立即脱离。随后，用 Si/SiO_2 基底捞起 MoS_2/PS 薄膜，并按照上述相同条件进行烘烤。最后，使用甲苯溶解 PS 薄膜。

截面高分辨透射电子显微镜与 EDS 映射 –

采用高分辨透射电子显微镜（高分辨透射电子显微镜）对制备的异质结构器件进行了研究。利用配备 Dual-X 探测器（布鲁克公司，美国）EDS 探头的双 Cs 校正 HR-S/TEM（Titan Themis G2 60-300，FEI/Thermo Fisher，美国）进行 TEM 成像和元素分布映射。选定区域的 EDS 元素谱由 Velox 软件（Thermo-Fisher，美国）记录、处理和分析。采用标准聚焦离子束（FIB）光刻方法制备用于 TEM 分析的样品薄片截面。使用配备电感耦合等离子体（ICP）和气体注入系统（GIS）的双模式等离子体聚焦离子束（Helios 5，赛默飞世尔科技）工具，进行定点原位薄片制备。首先，沉积一层钨（W），以保护样品在制备薄片的聚焦离子束铣削过程中免受可能的损伤。随后，在 54° 入射角下用聚焦离子束切下感兴趣区域（薄片），并利用压电驱动钨针将其提取，转移至专用 TEM 网格的夹持部位，再通过标准原位束流诱导沉积技术将其成功焊接。之后，从两侧以不同入射角对薄片进行聚焦离子束抛光，完成最终减薄。

器件制备 –

采用标准电子束光刻 [Raith-eLine]，随后使用电子束蒸发 [Evatec BAK 501A] 沉积 5 nm 铬和 50 nm 金，制备接触电极。金属沉积前，使用温和的氧等离子体对样品进行处理，以去除多余的光刻胶残留 [低压等离子体系统 – Diener PCCE]，处理时间为 ~ 5 秒。金属沉积速率设为：铬 ~ 0.5 Å/s，金 ~ 1 Å/s；本底压力为 ~ 7 x 10^{-7} torr。

表面与光电表征 -

使用导电 Pt/Ir涂层悬臂梁[PPP-EFM-50，NANOSENSORS™ ，以频率调制（FM-KPFM）技术，在充氮气的手套箱内（H_2O 和 O_2 含量为 < 1 ppm）进行原子力显微镜（AFM）和开尔文探针力显微镜（KPFM）测量；手套箱型号为Dimension-Scanassist（Bruker Inc.），针尖半径为 ~ 25 nm]。使用[Keysight B1500A] 半导体参数分析仪和配备光学显微镜的探针台，在室温环境气氛下对异质结构场效应晶体管进行电学表征。使用强度均匀的白光光源（光谱范围为 420 nm - 720 nm），其光强为 ~ 332 μW/cm^2，以表征诱导偶极极化所产生的多级光响应效应。光均匀照射整个器件区域。

光谱表征 –

使用配备532 nm激光器的WITec Alpha 300R拉曼显微镜，以共聚焦模式进行拉曼和光致发光光谱测量，表征各单独的二维材料及其异质结构。使用100x物镜（NA = 0.9；Dl ~ 360 nm，600 g*mm^{-1} 光栅）聚焦激光束，同时将激发功率保持在~ 1 mW，以避免材料退化。

相关内容 -

补充信息 -

作者信息 -

通讯作者 –

Elad Koren - 纳米尺度电子材料与器件实验室， 材料科学与工程学院，以色列理工学院，海法，3200003，以色列。

orcid.org/0000-0001-7437-7124；电子邮箱 – eladk@technion.ac.il

作者 -

Debopriya Dutta - 纳米尺度电子材料与器件实验室， 材料科学与工程学院，以色列理工学院，海法，3200003，以色列。

orcid.org/0000-0003-2086-8336

Subhrajit Mukherjee - 纳米尺度电子材料与器件实验室， 材料科学与工程学院，以色列理工学院，海法，3200003，以色列。

orcid.org/0000-0003-2674-1264

Michael Uzhansky - 纳米尺度电子材料与器件实验室， 材料科学与工程学院，以色列理工学院，海法，3200003，以色列。

Pranab Kishore Mahapatra - 材料科学与工程系，特拉维夫大学，拉马特阿维夫，特拉维夫，6997801，以色列。

Ariel Ismach - 特拉维夫大学材料科学与工程系，拉马特阿维夫，特拉维夫，6997801，以色列。

orcid.org/0000-0002-4328-9591

作者贡献 –

D.D. 完成了实验工作，S.M. 和 M.U. 提供了实验支持，P. K. M. 进行了二维样品的 CVD 生长。A.I. 和 E.K. 负责监督该项工作。所有作者均参与了论文撰写。

利益冲突 -

作者声明不存在利益冲突。

致谢 -

D.D. 谨此感谢米里亚姆和亚伦·古特维尔特纪念奖学金及 KLA卓越奖学金的支持。E.K. 谨此感谢以色列科学基金会（ISF）项目（编号 [illegible]）和以色列创新局（[illegible]）提供的经费支持。并感谢 BPNL 提供纳米制造设施。P. K. M. 和 A. I. 感谢以色列科学基金会（ISF）的慷慨支持。项目编号分别为 2171/17 和 2596/21。作者感谢 MIKA 的科研人员 Yaron Kauffmann 博士和 Galit Ativa 博士提供的技术支持，分别协助进行截面电子显微成像和聚焦离子束样品制备。本研究使用了以色列理工学院的微纳米制造单元。我们感谢 Orvan Kelaery Abramson 博士进行留有成效的讨论。

参考文献 -

(1) Budania, P.; Baine, P.; Montgomery, J.; McGeough, C.; Cafolla, T.; Modreanu, M.; McNeill, D.; Mitchell, N.; Hughes, G.; Hurley, P. 机械剥离的 MoS2 薄片的长期稳定性。《MRS Communications》2017, 7 (4), 813–818. https://doi.org/10.1557/mrc.2017.105. (2) Fu, S.; Kang, K.; Shayan, K.; Yoshimura, A.; Dadras, S.; Wang, X.; Zhang, L.; Chen, S.; Liu, N.; Jindal, A.; Li, X.; Pasupathy, A. N.; Vamivakas, A. N.; Meunier, V.; Strauf, S.; Yang, E. H. 通过原位铁掺杂实现单层 MoS2 的室温铁磁性。《自然·通讯》2020, 11 (1), 6– 13. https://doi.org/10.1038/s41467-020-15877-7. (3) Kim, S.; Konar, A.; Hwang, W. S.; Lee, J. H.; Lee, J.; Yang, J.; Jung, C.; Kim, H.; Yoo, J. B.; Choi, J. Y.; Jin, Y. W.; Lee, S. Y.; Jena, D.; Choi, W.; Kim, K. 基于多层 MoS2 晶体的高迁移率低功耗薄膜晶体管。《自然·通讯》2012, 3. https://doi.org/10.1038/ncomms2018. (4) Radisavljevic, B.; Kis, A. 单层二硫化钼中的迁移率工程与金属-绝缘体相变。《自然·材料》2013, 12 (9), 815–820. https://doi.org/10.1038/nmat3687. (5) Wu, W.; De, D.; Chang, S. C.; Wang, Y.; Peng, H.; Bao, J.; Pei, S. S. 基于化学气相沉积单晶 MoS2 晶粒的高迁移率、高开关比场效应晶体管。《应用物理快报》2013, 102 (14). https://doi.org/10.1063/1.4801861. (6) Shih, C. J.; Wang, Q. H.; Son, Y.; Jin, Z.; Blankschtein, D.; Strano, M. S. 通过肖特基势垒调制调节 MoS2-石墨烯异质结构中的开关电流比和场效应迁移率。《ACS纳米》2014, 8 (6), 5790–5798. https://doi.org/10.1021/nn500676t. (7) Liu, X.; Yang, X.; Gao, G.; Yang, Z.; Liu, H.; Li, Q.; Lou, Z.; Shen, G.; Liao, L.; Pan, C.; Lin Wang, Z. 利用 GaN 纳米线的压电光电子效应增强自对准 MoS2 场效应晶体管的光响应度。《ACS纳米》2016, 10 (8), 7451–7457. https://doi.org/10.1021/acsnano.6b01839. (8) Lopez-Sanchez, O.; Lembke, D.; Kayci, M.; Radenovic, A.; Kis, A. 基于单层 MoS2 的超灵敏光电探测器。《Nature Nanotechnology》2013, 8 (7), 497–501. https://doi.org/10.1038/nnano.2013.100. (9) Mak, K. F.; Lee, C.; Hone, J.; Shan, J.; Heinz, T. F. 原子级薄 MoS2：一种新型直接带隙半导体。《Physical Review Letters》2010, 105 (13), 2–5. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.136805. (10) Chai, X.; Jiang, J.; Zhang, Q.; Hou, X.; Meng, F.; Wang, J.; Gu, L.; Zhang, D. W.; Jiang, A. Q. 非易失性铁电场效应晶体管。《自然·通讯》2020, 11 (1), 1–9. https://doi.org/10.1038/s41467-020- 16623-9. (11) Lee, H. J.; Zhang, S.; Luo, J.; Li, F.; Shrout, T. R. 弛豫型 PbTiO3 铁电体用于超声换能器的厚度依赖特性。《先进功能材料》2010, 20 (18), 3154–3162. https://doi.org/10.1002/adfm.201000390. (12) Oh, S.; Hwang, H.; Yoo, I. K. 用于神经形态计算的铁电材料。《APL Materials》2019, 7 (9). https://doi.org/10.1063/1.5108562. (13) Guo, R.; You, L.; Zhou, Y.; Lim, Z. S.; Zou, X.; Chen, L.; Ramesh, R.; Wang, J. 基于铁电体的非易失性存储器。《自然·通讯》2013, 4 (May), 2–6. https://doi.org/10.1038/ncomms2990. (14) Gao, J.; Zheng, Y.; Yu, W.; Wang, Y.; Jin, T.; Pan, X.; Loh, K. P.; Chen, W. 2D α-硒化铟中的本征极化耦合及其在具有多模式操作的人工突触中的应用。《SmartMat》2021, 2 (December 2020), 88–98. https://doi.org/10.1002/smm2.1020. (15) Wang, L.; Wang, X.; Zhang, Y.; Li, R.; Ma, T.; Leng, K.; Chen, Z.; Abdelwahab, I.; Loh, K. P. 探索 α-硒化铟中的铁电开关及其在神经形态计算中的应用。《先进功能材料》2020, 30 (45), 1–9. https://doi.org/10.1002/adfm.202004609.

(16) Kang, W.; Huber, J. E. 利用铁电/铁弹性开关进行能量采集的前景。《智能材料与结构》2019年，28（2）。https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaf4c6。(17) Shen, Z.; Wang, X.; Luo, B.; Li, L. $BaTiO_3$-$BiYbO_3$钙钛矿材料在储能应用中的应用。《材料化学A》2015年，3（35），18146–18153。https://doi.org/10.1039/c5ta03614c。(18) Ren, X.; Fan, H.; Zhao, Y.; Liu, Z. 柔性无铅$BiFeO_3$/PDMS基纳米发电机作为压电能量采集器。《ACS应用材料与界面》2016年，8（39），26190–26197。https://doi.org/10.1021/acsami.6b04497。(19) Takayama, R.; Tomita, Y.; Iijima, K.; Ueda, I. $PbTiO_3$、$PbLaTiO_3$和$PbZrTiO_3$铁电薄膜的热释电特性及其在红外传感器中的应用。《铁电体》1991年，118（1），325–342。https://doi.org/10.1080/00150199108014770。(20) Lipatov, A.; Fursina, A.; Vo, T. H.; Sharma, P.; Gruverman, A.; Sinitskii, A. 石墨烯/Pb(Zr,Ti)O_3铁电场效应晶体管中的极化依赖电子输运。《先进电子材料》2017年，3（7），1–8。https://doi.org/10.1002/aelm.201700020。(21) Wu, F.; Tian, H.; Shen, Y.; Hou, Z.; Ren, J.; Gou, G.; Sun, Y.; Yang, Y.; Ren, T. L. 具有亚1纳米栅长的垂直MoS_2晶体管。《自然》2022年，603（7900），259–264。https://doi.org/10.1038/s41586-021-04323-3。(22) Liu, F.; You, L.; Seyler, K. L.; Li, X.; Yu, P.; Lin, J.; Wang, X.; Zhou, J.; Wang, H.; He, H.; Pantelides, S. T.; Zhou, W.; Sharma, P.; Xu, X.; Ajayan, P. M.; Wang, J.; Liu, Z. $CuInP_2S_6$超薄薄片中的室温铁电性。《自然·通讯》2016年，7，1–6。https://doi.org/10.1038/ncomms12357。(23) Fei, Z.; Zhao, W.; Palomaki, T. A.; Sun, B.; Miller, M. K.; Zhao, Z.; Yan, J.; Xu, X.; Cobden, D. H. 二维金属的铁电开关。《自然》2018年，560（7718），336–339。https://doi.org/10.1038/s41586-018-0336-3。(24) Chang, K.; Liu, J.; Lin, H.; Wang, N.; Kun, Z.; Zhang, A.; Jin, F.; Zhong, Y.; Hu, X.; Duan, W.; Zhang, Q.; Fu, L.; Xue, Q.-K.; Chen, X.; Shuai-Hua, J. 原子级厚度SnTe中稳健面内铁电性的发现。《科学》（80-.）2016年，353（6296），274–278。(25) Wan, S.; Li, Y.; Li, W.; Mao, X.; Wang, C.; Chen, C.; Dong, J.; Nie, A.; Xiang, J.; Liu, Z.; Zhu, W.; Zeng, H. 超薄α-硒化铟中的非易失性铁电存储效应。《先进功能材料》2019年，29（20），1–7。https://doi.org/10.1002/adfm.201808606。(26) Zheng, C.; Yu, L.; Zhu, L.; Collins, J. L.; Kim, D.; Lou, Y.; Xu, C.; Li, M.; Wei, Z.; Zhang, Y.; Edmonds, M. T.; Li, S.; Seidel, J.; Zhu, Y.; Liu, J. Z.; Tang, W. X.; Fuhrer, M. S. 范德华In_2Se_3中的室温面内铁电性。《科学进展》2018年，4（7），1–8。https://doi.org/10.1126/sciadv.aar7720。(27) Xue, F.; Hu, W.; Lee, K. C.; Lu, L. S.; Zhang, J.; Tang, H. L.; Han, A.; Hsu, W. T.; Tu, S.; Chang, W. H.; Lien, C. H.; He, J. H.; Zhang, Z.; Li, L. J.; Zhang, X. 从单层极限以下的六方层状α-硒化铟纳米薄片中的室温铁电性。《先进功能材料》2018年，28（50），1–7。https://doi.org/10.1002/adfm.201803738。(28) Cui, C.; Hu, W. J.; Yan, X.; Addiego, C.; Gao, W.; Wang, Y.; Wang, Z.; Li, L.; Cheng, Y.; Li, P.; Zhang, X.; Alshareef, H. N.; Wu, T.; Zhu, W.; Pan, X.; Li, L. J. 超薄二维层状半导体硒化铟中的面内与面外铁电性的相互关联。《纳米快报》2018年，18（2），1253–1258。https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b04852。(29) Dutta, D.; Mukherjee, S.; Uzhansky, M.; Koren, E. 通过二维In_2Se_3中的相互耦合铁电性实现交叉场光电调制。《npj二维材料与应用》2021年，5（1），1–8。https://doi.org/10.1038/s41699-021-00261-w。(30) Xue, F.; He, X.; Retamal, J. R. D.; Han, A.; Zhang, J.; Liu, Z.; Huang, J. K.; Hu, W.; Tung, V.; He, J. H.; Li

,

L. J.; Zhang, X. 范德华铁电体中的栅极可调和多方向可切换忆阻现象。《先进材料》2019年，31 (29), 1–9. https://doi.org/10.1002/adma.201901300.

(31) Xiao, J.; Zhu, H.; Wang, Y.; Feng, W.; Hu, Y.; Dasgupta, A.; Han, Y.; Wang, Y.; Muller, D. A.; Martin, L. W.; Hu, P.; Zhang, X. 具有偶极锁定的本征二维铁电性。《Physical Review Letters》2018年，*120* (22), 227601. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.227601. (32) Mukherjee, S.; Koren, E. 硒化铟（硒化铟）– 一种用于光探测和非易失性存储器应用的新兴范德华材料。《以色列化学杂志》2022年，*202100112*。 https://doi.org/10.1002/ijch.202100112. (33) Ding, W.; Zhu, J.; Wang, Z.; Gao, Y.; Xiao, D.; Gu, Y.; Zhang, Z.; Zhu, W. 预测硒化铟和其他 III 2 -VI 3 范德华材料中的本征二维铁电体。《自然·通讯》 2017年

，

8, 1–8. https://doi.org/10.1038/ncomms14956. (34) Quereda, J.; Biele, R.; Rubio-Bollinger, G.; Agraït, N.; D'Agosta, R.; Castellanos-Gomez, A. 超薄α-硒化铟的光学性质中显著的量子限域效应。《先进光学材料》2016, 4 (12)

，

1939–1943。https://doi.org/10.1002/adom.201600365。（35）Mukherjee, S.; Dutta, D.; Mohapatra, P. K.; Dezanashvili, L.; Ismach, A.; Koren, E. 二维 In2Se3 上共面异质结单片器件的可扩展集成。《ACS纳米》2020，14（12），17543–17553。https://doi.org/10.1021/acsnano.0c08146。（36）Collins, J. L.; Wang, C.; Tadich, A.; Yin, Y.; Zheng, C.; Hellerstedt, J.; Grubišić-Čabo, A.; Tang, S.; Mo, S.-K.; Riley, J.; Huwald, E.; Medhekar, N. V; Fuhrer, M. S.; Edmonds, M. T. 面内铁电范德华 B′-In2Se3 的电子能带结构。《ACS应用电子材料》2020，2（1），213–219。https://doi.org/10.1021/acsaelm.9b00699。（37）Sun, B.; Wang, Z.; Liu, Z.; Tan, X.; Liu, X.; Shi, T.; Zhou, J.; Liao, G. 通过在间隙模式中优化局域表面等离激元调控银纳米立方体，用于柔性 MoS2 光电探测器。《先进功能材料》2019，29（26），1–8。https://doi.org/10.1002/adfm.201900541。（38）Zhang, K.; Peng, M.; Yu, A.; Fan, Y.; Zhai, J.; Wang, Z. L. 通过双光栅控效应实现基底增强型 MoS2 光电探测器。《材料视界》2019，6（4），826–833。https://doi.org/10.1039/C8MH01429A。（39）Jadwiszczak, J.; Li, G.; Cullen, C. P.; Wang, J. J.; Maguire, P.; Duesberg, G. S.; Lunney, J. G.; Zhang, H. 快速 O2:氩气等离子体处理增强单层 MoS2 的光响应度。《应用物理快报》2019，114（9），91103。https://doi.org/10.1063/1.5086726。（40）Gonzalez Marin, J. F.; Unuchek, D.; Watanabe, K.; Taniguchi, T.; Kis, A. 集成于光子电路中的 MoS2 光电探测器。《npj二维材料与应用》2019，3（1），14。https://doi.org/10.1038/s41699-019-0096-4。（41）Feng, W.; Jin, Z.; Yuan, J.; Zhang, J.; Jia, S.; Dong, L.; Yoon, J.; Zhou, L.; Vajtai, R.; Tour, J. M.; Ajayan, P. M.; Hu, P.; Lou, J. 基于 GaTe–InSe 垂直二维 p–n 异质结的快速零偏压光电探测器。《二维材料》2018，5（2）。https://doi.org/10.1088/2053-1583/aaa721。（42）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。《科学》（80-.）2004，306（5696），666 LP – 669。https://doi.org/10.1126/science.1102896。（43）Lewandowska, R.; Bacewicz, R.; Filipowicz, J.; Paszkowicz, W. α-In2Se3 晶体中的拉曼散射。《材料研究通报》2001，36（15），2577–2583。（44）Igo, J.; Gabel, M.; Yu, Z. G.; Yang, L.; Gu, Y. 用于超薄光电二极管的二维 In2Se3 纳米层中的光刻定义面内异质结构。《ACS应用纳米材料》2019，2（10），6774–6782。https://doi.org/10.1021/acsanm.9b01745。（45）Mukherjee, S.; Dutta, D.; Uzhansky, Michael; Koren, E. 使用光电子输入实现多比特非易失性存储和逻辑运算的单片 In2Se3–In2O3 异质结。《npj二维材料与应用》2022，6（37），1–9。https://doi.org/10.1038/s41699-022-00309-5。（46）Si, M.; Saha, A. K.; Gao, S.; Qiu, G.; Qin, J.; Duan, Y.; Jian, J.; Niu, C.; Wang, H.; Wu, W.; Gupta, S. K.;

Ye, P. D. 铁电半导体场效应晶体管。《自然·电子学》2019，2（12），580–586。https://doi.org/10.1038/s41928-019-0338-7。（47）Tao, X.; Gu, Y. 二维 In 2Se3 薄层中的晶态-晶态相变。《纳米快报》2013，13（8），3501–3505。https://doi.org/10.1021/nl400888p。（48）Jacobs-Gedrim, R. B.; Shanmugam, M.; Jain, N.; Durcan, C. A.; Murphy, M. T.; Murray, T. M.; Matyi, R. J.; Moore, R. L.; Yu, B. 二维 In2Se3 纳米片中的非凡光响应。《ACS纳米》2014，8（1），514–521。https://doi.org/10.1021/nn405037s。（49）Cao, W.; Dai, M.; Yang, B.; Li, K.; Wang, F.; Hu, P.; Zhai, T.; Jia, D.; Hu, Y.; Zhou, Y.; Zhang, J.; Fu, Y. 二维范德华铁电体中的本征偶极耦合及其用于栅控可切换整流器。《先进电子材料》2019。https://doi.org/10.1002/aelm.201900975。（50）Wang, X.; Zhu, C.; Deng, Y.; Duan, R.; Chen, J.; Zeng, Q.; Zhou, J.; Fu, Q.; You, L.; Liu, S.; Edgar, J. H.; Yu, P.; Liu, Z. 用于长保持存储器的铁电异质结构范德华工程。《自然·通讯》2021，12（1）。https://doi.org/10.1038/s41467-021-21320-2。（51）Ali, T.; Polakowski, P.; Riedel, S.; Büttner, T.; Kämpfe, T.; Rudolph, M.; Pätzold, B.; Seidel, K.; Löhr, D.; Hoffmann, R.; Czernohorsky, M.; Kühnel, K.; Steinke, P.; Calvo, J.; Zimmermann, K.; Müller, J. 无保持性能损失的高耐久性铁电铪氧化物基 FeFET 存储器。《IEEE电子器件汇刊》2018，65（9），3769–3774。https://doi.org/10.1109/TED.2018.2856818。（52）Tan, Q.; Wang, Q.; Liu, Y.; Yan, H.; Cai, W.; Yang, Z. 具有 HfO2 缺陷控制层的单壁碳纳米管主导的微米宽条纹图案铁电场效应晶体管。《纳米尺度研究快报》2018，13（1），127。https://doi.org/10.1186/s11671-018-2534-1。（53）Sakai, S.; Takahashi, M. 铁电栅场效应晶体管的最新进展及其在非易失逻辑和 FeNAND 闪存中的应用。《材料》2010，第4950–4964页。https://doi.org/10.3390/ma3114950。（54）Yurchuk, E.; Müller, J.; Müller, S.; Paul, J.; Peši, M.; Bentum, R. Van; Schroeder, U.; Mikolajick, T.; Member, S.; Ferroelectric, A. HfO 2 基 FeFET 型非易失性存储器中的电荷俘获现象。2016，63（9），3501–3507。（55）Pešić, M.; Hoffmann, M.; Richter, C.; Mikolajick, T.; Schroeder, U. 基于 ZrO2 中类反铁电滞回的非易失性随机存取存储器和储能。《先进功能材料》2016，26（41），7486–7494。https://doi.org/10.1002/adfm.201603182。（56）Gong, Y.; Lin, J.; Wang, X.; Shi, G.; Lei, S.; Lin, Z.; Zou, X.; Ye, G.; Vajtai, R.; Yakobson, B. I.; Terrones, H.; Terrones, M.; Tay, B. K.; Lou, J.; Pantelides, S. T.; Liu, Z.; Zhou, W.; Ajayan, P. M. 由 WS2/MoS2 单层构成的垂直和面内异质结构。《自然·材料》2014，13（12），1135–1142。https://doi.org/10.1038/nmat4091。（57）Koren, E.; Berkovitch, N.; Azriel, O.; Boag, A.; Rosen waks, Y.; Hemesath, E. R.; Lauhon, L. J. 纳米线肖特基结耗尽区的直接测量。《应用物理快报》2011，99（22），1–4。https://doi.org/10.1063/1.3665182。（58）Brill, A. R.; Kafri, A.; Mohapatra, P. K.; Ismach, A.; De Ruiter, G.; Koren, E. 通过高度定向的偶极生成单层调控 MoS2 的光电性质。《ACS应用材料与界面》2021，13（27），32590–32597。https://doi.org/10.1021/acsami.1c09035。（59）Wen, B.; Zhu, Y.; Yudistira, D.; Boes, A.; Zhang, L.; Yidirim, T.; Liu, B.; Yan, H.; Sun, X.; Zhou, Y.; Xue, Y.; Zhang, Y.; Fu, L.; Mitchell, A.; Zhang, H.; Lu, Y. 单层二硒化钼和二硒化钨中的铁电驱动的激子和带电激子调控。《ACS纳米》2019，13（5），5335–5343。https://doi.org/10.1021/acsnano.8b09800。（60）Katznelson, S.; Cohn, B.; Sufrin, S.; Amit, T.; Mukherjee, S.; Kleiner, V.; Mohapatra, P.; Patsha, A.; Ismach, A.; Refaely-Abramson, S.; Hasman, E.; Koren, E. 室温下二维过渡金属二硫族化物中由暗激子跃迁介导的明亮激子多路复用。《材料视界》2022，9（3），1089–

1098. https://doi.org/10.1039/d1mh01186c.

(61) Förste, J.; Tepliakov, N. V; Kruchinin, S. Y.; Lindlau, J.; Funk, V.; Förg, M.; Watanabe, K.; Taniguchi, T.; Baimuratov, A. S.; Högele. 实验与理论研究单层和双层 WSe2 中的激子 g 因子。《自然·通讯》2020, 11 (1), 4539. https://doi.org/10.1038/s41467-020-18019-1. (62) Mak, K. F.; He, K.; Lee, C.; Lee, G. H.; Hone, J.; Heinz, T. F.; Shan. 单层 MoS2 中的紧束缚带电激子。《自然·材料》2013年, 12 (3), 207–211. https://doi.org/10.1038/nmat3505. (63) Zhou, B.; Jiang, K.; Shang, L.; Zhang, J.; Li, Y.; Zhu, L.; Gong, S.-J.; Hu, Z.; Chu. 铁电 In2Se3/MoS2 范德华异质结构中增强的载流子分离。2020年。https://doi.org/10.1039/D0TC02366C. (64) Sarkar, A. S.; Konidakis, I.; Demeridou, I.; Serpetzoglou, E.; Kioseoglou, G.; Stratakis. 玻璃基质中嵌入银纳米异质结的少层 MoS2 在室温下表现出稳健的 B 激子发射。《科学报告》2020, 10 (1), 1–10. https://doi.org/10.1038/s41598-020-72899-3. (65) Lee, Y.; Tran, T. T.; Kim, Y.; Roy, S.; Taniguchi, T.; Watanabe, K.; Jang, J. I.; Kim, J. 六方氮化硼衬底上单层 WS2 中增强的辐射激子复合与非辐射激子-激子湮灭之间的竞争。ACS Photonics 2022年, 9 (3), 873–879. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.1c01584. (66) Lin, Y.; Ling, X.; Yu, L.; Huang, S.; Hsu, A. L.; Lee, Y. H.; Kong, J.; Dresselhaus, M. S.; Palacios, T. 单层 MoS2 中激子和带电激子的介电屏蔽。《纳米快报》2014年, 14 (10), 5569–5576. https://doi.org/10.1021/nl501988y. (67) Mohapatra, P. K.; Ranganathan, K.; Ismach, A. 高光学质量 MoS2 层的选择性区域生长与转移。《先进材料·界面》2020, 7 (24). https://doi.org/10.1002/admi.202001549. (68) Mohapatra, P. K.; Deb, S.; Singh, B. P.; Vasa, P.; Dhar, S. 在多种衬底上制备严格单层的大面积连续 MoS2 薄膜及其发光性质。《应用物理快报》2016, 108 (4). https://doi.org/10.1063/1.4940751.

图 –

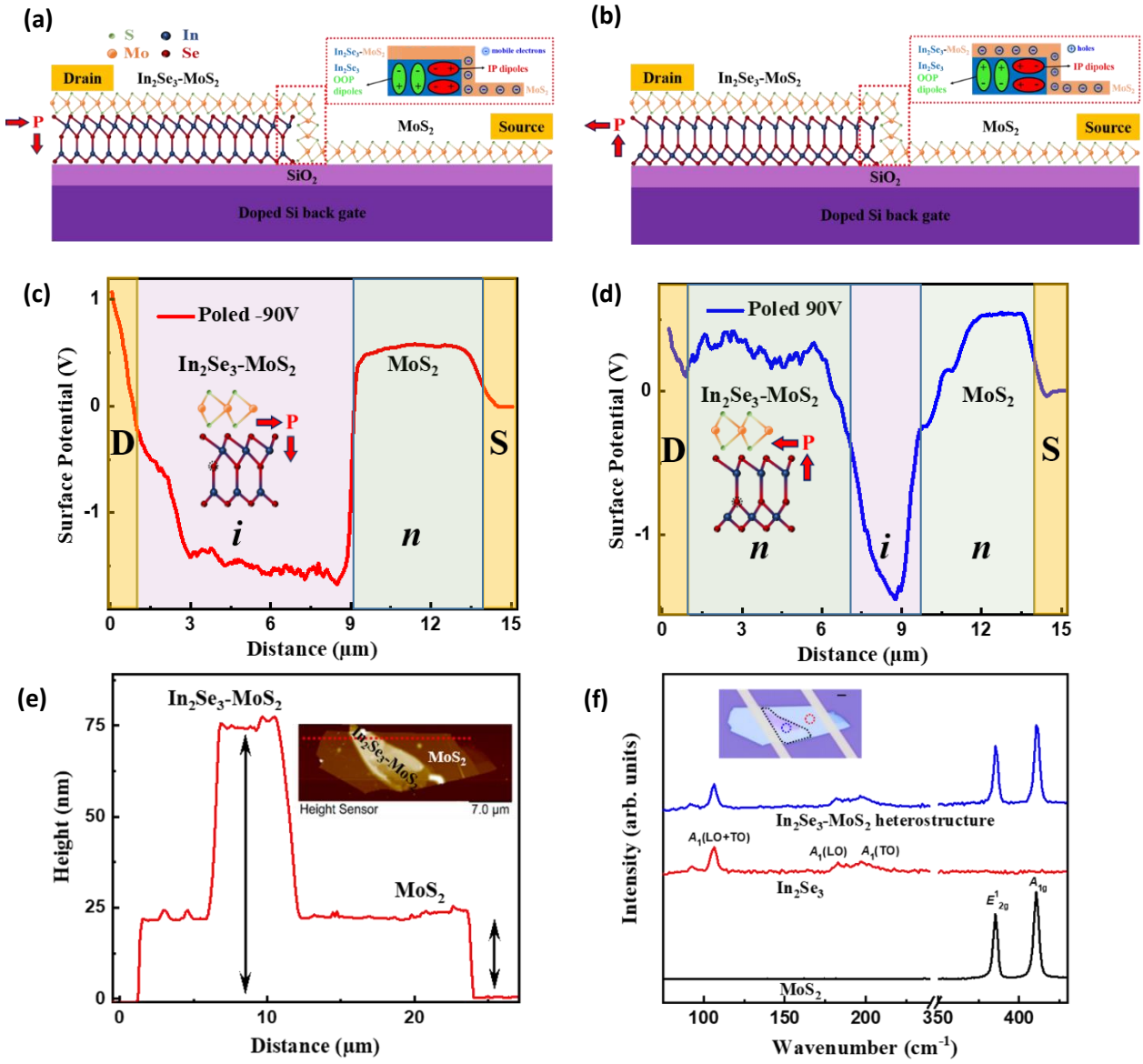

图*1* – 偶极诱导电荷浓度调制及异质结构表征的器件示意图 – 将硫化钼$_2$ 转移至 In_2Se_3 上的异质结构示意图，以及分别对应于 (a) 负向和 (b) 正向极化的原子排列。红色虚线框显示了放大的电荷浓度调制，以及由于 In_2Se_3中面外（绿色椭圆）和面内（红色椭圆）偶极取向所导致的硫化钼$_2$ 中电子迁移。面外偶极会在上层硫化钼$_2$, 中形成局部的“i”和“n”区域，其取决于红色箭头所示的极化方向。开尔文探针剖面分别显示了 (c) 负向和 (d) 正向极化下的局部“p”和“n”区域。(e) 所研究器件的高度剖面；插图为器件的原子力显微镜形貌，其中红线标示所示横截面形貌剖面；(f) 在黑色圆点标记位置测得的硫化钼$_2$ 薄片（黑色）拉曼光谱、在蓝色圆点标记位置测得的异质结构（蓝色）拉曼光谱，以及在转移硫化钼$_2$ 之前测得的α-In_2Se_3 （红色）拉曼光谱（插图显示器件的光学图像）。下层的α-In_2Se_3 以绿色虚线框标出。

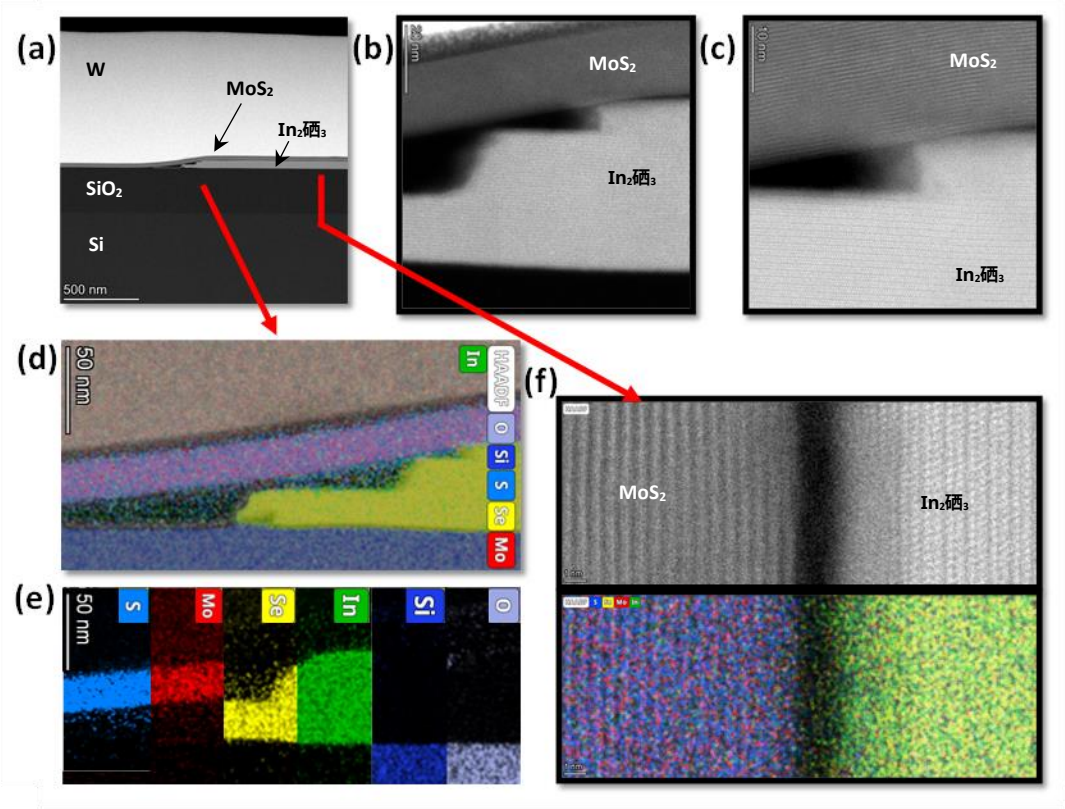

图2 – *SiO_2*/硅衬底上垂直堆叠的硫化钼$_2$/硒化铟$_3$ 层的截面扫描透射电子显微镜图像$_2$– (a) 图像显示部分重叠的硒化铟$_2Se_3$-硫化钼$_2$ 异质结构。顶部的亮层为钨金属保护层，底部两个暗区分别为300 nm厚的SiO_2 和Si。（b）边缘处的放大图像展示了接触界面的性质。（c）高分辨透射电子显微镜图像显示了两种材料的结晶质量和二维层状结构。（d）硒化铟$_2Se_3$-硫化钼$_2$ 异质结构的扫描透射电子显微镜/能量色散X射线谱信号映射。（e）将各元素的单独分布曲线以不同伪彩色表示并组合，展示整个器件的元素分布，各元素标注于相应插图中。在硫化钼$_2$/硒化铟$_2Se_3$ 异质结构中，氧信号可忽略不计。（f）垂直异质结构界面（取自标记区域）的高分辨透射电子显微镜图像及对应的能量色散X射线谱元素分布图，显示出良好的结晶性、无界面缺陷且元素分布不存在相互混合：Mo和S信号仅出现在上层，In和Se信号仅出现在下层。

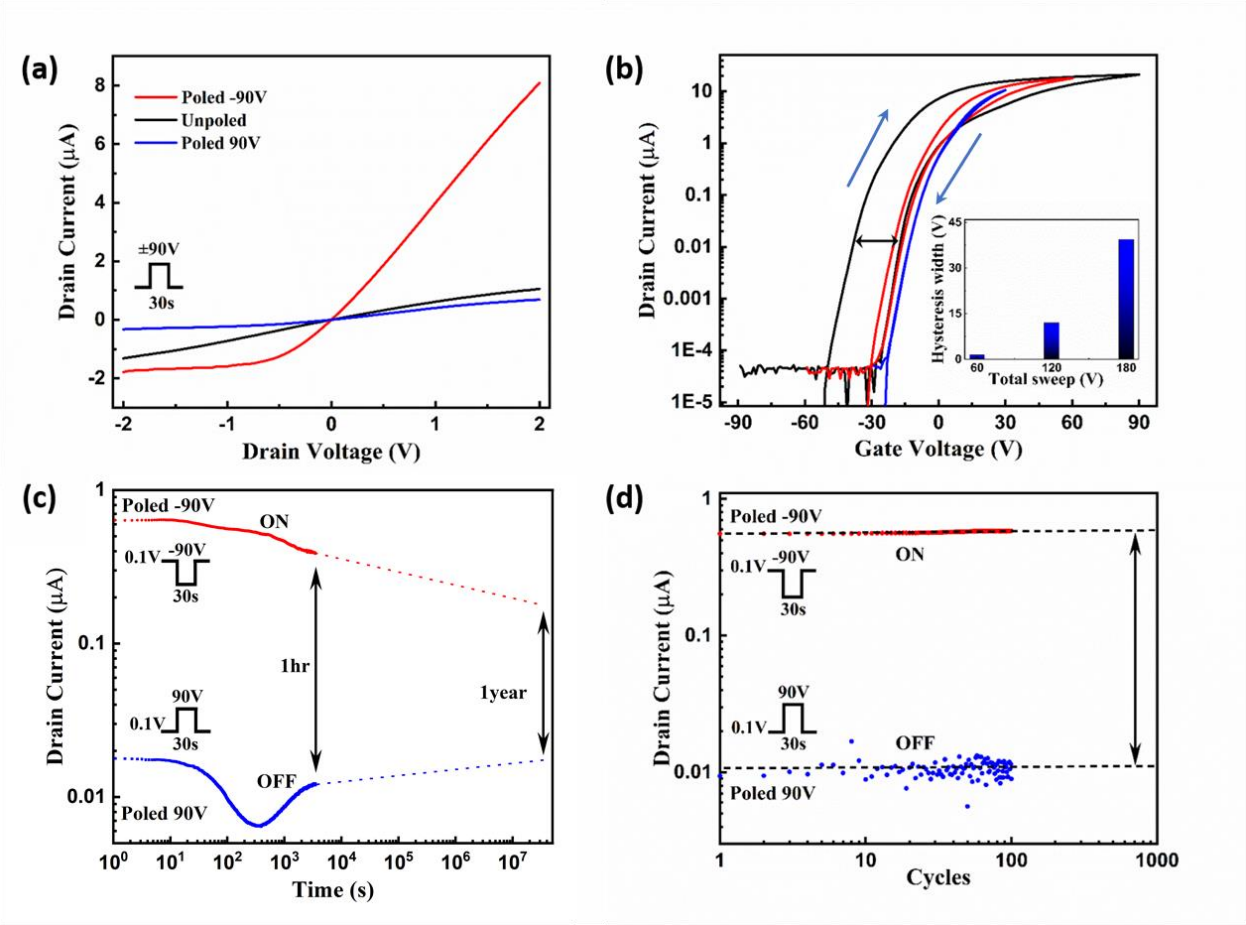

图*3* – 电学表征 – (a) 在不同栅极极化条件下的 I_D-V_D 特性（插图中标出了栅极脉冲，即栅极电压施加了 30 秒）。(b) 不同栅极范围扫描下的 I_D-V_G 特性，显示出顺时针滞后行为；插图显示，随着器件扫描电压增大，滞后现象增强。(c) 在相应极化条件后，于 V_G = 0 V 和 V_D =0.1 V 下测得的“关”和“开”状态保持测试，显示其保持特性符合预期，可超过 1 年（更多详情见补充章节）。(d) 铁电场效应晶体管的耐久性测试，显示在极化后，“开”和“关”状态下的电流水平在至少 100 次循环后仍保持稳定（耐久性测试前施加的栅极脉冲以及测试期间施加的漏极电压均标于插图中）。

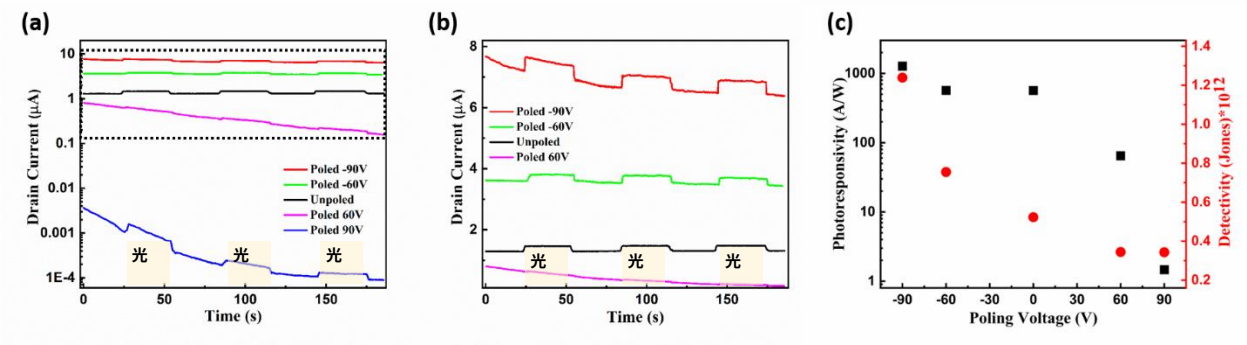

图*4* – 极化依赖的光响应 – (a) 在不同栅极电压和可见光脉冲照射下，极化后的漏极电流；(b) (a) 中黑色虚线框标记的选定极化电压下的漏极电流；(c) 不同极化条件下计算得到的光响应度和探测率。

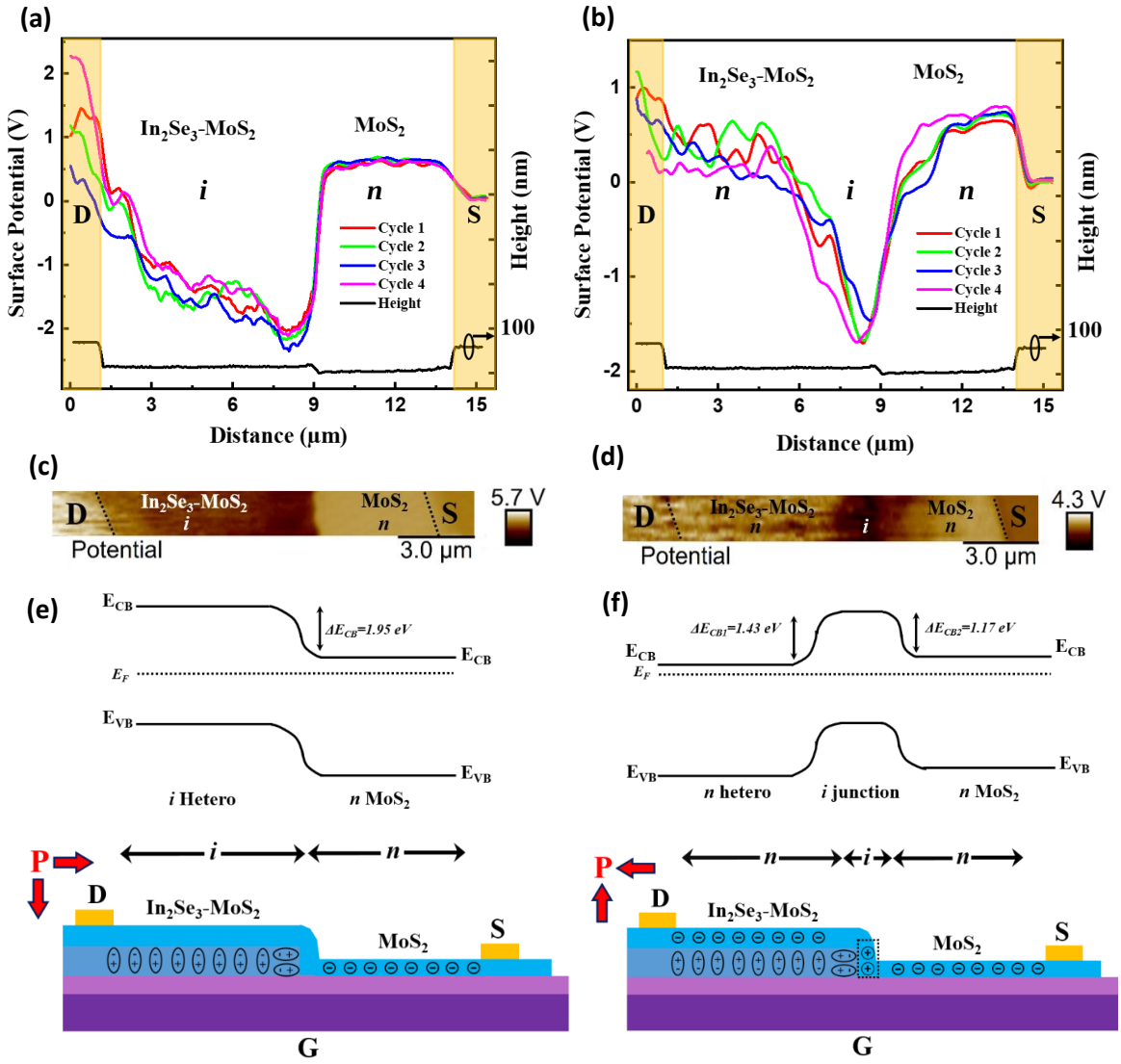

图5 – α-In_2Se_3 中的极化导致铁电场效应晶体管的表面电势研究及电导调制机制——在多次撤去施加的栅极电压（a）- 90 V和（b）+ 90 V后2分钟测得的器件沟道电势分布；右侧Y轴显示高度剖面。插图显示撤去相应栅极脉冲后In_2Se_3-MoS_2 异质结构部分对应的晶体取向。撤去施加的栅极电压（c）- 90 V和（d）+ 90 V后铁电场效应晶体管的表面电势图，显示出明显的n区和i区。示意图展示了In_2Se_3 中诱导的偶极极化，以及根据基于表面电势映射提取的能带图，在（e）负背栅电势和（f）正背栅电势下MoS_2 沟道中相应形成的n区和i区。

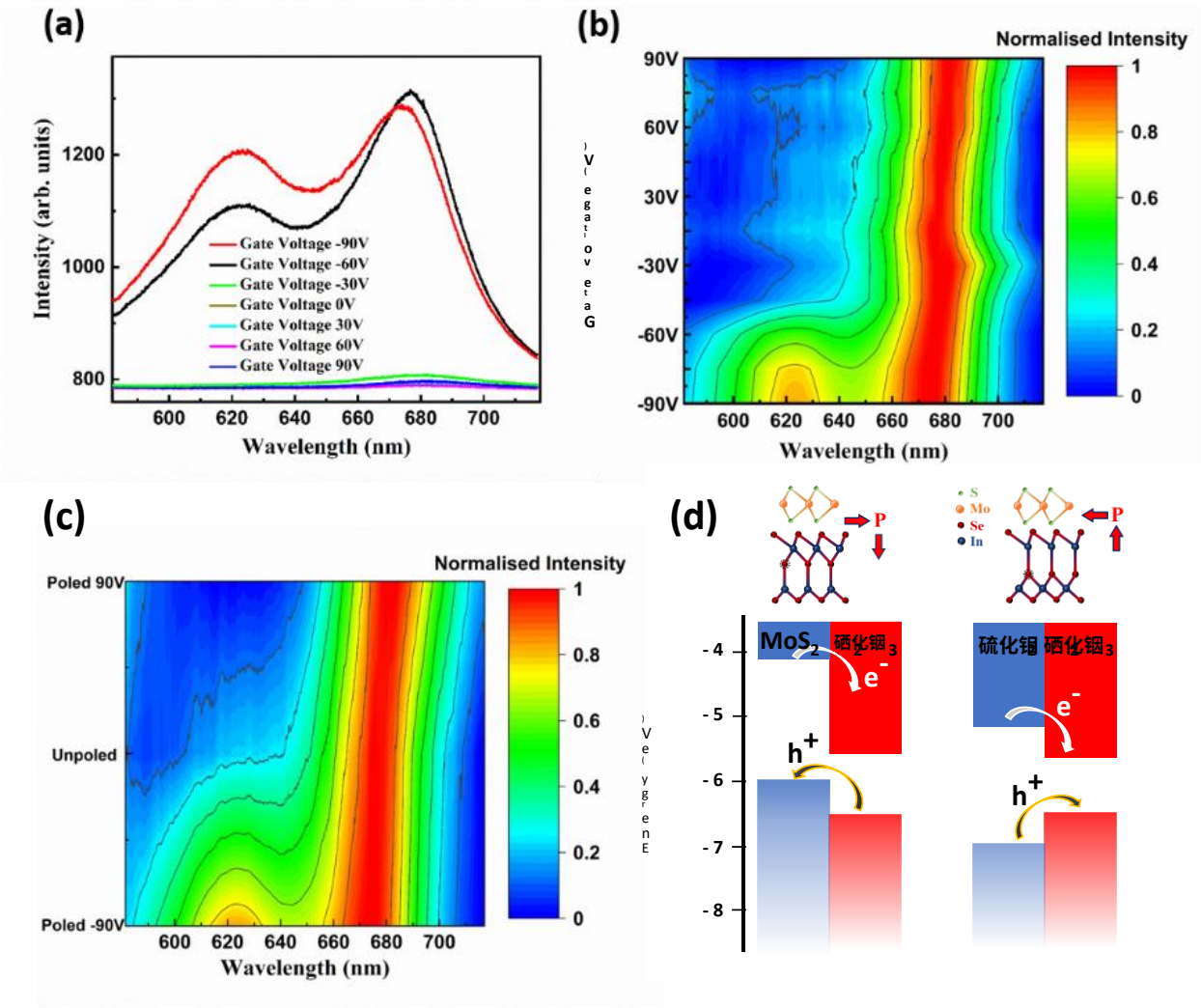

图*6* – 偏振依赖光致发光 – (a) α-In_2Se_3-MoS_2 异质结构在不同栅极电压下的光致发光光谱；(b) 不同施加的栅极电压下归一化光致发光强度的等高线图。(c) 撤去施加的栅极电压 10 分钟后归一化光致发光强度的等高线图，表明偏振诱导光致发光的保持特性。(d) 撤去施加的栅极电压后，不同诱导偏振态下 In_2Se_3-MoS_2 异质结构电子能带结构排列的示意图。