

钙钛矿与过渡金属硫族化合物范德华异质结光电探测器的研究进展

董子衿

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2026年4月27日; 录用日期: 2026年5月26日; 发布日期: 2026年6月3日

摘要

单层过渡金属硫族化合物(TMDs)与金属卤化物钙钛矿构成的异质结由于其优异性能,在新一代光电器件领域展现出巨大的应用潜力,也引起了研究领域人们的广泛兴趣。一方面,TMDs材料因维度降低带来弱介电屏蔽,具有较高的激子结合能。同时,强自旋-轨道耦合在K点诱导出显著的价带自旋分裂,赋予其较大的自旋轨道分裂能,为光电器件研究提供了重要平台。另一方面,金属卤化物钙钛矿是一种可溶液制备的半导体,具有强光吸收、成分可调、长载流子寿命和长扩散距离等优点。与激子结合能普遍高于250 meV的有机半导体不同,有机-无机卤化物钙钛矿的激子结合能仅约30 meV,表明光激发产生的激子更易解离为自由电子和空穴,有利于激子分离和电荷转移。因此,将具有高光吸收系数的钙钛矿(如纳米线、量子点或薄膜)与单层TMDs结合构建异质结,可实现独特的光电性能调控,为高性能光电探测器的研发开辟新路径。

关键词

光电探测器, 过渡金属硫族化合物, 钙钛矿, 异质结

Recent Advances in Photodetectors Based on Van Der Waals Heterostructures of Perovskites and Transition Metal Dichalcogenides

Zijin Dong

School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Received: April 27, 2026; accepted: May 26, 2026; published: June 3, 2026

Abstract

Van der Waals heterostructures formed by monolayer transition metal dichalcogenides (TMDs) and metal halide perovskites have attracted extensive attention and exhibit great potential for next-generation optoelectronic devices. On the one hand, reduced dimensionality in TMDs leads to weak dielectric screening and thus large exciton binding energies. Meanwhile, strong spin-orbit coupling induces pronounced valence band splitting at the K point, endowing these materials with sizable spin-orbit splitting and making them an excellent platform for optoelectronic device research. On the other hand, metal halide perovskites are solution-processable semiconductors featuring strong light absorption, tunable composition, long carrier lifetimes, and extended diffusion lengths. Unlike organic semiconductors with exciton binding energies typically exceeding 250 meV, organic-inorganic halide perovskites exhibit much lower values (~30 meV), indicating that photogenerated excitons can readily dissociate into free carriers, thereby facilitating exciton separation and interfacial charge transfer. Therefore, integrating high-absorption perovskites (e.g., nanowires, quantum dots, or thin films) with monolayer TMDs to construct heterostructures enables unique optoelectronic modulation and opens new avenues for high-performance photodetectors.

Keywords

Photodetector, Transition Metal Dichalcogenides, Perovskite, Heterojunction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

传统商用光电探测器长期以来以硅基材料为主导。硅基探测器得益于成熟的 CMOS 工艺，具有低成本和高集成度的优势[1]。然而，硅作为典型的间接带隙半导体，其室温下的带隙能量约为 1.12 eV，其本征吸收的截止波长约为 1100 nm [2]。这一固有能带结构决定了硅基探测器的探测波长被严格限制在该阈值以内，当入射光波长超过 1100 nm 时，光子能量低于硅的带隙能量，无法满足本征吸收条件，导致光生载流子生成效率急剧下降[1]。尤其在近红外波段(如 1310 nm、1550 nm 等光纤通信核心波段)，硅的吸收系数呈现数量级衰减，即使增加吸收层厚度也难以实现有效光吸收[3]，使其难以胜任红外探测的应用场景。

在此背景下，以过渡金属硫族化合物(Transition Metal Dichalcogenides, TMDs)为代表的二维材料在光电探测领域展现出巨大潜力。该材料具有高载流子迁移率[4]、高效开关比[5]、可见光到太赫兹波段宽带光响应[6]等优异性质。此外，TMDs 突破了零带隙的局限，并展现出层数依赖的光学现象：当从多层变为单层时，由于减小的介电屏蔽效应，导致 TMDs 由间接带隙半导体转变为直接带隙半导体[7]。然而，由于 TMDs 的原子薄性和强激子效应，导致其光吸收弱、激子寿命短，严重制约了 TMDs 在光电领域的应用[8]。

与 TMDs 的优势互补，金属卤化物钙钛矿材料展现出多项引人注目的优势。金属卤化物钙钛矿具有强光吸收、成分可调、载流子寿命长和扩散长度长等优点[9]。与一般有机半导体材料相比，有机-无机卤化物钙钛矿的激子结合能只有 30 meV 左右，而一般有机半导体材料的激子结合能均高于 250 meV [10]，这表明钙钛矿材料受光激发后产生的激子更易解离成自由的电子和空穴，有助于激子的分离和电荷转移。

更为关键的是, 高质量钙钛矿薄膜与单晶可通过离心涂层等低成本溶液法加工制备[11], 这与传统半导体所需的高温高真空外延生长工艺形成鲜明对比。此外, 通过组分设计(如 A 位阳离子或 X 位卤素阴离子的调控), 钙钛矿的带隙可在可见至近红外范围内连续调节, 实现宽光谱响应[12]。

将钙钛矿与 TMDs 复合构筑范德华异质结构, 能够充分发挥两者的协同效应, 已成为突破单一材料性能瓶颈的重要策略。钙钛矿/二维材料异质结能显著抑制光生载流子的复合。其中应用最为广泛的 type-II 型能带排列, 能够有效驱动光生电子 - 空穴对在界面处发生分离[13], 从而提升光电器件的性能。基于此, 本文综述了该复合体系在光电探测器领域的研究进展。首先概述了两类材料的基本光电性质和器件结构类型; 在此基础上, 重点阐述了异质结在载流子动力学和器件性能增强方面的关键研究成果, 并对未来的发展方向进行了展望。

2. 构成光电探测器的材料的光电性质

2.1. 二维过渡金属硫族化合物光电性质

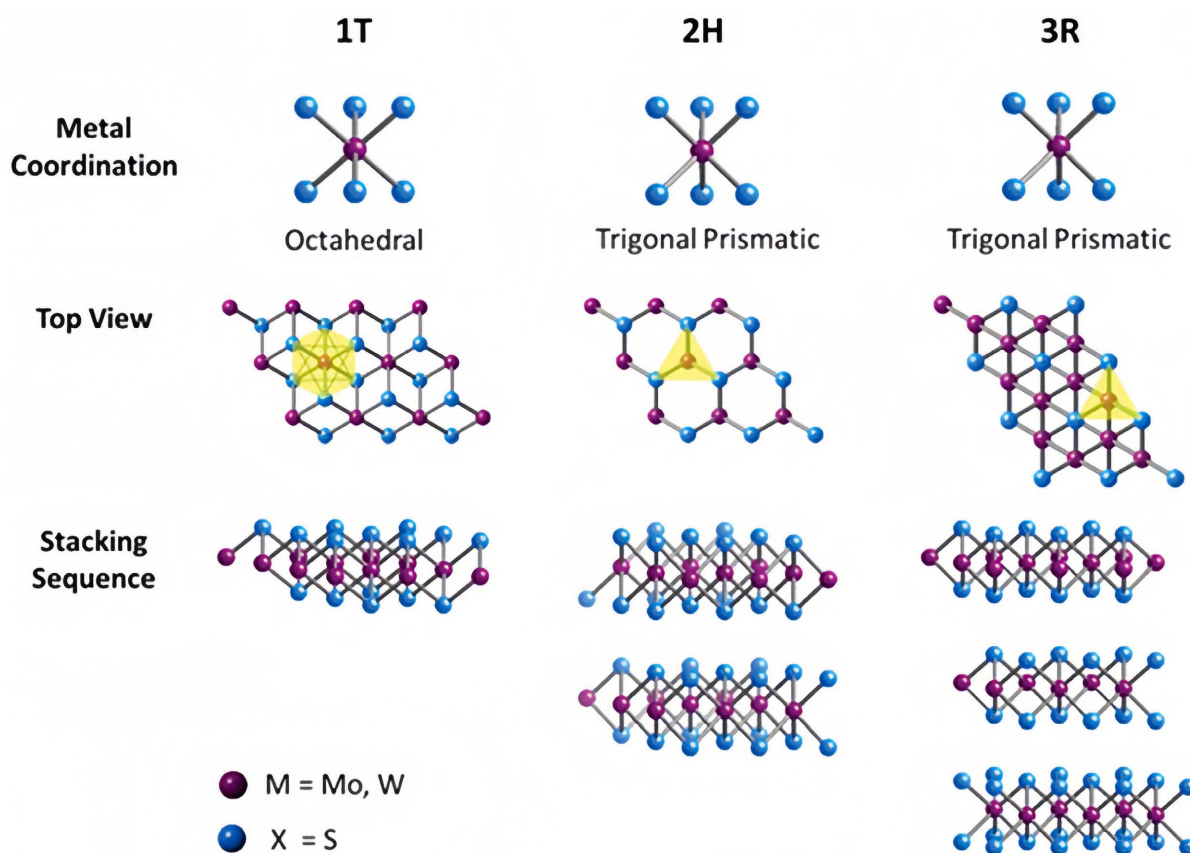


Figure 1. Metal coordination and stacking sequences of transition metal dichalcogenide (TMDC) structural unit cells. Metal coordination can be either octahedral or trigonal prismatic. The octahedral coordination allows stacking sequences which yield a tetragonal symmetry (1T). Dissimilar stacking sequences of trigonal prismatic single layers can give rise to different symmetries: hexagonal symmetry (2H) and rhombohedral symmetry (3R) [18]

图 1. TMDC 结构单元胞的金属配位和堆叠序列。金属配位可以是八面体或三角棱柱体。八面体配位允许堆叠序列产生四方对称性(1T)。三角棱柱体单层的不同叠加序列可以产生不同的对称性：六角形对称(2H)和菱形对称(3R) [18]

单层过渡金属硫族化合物(TMDs)是一类电子运动被限制在纳米尺度(1~100 nm)二维平面内的体系, 其厚度通常小于 1 nm [14]。原子级厚度引发显著量子限制效应, 使其呈现出区别于体相材料的独特物理

性质。一方面,载流子在二维平面内传输时有效减少了杂质与晶界散射,使其输运行为更接近理想二维电子气模型,从而获得较高的载流子迁移率[15]。另一方面,TMDs对局域化学环境及外部电场、光场高度敏感[16],同时其大比表面积与无悬挂键表面使层间可通过范德华力实现高质量堆叠[17],如图1所示。基于上述特性,TMDs在电子、光电子及传感领域展现出重要应用潜力。

2.2. 钙钛矿的光电性质

金属卤化物钙钛矿是一类通式为 ABX_3 的半导体材料,具有典型钙钛矿晶体结构。如图2,其中A位为一价阳离子(如 MA^+ 、 FA^+ 或 Cs^+),B位为二价金属阳离子(如 Pb^{2+} 、 Sn^{2+}),X位为卤素阴离子(Cl^- 、 Br^- 、 I^-) [19]。该类材料具有强光吸收、成分可调、载流子寿命长及扩散长度大等优势[9]。其有机配体能够有效钝化表面与界面缺陷,抑制非辐射复合过程[20]。此外,钙钛矿的激子结合能约为30 meV,显著低于一般有机半导体(>250 meV) [10],有利于光生载流子的高效解离与传输,使其成为新一代高性能光电子器件的重要候选材料。

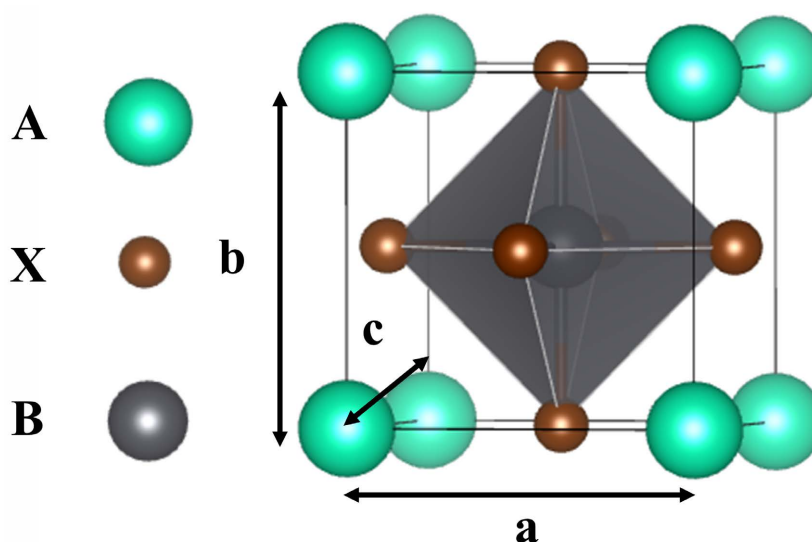


Figure 2. Schematic diagram of the unit cell structure of cubic phase ABX_3
图2. 立方相 ABX_3 的晶胞结构示意图

3. 钙钛矿/TMDs 光电探测器研究进展

3.1. 钙钛矿/TMD 异质结的类型

近年来,研究者利用化学气相沉积(CVD)生长的TMDs与不同形貌的钙钛矿(纳米片、纳米线、量子点等)构建范德华异质结。如图3,构成的异质结根据能带排列不同主要分为三种类型: type-I (跨立型)、type-II (交错型)和 type-III (破隙型) [21]。

Type-I 型异质结中,一种材料的带隙完全包含在另一种材料的带隙之内,使得电子和空穴同时被限制在窄带隙材料层中,从而提高了荧光量子效率并延长了材料的荧光寿命[22]。Type-II 型异质结的导带和价带呈阶梯状交错排列,这种结构能驱动电子和空穴分别向不同的材料层转移,从而实现光生载流子的高效空间分离[23]。Type-III 型异质结中,一种材料的导带底甚至低于另一种材料的价带顶,电子容易发生带间隧穿效应[24]。在光电器件设计中,研究者通常最倾向于构建 type-II 型异质结,以有效抑制暗电流并提升电荷的提取效率。

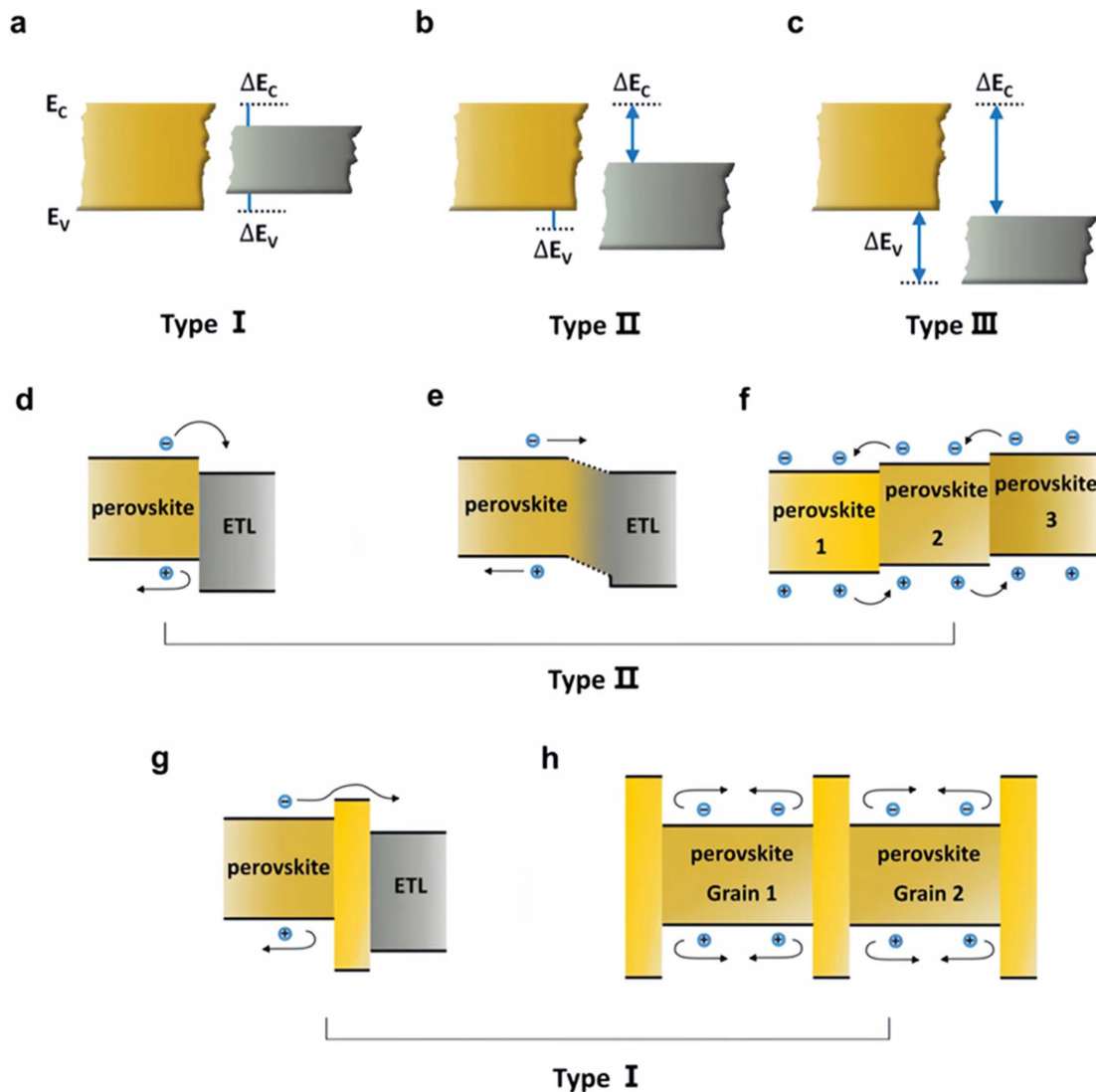


Figure 3. Three types of heterojunction band alignment: (a) type I: straddling gap, (b) type II: staggered gap, and (c) type III: broken gap. Various cases of type II heterojunctions in PSCs: (d) perovskite-ETL planar heterojunction, (e) perovskite-ETL gradient heterojunction, and (f) perovskite-perovskite multi-graded heterojunction. Various cases of type I heterojunctions in PSCs: (g) tunnel junction at the perovskite-ETL interface and (h) perovskite-wide bandgap material heterojunction within the active layer [21]

图 3. 异质结的三种能带排列类型：(a) type-I 型：跨越式(b) type-II 型：交错式(c) type-III 型：断开式。PSC 中 II 型异质结的不同情况：(d) 钙钛矿-ETL 平面异质结, (e) 钙钛矿-ETL 梯度异质结, 和(f) 钙钛矿 - 钙钛矿多梯度异质结。PSC 中 I 型异质结的各种情况：(g) 钙钛矿-ETL 界面的隧道结和(h) 活性层内的钙钛矿宽带隙材料异质结[21]

3.2. 钙钛矿/TMDs 范德华异质结光电探测器的研究进展

明确了异质结的能带对齐与载流子分离机制后, 研究者们开始探索 type-II 异质结的能带排列特点在光电器件中的独特优势。近年来, 研究者们系统性地将高迁移率的 TMDs 与一维(纳米线)、二维(纳米片)乃至零维(量子点)钙钛矿材料相结合构建复合光电器件, 在界面物理机制解析与光电探测器综合性能提升方面取得了显著进展:

(1) 二维钙钛矿(纳米片等)/TMDs 范德华异质结光电探测器

基于二维钙钛矿与 TMDs 构建的二维异质结, 兼具界面极其平整的双重优势, 是目前的重要研究方

向。例如, Lu [25]等人通过干法转移, 在少层 MoS_2 与二维钙钛矿 $(\text{BA})_2(\text{MA})_3\text{Pb}_4\text{I}_{13}$ 之间嵌入石墨烯层, 构建了高质量的范德华异质结。二维钙钛矿在形成异质结后, 界面处优化的能带对齐有效抑制了载流子的非辐射复合。与此同时, 中间引入的石墨烯层则通过填充界面缺陷, 加速了电子向 MoS_2 的转移过程, 实现了载流子的高效提取。该异质结的构建有效克服了钙钛矿材料难以吸收近红外光的限制: 在近红外 (1550 nm) 波段下, 器件的光响应度激增至 $>3000 \text{ A/W}$, 同时开关响应时间缩短至 $< 1 \text{ ms}$, 实现了高灵敏度与快响应速度的完美平衡。

然而, 对于 2D 钙钛矿纳米片/TMDs 体系, 单纯依靠能带对齐(type-II)并不总能保证高效的室温电荷分离, 界面耦合极易受到材料本征结构与温度的制约。Chen [26]等人在探究二维钙钛矿 $(\text{iso-BA})_2\text{PbI}_4/\text{WSe}_2$ 范德华异质结时发现, 该体系在低温下具有强烈的层间激子发射。然而, 当温度升高至 220 K 以上时, 单层 WSe_2 的 X^0 和 X^- 激子发射因热展宽逐渐合并为单一宽峰(见图 4(a)), 导致无法分辨, 这可以归因于温度升高引起的层间耦合减弱。

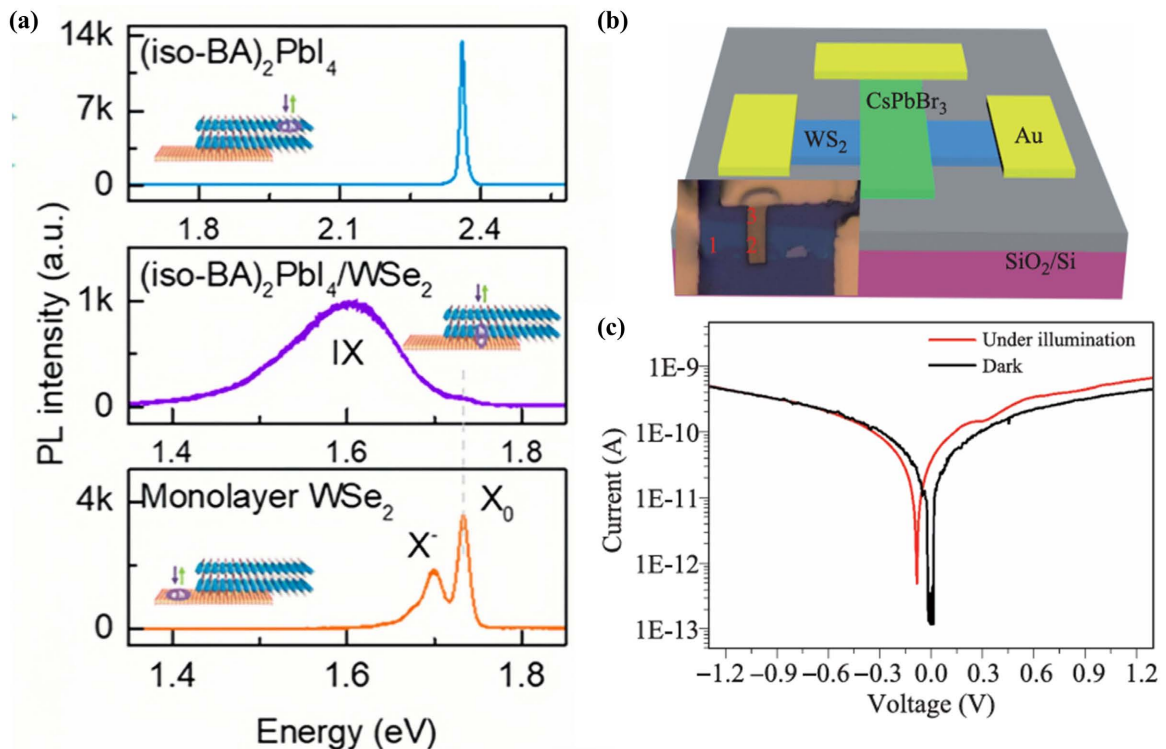


Figure 4. (a) PL spectra of the $(\text{iso-BA})_2\text{PbI}_4$ microplate (top panel) under a 473 nm laser excitation with the power of 0.02 μW . The heterostructure (middle panel), and the monolayer WSe_2 (bottom panel) under a 633 nm laser excitation with a power of 377 μW [26]; (b) Schematic illustration of the $\text{WS}_2/\text{CsPbBr}_3$ photodetector. Inset shows the optical image of the device; (c) I-V characteristics of the output in dark and illumination conditions [27]

图 4. (a) 在 473 nm 激光激发下, 功率为 0.02 μW 时, $(\text{iso-BA})_2\text{PbI}_4$ 纳米片(顶部的) PL 光谱。异质结(中间)和单层 WSe_2 (底部)在 633 nm 激光激发下, 功率为 377 μW 时的 PL 光谱[26]; (b) $\text{WS}_2/\text{CsPbBr}_3$ 光电探测器示意图。插图显示设备的光学图像; (c) 在黑暗和照明条件下输出的 I-V 特性[27]

相比于受温度影响显著的二维钙钛矿体系, 全无机钙钛矿纳米片因其连续的无机晶格结构和较低的激子结合能, 在室温下展现出了更为稳定且高效的界面电荷转移特性。如图 4(b), Yan [27]等人构建了 $\text{WS}_2/\text{CsPbBr}_3$ 纳米片异质结, 为室温下的高效载流子分离提供了直接证据。为了严格区分电荷转移与能量转移, 他们采用 532 nm 波长仅选择性激发 WS_2 层, 结果发现异质结中 WS_2 的激子与双激子发光均发生

显著淬灭, 且 CsPbBr_3 也未出现荧光增强。这一现象直接排除了能量转移的可能, 证明了异质结高效的界面电荷分离。此外, 异质结器件在光照下 I-V 曲线出现明显光伏偏移(见图 4(c)), 证明内建电场驱动载流子分离。器件输出最大光电流, 异质结光电流($\sim 10^{-9}$ A 量级)相比单层 WSe_2 ($\sim 10^{-10}$ A 量级)提升约一个数量级, 体现出明显的增益效应。

(2) 一维钙钛矿(纳米棒、纳米线等)/TMDs 范德华异质结光电探测器

相比于 2D 钙钛矿纳米片, 1D 钙钛矿纳米线具有各向异性的一维纳米结构, 不仅能展现独特光学性质, 还能提升载流子传输效率[28]。近年来, 范德华外延已成为构建钙钛矿纳米线与 TMDs 高质量异质结的常用策略。范德华外延是一种依赖层间微弱范德华力进行结合的生长机制, 打破了传统外延对晶格常数严格匹配的限制。该机制能有效规避晶格失配诱导的缺陷并使外延层沿着特定方向规则生长, 从而构建出高质量的异质界面[29]。

在 1D 钙钛矿纳米线/TMDs 体系中, Chen 等人[30]通过外延生长构建 type-II 型 CsPbBr_3 纳米线/ WSe_2 异质结, 发现形成异质结后 CsPbBr_3 与 WSe_2 的 PL 强度均大幅降低(见图 5(a))。 CsPbBr_3 在异质结中的平均荧光寿命显著缩短, 并出现约 58 ps 的快速衰减分量, 这意味着光生载流子在复合前已被有效分离, 是提升光电探测性能的核心前提。

Lu [31]等人通过范德华外延法在单层 WSe_2 上直接生长了 CsPbI_3 纳米线, 构建了高质量的 type-II 型异质结光电探测器。 CsPbI_3 在形成异质结后, PL 强度下降超过一个数量级, 荧光寿命由 7.90 ns 缩短至 4.24 ns, 电荷转移效率达 46%; 与此同时, WSe_2 一侧的荧光寿命也由 284 ps 大幅降至 94 ps, 电荷转移效率高达 67%。如图 5(b), 该异质结的构建使器件性能获得全面跃升: 在 -1 V 偏压下, 光电流从 2.38 nA 激增至 38.59 nA, 提升约 16 倍; 开关比由 3.14 提升至 16.37, 增幅超过 5 倍。与传统方法构建的异质结相比, 这种原位范德华外延策略在不破坏底层脆弱单层 WSe_2 的前提下, 有效克服了传统晶格失配的限制。

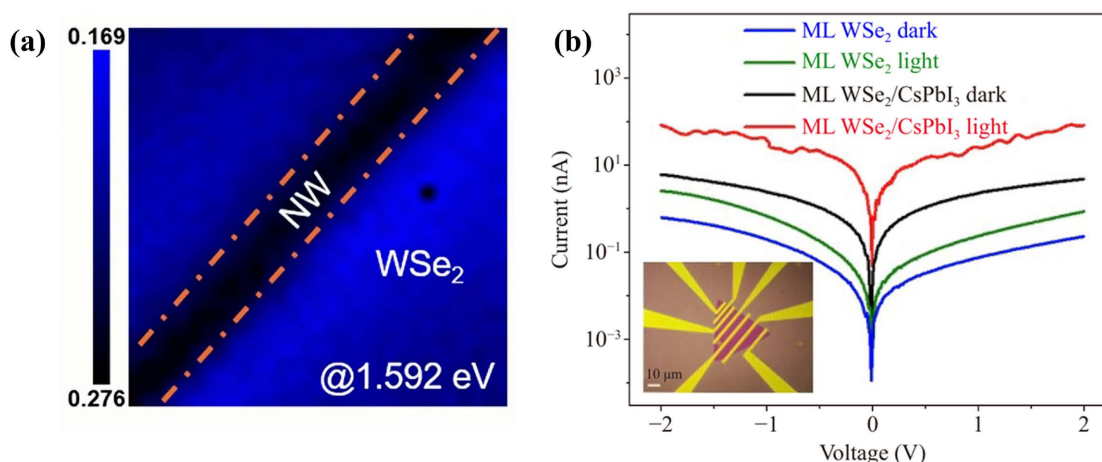


Figure 5. (a) PL emission intensity mapping of CsPbBr_3 NW/ML WSe_2 at 1.592 eV [30]; (b) Dark and photocurrent comparison of the WSe_2 based photodetector before and after CsPbI_3 growth. The inset is optical image of the as-fabricated $\text{CsPbI}_3/\text{WSe}_2$ device [31]

图 5. (a) CsPbBr_3 NW/ML WSe_2 在 1.592 eV 时的 PL 发射强度图[30]; (b) CsPbI_3 生长前后 WSe_2 基光电探测器暗电流和光电流的比较。插图是 $\text{CsPbI}_3/\text{WSe}_2$ 器件的光学图像[31]

(3) 零维钙钛矿(量子点)/TMDs 范德华异质结光电探测器

与纳米片、纳米线等其它低维材料相比, 钙钛矿量子点存在明显的量子限制效应, 电子和空穴被限制在小空间内, 两者库仑作用增强致激子结合能增大, 激子更稳定不易解离[32], 故往往表现出较高的量

子效率[33]。此外，零维钙钛矿量子点高比表面积与溶液法可加工性[34]，可通过表面修饰与 TMDs 形成原子级接触的范德华界面，快速实现光生载流子转移，是低成本、宽光谱探测器的优选体系。将其作为光敏层与二维 TMDs 结合，核心思路在于利用量子点的高效吸光产生激子，随后通过 type-II 型能带排列将载流子快速注入 TMDs。

部分研究者聚焦于零维 CsPbBr₃ 量子点与 TMDs 的界面结合行为。如 Song [35] 等人发现，宽带隙的钙钛矿量子点在吸收光子后，受界面处 type-II 能带偏移的驱动，光生电子能够越过范德华界面快速注入至具有极高载流子迁移率的二维材料，而空穴则留在量子点内部，实现了空间上的有效电子-空穴分离，具体表现为 PL 的明显猝灭和荧光寿命的显著缩短。CsPbBr₃ 自身的量子点的平均荧光寿命为 32.9 ns，而在与 MoS₂ 复合后寿命显著缩短至 18.9 ns。这种跨界面的高效注入机制为器件带来了极高的光增益，具体而言，经 CsPbBr₃ 量子点修饰后，基于单一 MoS₂ 的器件光响应度从 78 A/W 大幅跃升至 858 A/W。

为了避免铅元素带来的环境污染，Mu [36] 等人利用构建了具有(200)择优取向的无铅 CsSnBr₃/WS₂ 平面范德华异质结。该异质结形成了典型的 type-II 型能带排列，其价带最大值(VBM)存在约 1 eV 的显著能带偏移，这为光生载流子的分离提供了强劲驱动力。WS₂ 荧光寿命由 1.92 ns 延长至 >3 ns，而 CsSnBr₃ 的寿命由 4.16 ns 降至 3.28 ns，表明界面空穴快速转移。当厚度优化为 50 nm 时实现了最佳光吸收与内建电场平衡，使空穴迁移率由 101.29 cm²/(V·s) 提升至 1675.08 cm²/(V·s)。器件性能显著提升，光响应度达 1.6 A/W (为单一 WS₂ 的 20 倍以上)，比探测率 2.11 × 10¹¹ Jones，NEP 低至 1.50 × 10⁻⁷ W，响应时间 0.15 s，表明无铅体系通过能带工程可实现高效弱光探测。

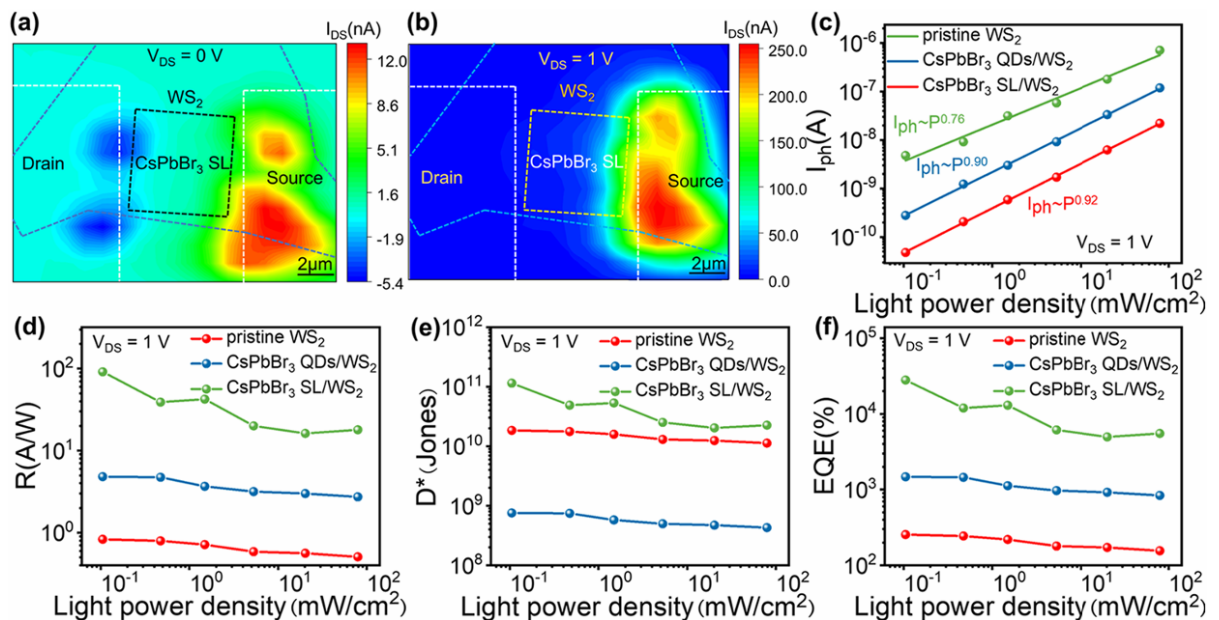


Figure 6. Performance and photoresponse mechanism of pristine WS₂, CsPbBr₃ QDs/WS₂, and quasi-2D CsPbBr₃ SL/WS₂ photodetectors. SPCM measurement of quasi-2D CsPbBr₃ SL/WS₂ photodetector under the illumination of 520 nm at (a) V_{DS} = 0 V and (b) V_{DS} = 1 V. Comparison of (c) I_{ph}, (d) R, (e) D*, and (f) EQE between the three devices as a function of the 405 nm at various incident light power intensity with V_{DS} = 1 V [37]

图 6. 原始 WS₂、CsPbBr₃ 量子点/WS₂ 和 CsPbBr₃ 超晶格/WS₂ 光电探测器的性能和光响应机制。在(a) V_{DS} = 0 V 和(b) V_{DS} = 1 V 的 520 nm 照射下，对准 2D CsPbBr₃ SL/WS₂ 光电探测器进行了 SPCM 测量，比较了 405 nm 激发光下，(c) I_{PH}，(d) R，(e) D*和(f) EQE 在 V_{DS} = 1 V 的不同入射光强下，三种器件的参数[37]

物理混合或简单旋涂量子点往往会在界面引入长链配体或表面缺陷，阻碍载流子的超快注入。为了

进一步突破该局限, Wu [37]等人引入了反溶剂乙腈去除了过量长链配体钝化了钙钛矿量子点的表面缺陷,并促进了量子点紧密自组装成高度有序的超晶格,缩减了量子点之间以及与 WS₂ 之间的间距。如图 6, 优化后的 CsPbBr₃ 超晶格/WS₂ 异质结光电探测器展现出了卓越的性能提升: 在 405 nm 光照下, 其光响应度提升至 91.24 A/W, 比未经配体处理的普通旋涂器件高出 19 倍; 比探测率达到 1.15×10^{11} Jones, 大幅提升了 150 倍。同时, 由于界面陷阱处载流子散射的减少, 器件的光开关响应速度显著加快, 上升和衰减时间分别达到了极快的 160 μ s 和 380 μ s。这种配体工程方法可以形成有序的超晶格结构, 有效减少了层间载流子传输的阻碍, 从而提高了界面电荷转移速度和器件响应速度。这为制备高性能的混合维度光电器件提供了一种可行的工艺方案。

Table 1. Comparison of structures and performance of perovskite/TMDs van der Waals heterostructure photodetectors with different dimensionalities

表 1. 不同维度钙钛矿/TMDs 范德华异质结光电探测器结构与性能对比

器件结构	维度类型	工作波段 (nm)	响应度 (A/W)	比探测率 (Jones)	响应时间	
石墨烯/MoS ₂ /(BA) ₂ (MA) ₃ Pb ₄ I ₁₃	2D/2D	1550	>3000	—	<1ms	Lu [25]
WS ₂ /CsPbBr ₃ 纳米片	2D/2D	532	—	—	—	Yan [27]
WSe ₂ /CsPbI ₃ 纳米线	2D/1D	532	—	—	—	Chen [30]
CsPbBr ₃ 量子点/MoS ₂	0D/2D	350~550	4.4	2.5×10^{10}	0.72 ms	Song [35]
CsSnBr ₃ 量子点/WS ₂	0D/2D	680	1.6	2.11×10^{11}	0.15 s	Mu [36]
CsPbBr ₃ 超晶格/WS ₂	0D/2D	405	91.24	1.15×10^{11}	160 μ s/380 μ s	Wu [37]

表 1 为上文提到的不同维度钙钛矿/TMDs 光电探测器的总结性表格, 可以看出, 不同维度钙钛矿/TMDs 异质结光电探测器在器件性能上表现出明显差异。其中, 2D/2D 结构由于具有大面积界面接触, 在响应速度方面表现突出, 如石墨烯/MoS₂/(BA)₂(MA)₃Pb₄I₁₃ 器件的响应时间低于 1 ms。而 0D/2D 结构则更容易获得较高的响应度与比探测率, 例如 CsPbBr₃ 超晶格/WS₂ 器件的响应度达到 91.24 A/W, 比探测率达到 1.15×10^{11} Jones。这表明钙钛矿维度调控能够显著影响界面电荷分离效率与载流子传输行为。此外, 目前关于 1D 钙钛矿/TMDs 异质结光电探测器的研究仍相对较少, 但其各向异性结构有望进一步提升定向载流子输运能力, 在高性能光电探测领域具有潜在优势。

4. 总结与展望

4.1. 总结

综上所述, 钙钛矿与过渡金属硫族化合物(TMDs)构建的范德华异质结通过协同整合两类材料的优势, 有效弥补了单一材料体系的性能短板。TMDs 提供高迁移率传输通道与优异电学调控能力, 而钙钛矿则贡献强光吸收与高效光生载流子产生能力。在此基础上, type-II 型能带排列在界面处建立内建电场, 显著促进光生电子-空穴对的分离并抑制复合过程, 从而在不同维度体系中普遍实现了光响应度、比探测率及开关比的数量级提升, 同时兼顾较快响应速度与低暗电流。这表明, 范德华异质结构筑已成为提升光电探测器综合性能的核心策略之一。

4.2. 挑战与展望

尽管钙钛矿/TMDs 范德华异质结光电探测器在界面物理机制解析与器件性能提升方面取得了显著进

展, 但稳定性与规模化制备是钙钛矿/TMDs 范德华异质结光电探测器走向实用化的核心瓶颈。

1. 稳定性问题与实用化挑战

钙钛矿易受水、氧、光照与热应力诱导发生晶格降解, 异质结界面缺陷会加速载流子非辐射复合, 导致器件性能快速衰减。常用提升策略包括界面钝化(有机配体修饰、无机氧化物薄层)与封装技术, 可抑制离子迁移与环境侵蚀。TMDs 无悬挂键、化学稳定性优异, 可作为钝化层阻隔水氧, 延缓钙钛矿老化。

实用化仍面临两大瓶颈: 一是大面积均匀性差, 范德华界面耦合与质量难以在大尺寸上保持一致; 二是工艺可重复性低, 溶液法与 CVD 兼容性不足, 器件性能离散度大、良率低。未来需推进大面积范德华外延、配体工程, 提升性能、稳定性与集成度, 支撑光电探测等领域应用。

2. 未来研究方向

(1) 新型无铅钙钛矿体系

当前高性能体系多依赖含 Pb 材料, 环境与稳定性问题仍是制约因素。发展如 Sn 基等无铅钙钛矿, 并通过组分调控与缺陷工程提升其稳定性与载流子输运性能, 将是未来重要方向。

(2) 精准界面调控与原位表征

界面缺陷、能带对齐及耦合强度直接决定器件性能。未来需发展原子级界面构建方法(如范德华外延、配体工程), 并结合超快光谱、电镜等原位表征手段, 深入揭示电荷转移动力学机制。同时, 界面钝化策略也可兼顾稳定性提升, 如利用 TMDs 作为保护层或引入中间层(如石墨烯)来抑制缺陷辅助的降解过程。

(3) 柔性/可穿戴器件

依靠钙钛矿溶液加工与二维材料柔性的优势, 发展可弯曲、可拉伸光电探测器, 将推动其在柔性电子与可穿戴系统中的应用。然而, 柔性器件对界面机械稳定性与大面积均匀性提出了更高要求。未来的研究需在柔性衬底上开发低温、无损的异质集成工艺, 并结合封装技术解决弯折条件下的性能衰减问题。

参考文献

- [1] Chen, W., Zhang, S., Wang, C., Wu, Y., Shi, X., Shen, J., *et al.* (2025) Enabling Highly Efficient Infrared Silicon Photodetectors via Disordered Metasurfaces with Upconversion Nanoparticles. *Science Advances*, **11**, eadx7783. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adx7783>
- [2] Nishimura, N., Allardice, J.R., Xiao, J., Gu, Q., Gray, V. and Rao, A. (2019) Photon Upconversion Utilizing Energy beyond the Band Gap of Crystalline Silicon with a Hybrid TES-ADT/PbS Quantum Dots System. *Chemical Science*, **10**, 4750-4760. <https://doi.org/10.1039/c9sc00821g>
- [3] Liu, Z., Li, X., Cheng, S., Li, Y., Jin, W., Zhang, Y., *et al.* (2023) All-Optical Nonvolatile Optical Modulator for In-Fiber Operation. *Nanophotonics*, **12**, 3179-3187. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2023-0212>
- [4] Liu, X., Xing, K., Sin Tang, C., Sun, S., Chen, P., Qi, D., *et al.* (2025) Contact Resistance and Interfacial Engineering: Advances in High-Performance 2D-TMD Based Devices. *Progress in Materials Science*, **148**, Article ID: 101390. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101390>
- [5] Zhang, H., Xu, C., Nan, H., Xiao, S. and Gu, X. (2020) Research Progress of Two-Dimensional Transition Metal Dichalcogenide Phase Transition Methods. *Acta Physica Sinica*, **69**, Article ID: 246101. <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200965>
- [6] Zeng, Z., Wang, X. and Pan, A. (2020) Second Harmonic Generation of Two-Dimensional Layered Materials: Characterization, Signal Modulation and Enhancement. *Acta Physica Sinica*, **69**, Article ID: 184210. <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200452>
- [7] Pei, J., Yang, J., Yildirim, T., Zhang, H. and Lu, Y. (2019) Many-Body Complexes in 2D Semiconductors. *Advanced Materials*, **31**, Article ID: 1706945. <https://doi.org/10.1002/adma.201706945>
- [8] Wu, H., Si, H., Zhang, Z., Kang, Z., Wu, P., Zhou, L., *et al.* (2018) All-Inorganic Perovskite Quantum Dot-Monolayer MoS₂ Mixed-Dimensional Van Der Waals Heterostructure for Ultrasensitive Photodetector. *Advanced Science*, **5**, Article ID: 1801219. <https://doi.org/10.1002/advs.201801219>
- [9] Wang, H. and Kim, D.H. (2017) Perovskite-Based Photodetectors: Materials and Devices. *Chemical Society Reviews*, **46**, 5204-5236. <https://doi.org/10.1039/c6cs00896h>

- [10] Jiang, Y., Wang, X. and Pan, A. (2019) Properties of Excitons and Photogenerated Charge Carriers in Metal Halide Perovskites. *Advanced Materials*, **31**, Article ID: 1806671. <https://doi.org/10.1002/adma.201806671>
- [11] Kiani, M.S., Sadirkhanov, Z.T., Kakimov, A.G., Parkhomenko, H.P., Ng, A. and Jumabekov, A.N. (2022) Solution-Processed SnO(2) Quantum Dots for the Electron Transport Layer of Flexible and Printed Perovskite Solar Cells. *Nanomaterials (Basel)*, **12**, Article No. 2615. <https://doi.org/10.3390/nano12152615>
- [12] Zhao, W., Zhang, J., Kong, F. and Ye, T. (2023) Application of Perovskite Nanocrystals as Fluorescent Probes in the Detection of Agriculture- And Food-Related Hazardous Substances. *Polymers*, **15**, Article No. 2873. <https://doi.org/10.3390/polym15132873>
- [13] Wang, Y., Xie, W., Peng, W., Li, F. and He, Y. (2022) Fundamentals and Applications of ZnO-Nanowire-Based Piezotronics and Piezo-Phototronics. *Micromachines*, **14**, Article No. 47. <https://doi.org/10.3390/mi14010047>
- [14] Wang, R., Li, M., Zhou, J., Zhang, L., Gu, J., Wang, M., *et al.* (2021) Self-Assembled Black Phosphorus-Based Composite Langmuir-Blodgett Films with an Enhanced Photocurrent Generation Capability and Surface-Enhanced Raman Scattering Properties. *ACS Omega*, **6**, 4430-4439. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05832>
- [15] Zhang, Z., Zhang, L., Huang, Y., Wang, Z. and Ren, Z. (2025) A Planar-Gate Graphene Field-Effect Transistor Integrated Portable Platform for Rapid Detection of Colon Cancer-Derived Exosomes. *Biosensors*, **15**, Article No. 207. <https://doi.org/10.3390/bios15040207>
- [16] Cao, L., Lu, S., Guo, C., Chen, W., Gao, Y., Ye, D., *et al.* (2022) A Novel Electrochemical Immunosensor Based on PdAgPt/MoS₂ for the Ultrasensitive Detection of CA 242. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **10**, Article ID: 986355. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.986355>
- [17] El-Sayed, M.A., Tselin, A.P., Ermolaev, G.A., Tatmyshevskiy, M.K., Slavich, A.S., Yakubovsky, D.I., *et al.* (2022) Non-Additive Optical Response in Transition Metal Dichalcogenides Heterostructures. *Nanomaterials*, **12**, Article No. 4436. <https://doi.org/10.3390/nano12244436>
- [18] Freedy, K.M. and McDonnell, S.J. (2020) Contacts for Molybdenum Disulfide: Interface Chemistry and Thermal Stability. *Materials*, **13**, Article No. 693. <https://doi.org/10.3390/ma13030693>
- [19] Dhankhar, M., Pal Singh, O. and Singh, V.N. (2014) Physical Principles of Losses in Thin Film Solar Cells and Efficiency Enhancement Methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **40**, 214-223. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.163>
- [20] Chen, K., Zhang, D., Du, Q., Hong, W., Liang, Y., Duan, X., *et al.* (2023) Synergistic Halide- and Ligand-Exchanges of All-Inorganic Perovskite Nanocrystals for Near-Unity and Spectrally Stable Red Emission. *Nanomaterials*, **13**, Article No. 2337. <https://doi.org/10.3390/nano13162337>
- [21] Wang, T., Deng, W., Cao, J. and Yan, F. (2022) Recent Progress on Heterojunction Engineering in Perovskite Solar Cells. *Advanced Energy Materials*, **13**, Article ID: 2201436. <https://doi.org/10.1002/aenm.202201436>
- [22] Wang, Y., Zhong, Y., Zi, J. and Lian, Z. (2023) Type-I CdSe@CdS@ZnS Heterostructured Nanocrystals with Long Fluorescence Lifetime. *Materials*, **16**, Article No. 7007. <https://doi.org/10.3390/ma16217007>
- [23] Zhang, Y., Yu, K., Zhao, J., Xu, S., Lv, M., Zhao, Q., *et al.* (2025) Enhanced Optoelectronic Response of TiO₂ Photodetector Sensitized via CuInSe₂ Quantum Dots. *Nanomaterials*, **15**, Article No. 522. <https://doi.org/10.3390/nano15070522>
- [24] Zhong, H., Xu, Z., Feng, C., Wan, X., Li, J., Wang, H., *et al.* (2023) Broken-Gap Type-III Band Alignment in Monolayer Halide Perovskite/Antiperovskite Oxide van der Waals Heterojunctions. *Nanoscale*, **15**, 11560-11568. <https://doi.org/10.1039/d3nr00676j>
- [25] Lu, Y., Sun, X., Zhou, H., Lai, H., Liu, R., Liu, P., *et al.* (2022) A High-Performance and Broadband Two-Dimensional Perovskite-Based Photodetector via Van Der Waals Integration. *Applied Physics Letters*, **121**, Article ID: 161104. <https://doi.org/10.1063/5.0116505>
- [26] Chen, Y., Liu, Z., Li, J., Cheng, X., Ma, J., Wang, H., *et al.* (2020) Robust Interlayer Coupling in Two-Dimensional Perovskite/Monolayer Transition Metal Dichalcogenide Heterostructures. *ACS Nano*, **14**, 10258-10264. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c03624>
- [27] Yan, Z., Jiang, Z., Lu, J. and Ni, Z. (2018) Interfacial Charge Transfer in WS₂ Monolayer/CsPbBr₃ Microplate Heterostructure. *Frontiers of Physics*, **13**, Article ID: 138115. <https://doi.org/10.1007/s11467-018-0785-z>
- [28] Xie, J., Feng, K., Yin, C., Zhang, J., Mourdikoudis, S., Du, Y., *et al.* (2026) Primitive Ligands Drive 1D CsPbI₃ Nanostructures with Strongly Polarized Photoluminescence. *Angewandte Chemie International Edition*, **65**, e25782. <https://doi.org/10.1002/anie.202525782>
- [29] Wang, F.K., Yang, S.J. and Zhai, T.Y. (2021) 2D Bi₂Se₃ Materials for Optoelectronics. *iScience*, **24**, Article ID: 103291. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103291>
- [30] Chen, M., Chang, R., Yang, X., Lu, C., Zhang, S., Zhang, Z., *et al.* (2024) Van Der Waals Epitaxy of CsPbBr₃/WSe₂

- Heterostructure and Dynamics Study of Exciton Recombination. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **57**, Article ID: 235103. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad30ae>
- [31] Lu, C., Zhang, S., Chen, M., Chen, H., Zhu, M., Zhang, Z., *et al.* (2024) Van Der Waals Epitaxy of Type-II Band Alignment CsPbI₃/TMDC Heterostructure for Optoelectronic Applications. *Frontiers of Physics*, **19**, Article No. 53206. <https://doi.org/10.1007/s11467-024-1404-9>
- [32] Zhou, H., Feng, Q., Sun, C., Li, Y., Tao, W., Tang, W., *et al.* (2024) Robust Excitonic Light Emission in 2D Tin Halide Perovskites by Weak Excited State Polaronic Effect. *Nature Communications*, **15**, Article No. 8541. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52952-9>
- [33] Erkiñç, U., Solís-Fernández, P., Ji, H.G., Shinokita, K., Lin, Y., Maruyama, M., *et al.* (2019) Vapor Phase Selective Growth of Two-Dimensional Perovskite/WS₂ Heterostructures for Optoelectronic Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **11**, 40503-40511. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b13904>
- [34] Zou, J., Zhang, S. and Tang, X. (2024) Recent Advances in Organic Photodetectors. *Photonics*, **11**, Article No. 1014. <https://doi.org/10.3390/photonics11111014>
- [35] Song, X., Liu, X., Yu, D., Huo, C., Ji, J., Li, X., *et al.* (2018) Boosting Two-Dimensional MoS₂/CsPbB₃ Photodetectors via Enhanced Light Absorbance and Interfacial Carrier Separation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **10**, 2801-2809. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b14745>
- [36] Mu, H., Tang, J., Wang, R., Qian, M. and Guo, Q. (2023) Exciton Dynamics and Photoresponse of a CVD-Grown WS₂/Thermally Evaporated CsSnBr₃ Heterostructure. *Journal of Materials Chemistry C*, **11**, 10310-10323. <https://doi.org/10.1039/d3tc01340e>
- [37] Wu, H., Kang, Z., Zhang, Z., Si, H., Zhang, S., Zhang, Z., *et al.* (2019) Ligand Engineering for Improved All-Inorganic Perovskite Quantum Dot-MoS₂ Monolayer Mixed Dimensional Van Der Waals Phototransistor. *Small Methods*, **3**, Article 1900117. <https://doi.org/10.1002/smt.201900117>