

基于稳定二维 BA_2PbBr_4 的X射线探测研究

孟宏宇

哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 光电带隙材料教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2026年1月28日; 录用日期: 2026年2月23日; 发布日期: 2026年3月3日

摘要

卤化物钙钛矿因其优异的光电性能和可调谐的能带结构而备受关注, 然而其环境稳定性仍是实际应用的瓶颈。具有长链有机配体的二维卤化物钙钛矿, 兼具强量子限域效应、高集成性和优异的环境稳定性等优势。本研究通过降温结晶法成功制备高质量 BA_2PbBr_4 单晶, 并构建二维 BA_2PbBr_4 光电探测器。在紫外探测方面, 器件表现出 $0.035 A \cdot W^{-1}$ 的响应度与极低的暗电流($2.11 \times 10^{-12} A$)。更重要的是, 该探测器也展现出优异的X射线探测能力, 其灵敏度高达 $39,514 \mu C \cdot Gy_{air}^{-1} cm^{-2}$, 最低可探测剂量率为 $19.78 nGy_{air} \cdot s^{-1}$ 。得益于有机配体对无机层间的有效隔离, 该器件展现出卓越的环境稳定性, 在空气中暴露一周后, 其紫外探测性能仍能保持初始值的86.74%。本研究为开发高效稳定的钙钛矿光电子器件提供了可行的材料选择与结构设计思路。

关键词

光电探测器, 二维钙钛矿单晶, X射线探测

Research on X-Ray Detection Based on Stable Two-Dimensional BA_2PbBr_4

Hongyu Meng

Key Laboratory of Photonic Band Gap Materials of Ministry of Education, School of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: January 28, 2026; accepted: February 23, 2026; published: March 3, 2026

Abstract

Halide perovskites have attracted much attention due to their excellent photoelectric properties and tunable band structure. However, their environmental stability remains a bottleneck for practical applications. Two-dimensional halide perovskites with long-chain organic ligands possess advantages such as strong quantum confinement effect, high integration, and excellent environmental stability. In this study, high-quality BA_2PbBr_4 single crystals were successfully prepared by cooling

crystallization method, and a two-dimensional BA_2PbBr_4 photodetector was constructed. In the UV detection aspect, the device exhibited a response rate of $0.035 \text{ A}\cdot\text{W}^{-1}$ and extremely low dark current ($2.11 \times 10^{-12} \text{ A}$). More importantly, this detector also demonstrated excellent X-ray detection capability, with a sensitivity of up to $39,514 \mu\text{C}\cdot\text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ and a minimum detectable dose rate of $19.78 \text{ nGy}_{\text{air}}\cdot\text{s}^{-1}$. Thanks to the effective isolation of the inorganic layers by the organic ligands, this device exhibits outstanding environmental stability. After being exposed to air for one week, its UV detection performance still maintained 86.74% of the initial value. This study provides feasible material selection and structural design ideas for the development of efficient and stable perovskite photonic devices.

Keywords

Photodetector, Two-Dimensional Perovskite Single Crystal, X-Ray Detection

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

光电探测技术是现代电子通信领域的核心技术，是推动现代电子产业高质量发展的重要支撑，在通信、成像、传感等领域发挥着不可或缺的作用[1]-[4]。在光电探测领域，随着可见及红外波段探测等经典技术的日益成熟[5]，科研界对短波波段(如紫外和 X 射线)的高效探测需求日益迫切，相关性能的优化已成为该领域的核心研究方向[6] [7]。截至目前，以日盲紫外探测和 X 射线为代表的短波探测技术已取得阶段性研究进展。其中，紫外探测技术已在导弹预警、高能物理等军事领域，以及生物医药、火灾预警、电晕检测等民用领域获得了广泛的实际应用[8]-[10]。而 X 射线探测技术已在医疗诊断、工业探伤、安检防控等诸多领域得到广泛应用，与工业发展进程及国计民生息息相关[11] [12]。

随着材料科学的快速发展，低维宽禁带半导体凭借高导热性、高化学稳定性、高载流子迁移率、高击穿电场及优异的环境耐受性等优异特性，已成为研究热点，并被视作制备下一代高性能功能光电子器件的潜力候选材料[13]-[15]。例如，氮化硼等二维范德华层状材料，以及氮化镓(GaN)、碳化硅(SiC)等传统宽禁带半导体，已在紫外探测、功率器件等民用与工业领域实现商业化应用[16]-[18]。但这些材料的制备(如 GaN、SiC)及相关器件的开发，通常依赖金属有机化学气相沉积、分子束外延等大型高端材料生长设备，高昂的成本极大地限制了其规模化发展和产业化应用[19]。

与传统的宽禁带半导体材料相比，有机-无机杂化钙钛矿材料因其卓越的光电特性(如高吸收系数、长载流子扩散长度及可调谐的带隙)而在太阳能电池、发光二极管、光电探测器等领域展现出巨大的应用潜力[20]-[22]。典型的三维钙钛矿为 ABX_3 晶体结构，其具备优异的光电转换能力和载流子输运性能[23]。但三维钙钛矿晶格中存在卤素离子的高迁移率，使其在高温、高湿、持续光照等严苛条件下易发生晶相降解并导致性能衰减，严重制约了其实际应用。为解决三维钙钛矿的稳定性难题，研究人员开发了一系列新型低维钙钛矿材料。其中，二维钙钛矿材料不仅展现出显著增强的环境稳定性，基于该类材料制备的光电探测器件的综合性能也已可与传统三维钙钛矿基光电探测器相媲美。同时，二维杂化钙钛矿突破了容差因子对阳离子的限制，表现出优异的结构可调性和相容性[24] [25]。二维钙钛矿中无机层和有机层的交替排列，自然形成量子阱结构，可调的直接带隙能与紫外光谱有效匹配，实现强紫外吸收。并且含铅(Pb)、溴(Br)等重元素，对高能射线的高衰减系数赋予其强 X 射线吸收性能，为开发高效的短波探测器奠定了材料基础。因

此, 通过降低钙钛矿的晶体维度来提升其稳定性, 是开发高性能钙钛矿光电器件的有效策略之一。

鉴于此, 本研究通过溶液降温法制备了英寸尺寸的二维有机无机杂化钙钛矿 BA_2PbBr_4 ($\text{BA} = \text{C}_4\text{H}_9\text{NH}_3^+$) 单晶。基于该高质量单晶的紫外光电探测器表现出 $2.11 \times 10^{-12} \text{ A}$ 的极低暗电流和 $0.035 \text{ A}\cdot\text{W}^{-1}$ 的响应度。更重要的是, 该探测器在 X 射线探测领域展现出非凡的性能, 其 X 射线探测灵敏度高达 $39,514 \mu\text{C}\cdot\text{Gy}_{\text{air}}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, 最低可探测剂量率为 $19.78 \text{ nGy}_{\text{air}}\cdot\text{s}^{-1}$, 并且在大气中保持一个星期后仍保持 86.74% 初始响应度, 显示出稳定的多波长探测应用潜力。

2. 实验过程

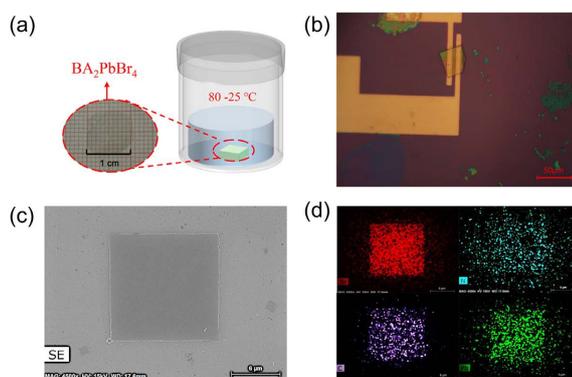
2.1. 器件制备

采用降温结晶法合成二维有机-无机杂化钙钛矿 BA_2PbBr_4 ($\text{BA} = \text{C}_4\text{H}_9\text{NH}_3^+$) 单晶。具体步骤如下: 将溴化铅(PbBr_2)和丁胺溴(BABr)按照摩尔比 1:2 的比例溶解至 N,N-二甲基甲酰胺(DMF)中配置 0.6 mol/L 的前驱体溶液, 将前驱体溶液转移并置于热台上并加热至 80°C 。随后将溶液从 80°C 缓慢冷却到 25°C , 在此过程中可观察到片状白色晶体析出。采用机械剥离法(Scotch tape)对所得 BA_2PbBr_4 块体单晶进行薄层处理, 直至在聚二甲基硅氧烷(PDMS)上观察到光学对比度适中的 BA_2PbBr_4 薄单晶。随后采用光刻和热蒸发工艺在 SiO_2/Si 衬底上沉积金电极。最后, 借助精密转移平台, 将剥离得到的 BA_2PbBr_4 薄单晶以干转移的方式精确转移至有氧化层的硅基底的金电极上。

2.2. 材料表征及性能测试

采用扫描电子显微镜(SEM, Hitachi SU70)对 BA_2PbBr_4 薄单晶的表面形貌进行表征。 BA_2PbBr_4 薄单晶的结晶性采用 D/max-2600/pc 型 X 射线衍射仪(XRD)进行表征分析。 BA_2PbBr_4 薄单晶的光吸收特性通过 Perkin Lambda 850 型紫外-可见分光光度计测试表征。器件的电学性能通过半导体参数分析仪(Agilent B1500A)进行测试。其中, 电流-电压(I - V)特性曲线及瞬态光电流(I - t)曲线均使用紫外 LED (325 nm) 作为激发光源。器件的光谱响应度测试则采用 150 W 氙灯光源(OSRAM 150 W/CROFR)结合单色仪(Omni- λ 300)来完成。X 射线探测通过 X 射线探测测试系统(QUADRA 3 Pro)来完成。

3. 结果与讨论



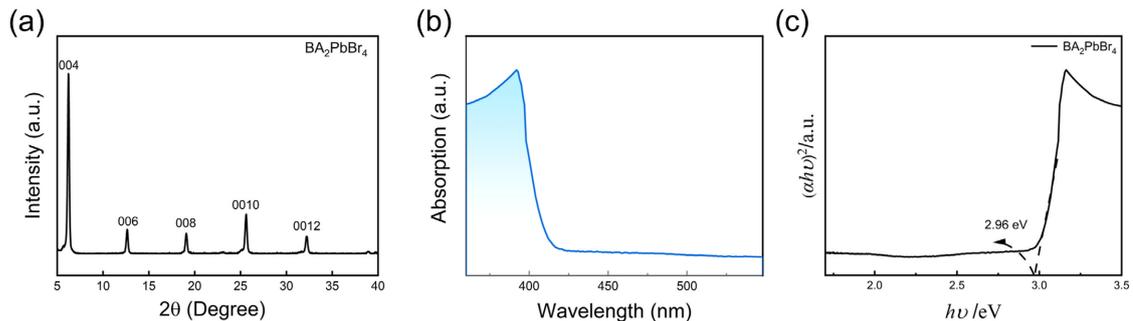
(a) 材料制备过程示意图; (b) BA_2PbBr_4 器件光学图像; (c) BA_2PbBr_4 单晶 SEM 图像; (d) BA_2PbBr_4 单晶元素分布图。

Figure 1. Preparation and characterization of BA_2PbBr_4 single crystals

图 1. BA_2PbBr_4 材料制备以及表征图

本研究采用降温结晶法成功制备了高质量的二维 BA_2PbBr_4 单晶。图 1(a)为 BA_2PbBr_4 薄单晶的制备

过程示意图,该方法操作简便、重复性好。通过机械剥离法获得薄层单晶后,采用干转移技术将其精准转移到预制备的具有金电极的 SiO_2/Si 衬底上,得到如图 1(b)所示的二维钙钛矿光电探测器。图像显示晶体表面平整、边界清晰,无明显裂纹或污染。为进一步观察晶体微观形貌,对其进行了 SEM 测试,图 1(c)的 SEM 图像表明 BA_2PbBr_4 薄单晶表面均匀致密,未观察到明显晶界或二次相。元素分布分析(图 1(d))进一步证实了 BA、Pb、Br 元素在晶体中均匀分布,反映出材料具有良好的化学均匀性。



(a) BA_2PbBr_4 单晶的 XRD 图谱; (b) BA_2PbBr_4 单晶的吸收光谱; (c) BA_2PbBr_4 单晶的光学带隙图谱。

Figure 2. Optical characterization of BA_2PbBr_4 single crystals

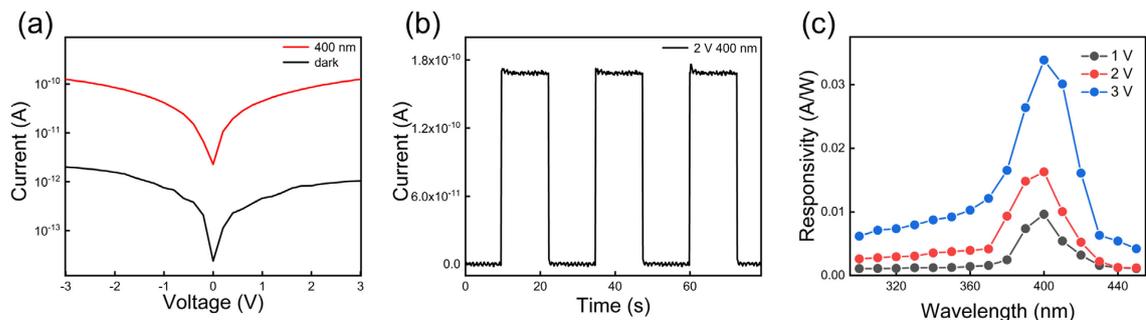
图 2. BA_2PbBr_4 材料的光学表征图

为表征 BA_2PbBr_4 钙钛矿的结晶特性,对其进行了 XRD 测试。

图 2(a)的 XRD 图谱显示,所有衍射峰均可对应于 BA_2PbBr_4 的(00l)晶面系列,与已有文献报道的数据相吻合[26]。表明所制备的单晶具有纯相、高结晶质量,且沿 c 轴方向具有明显的取向性。图 2(b)展示了其紫外-可见吸收光谱曲线。可以观察到, BA_2PbBr_4 钙钛矿薄单晶的光吸收截止边位于 420 nm 处,说明其具有较强的短波长光吸收能力。另外,为了确定 BA_2PbBr_4 钙钛矿薄单晶的带隙,以入射光子能量为横坐标对吸收曲线作图,如图 2(c)所示。 BA_2PbBr_4 为直接带隙半导体,因此所得到的吸收曲线 (αhv) 函数与入射光子能量的关系满足:

$$(\alpha hv)^2 \propto (hv - E_g) \quad (1)$$

其中, α 为吸光系数, h 为普朗克常数, hv 为入射光子能量, E_g 为光学带隙。经计算可得 BA_2PbBr_4 钙钛矿的带隙为 2.96 eV。该结果进一步证明了 BA_2PbBr_4 的宽带隙特征,也进一步表明其满足作为紫外光电探测器的基本需求。



(a) BA_2PbBr_4 光电探测器的 I - V 特性曲线; (b) BA_2PbBr_4 光电探测器的 I - t 特性曲线; (c) BA_2PbBr_4 光电探测器的响应曲线。

Figure 3. Optoelectronic properties of BA_2PbBr_4 single crystals

图 3. BA_2PbBr_4 材料的光电性能图

为了评估其作为紫光光电探测器的光电性能，同时为了更好的证明 BA_2PbBr_4 探测器在光电探测领域良好的性能，测试了其在暗态和光照下(400 nm)的 I - V 曲线。如图 3(a)所示，其光暗电流比达 60，证明了其良好的光电性能。器件的工作稳定性对其实际应用至关重要。图 3(b)为器件在 2 V 偏压、400 nm 单色光周期性开关条件下的光电流 - 时间(I - t)曲线。当施加和移除 400 nm 单色光时，器件光电流随光照开关快速变化并且经过多个循环后未出现衰减，表明 BA_2PbBr_4 光电探测器件具备优异的光响应稳定性。同时对 BA_2PbBr_4 钙钛矿薄单晶进行了响应度测试，响应度是衡量探测器灵敏度的重要参数，计算公式如下：

$$R = \frac{I_{\text{Light}} - I_{\text{Dark}}}{P} \quad (2)$$

其中 R 为响应度， I_{Light} 代表光电流， I_{Dark} 代表器件暗电流， P 代表入射光功率。图 3(c)的光谱响应曲线显示， BA_2PbBr_4 探测器在紫外波段具有显著响应，证明了其在紫外波段的探测潜力。

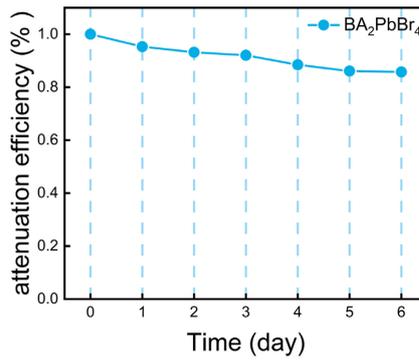
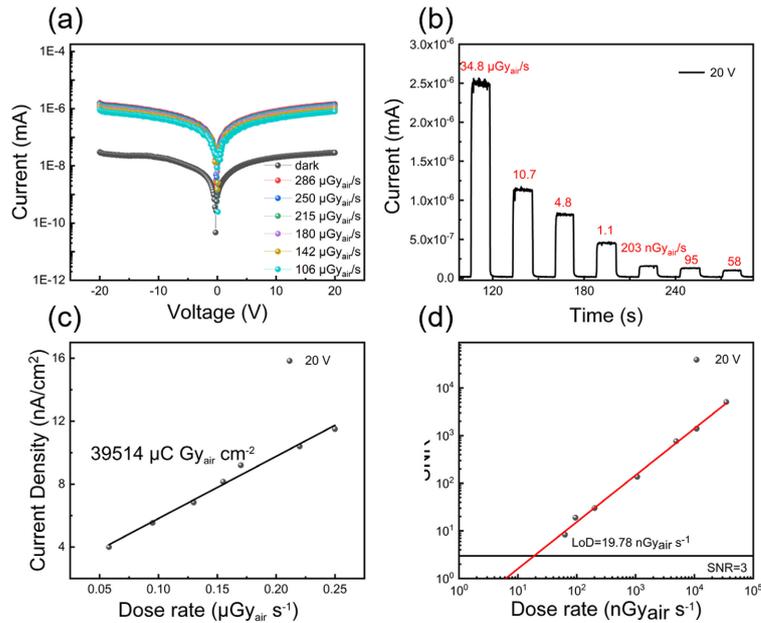


Figure 4. Stability test of BA_2PbBr_4 photodetector over one week
图 4. BA_2PbBr_4 材料的一星期稳定性测试图



(a) BA_2PbBr_4 光电探测器不同剂量下的 I - V 特性曲线；(b) BA_2PbBr_4 光电探测器在 20 V 偏压下不同剂量的 I - t 特性曲线；(c) 20 V 偏压时 BA_2PbBr_4 光电探测器的灵敏度；(d) BA_2PbBr_4 光电探测器的 SNR 曲线。

Figure 5. X-ray detection performance of BA_2PbBr_4 single crystals
图 5. BA_2PbBr_4 材料的 X 射线性能图

BA₂PbBr₄ 探测器通常需要在特殊条件下进行长时间工作，因此器件的稳定性是评价光电探测器性能的重要参数。为进一步考察其环境稳定性，我们将器件置于大气环境中持续监测其性能变化。如图 4 所示，器件在空气中暴露 6 天后，其峰值响应度保持在初始响应度的 86.74%，优于多数报道的同类钙钛矿器件[27]。这一优异的稳定性主要归因于二维 BA₂PbBr₄ 中有机配体 BA⁺对无机[PbBr₄]²⁻层的有效包覆，显著抑制了环境中水氧分子的渗透与侵蚀。说明 BA₂PbBr₄ 光电探测器具有较高的可靠性和稳定性。

鉴于 BA₂PbBr₄ 材料具有高原子序数元素(Pb、Br)和强 X 射线吸收能力，我们进一步评估了其在 X 射线探测方面的性能。图 5(a)显示了 BA₂PbBr₄ 探测器在不同 X 射线剂量率下的 *I-V* 特性曲线，可以看出光电流随剂量率的增加而显著增大，表明 BA₂PbBr₄ 探测器对于 X 射线具有明确的剂量率依赖响应。图 5(b)为该 BA₂PbBr₄ 探测器在 20 V 电压下不同 X 射线剂量率下的光电流 - 时间(*I-t*)曲线，结果显示，即使在测试设备可输出的最低 X 射线剂量率(0.050 μGy_{air}·s⁻¹)下，该探测器仍能产生稳定持续、可重复的光电流信号，证明其具备探测极弱 X 射线辐射的能力。灵敏度是 X 射线探测的关键参数，用于描述探测器对特定 X 射线辐照剂量的响应能力。X 射线灵敏度的定义为单位面积辐射产生的电荷数与辐射剂量的比值，其计算公式如下[20]：

$$S = \frac{I_{\text{Light}} - I_{\text{Dark}}}{D \times A} \quad (3)$$

其中 I_{Light} 为光电流， I_{Dark} 为暗电流， D 为辐照剂量率， A 为 X 射线探测器的有效面积。图 5(c)描绘了 20 V 偏压下 BA₂PbBr₄ 探测器的光电流密度随 X 射线剂量率的变化关系曲线。通过对光电流密度 - 剂量率曲线进行线性拟合，由拟合斜率可求得 BA₂PbBr₄ 探测器的 X 射线灵敏度，其在 20 V 偏压下的 X 射线灵敏度为 39,514 μC·Gy_{air}⁻¹ cm⁻²。其灵敏度优于商业化 α-硒探测器(20000 nC·Gy_{air}⁻¹ cm⁻²)。最低可探测剂量率(LoD)是评估 BA₂PbBr₄ 探测器的 X 射线探测性能的另一个重要参数，指的是产生最小有效分辨信号对应的辐照剂量，根据国际纯粹与应用化学联合会的定义，最低可探测剂量率取信噪比(SNR)为 3 时对应的辐照剂量率[28]。SNR 可以通过以下公式计算：

$$\text{SNR} = \frac{I_s}{I_n} \quad (4)$$

$$I_s = I_p - I_d \quad (5)$$

$$I_n = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (I_i - I_p)^2} \quad (6)$$

其中 I_s 为信号电流， I_n 为噪声电流， I_p 为平均光电流， I_d 为平均暗电流。信号电流为平均光电流与平均暗电流的差值，噪声电流取光电流的标准偏差。图 5(d)为该探测器的 SNR 随 X 射线剂量率的变化曲线，对曲线进行拟合后，拟合线与 SNR 交点的剂量率可认为是最低可探测剂量率，为 19.78 nGy_{air}·s⁻¹，表明该 BA₂PbBr₄ 探测器具备较低的 X 射线 LoD。这些优异的性能指标表明，基于二维 BA₂PbBr₄ 单晶的光电探测器在低成本、高性能 X 射线探测领域具有重要的应用潜力。

4. 结论

综上所述，本研究采用降温结晶与机械剥离法，成功制备了高质量、界面清晰的二维 BA₂PbBr₄ 单晶，并基于此构建了高性能光电探测器。该探测器在紫外波段表现出优异的光响应性能，光响应度达 0.035 A·W⁻¹。同时，探测器也展示出优异的 X 射线探测能力，具有高达 39,514 μC·Gy_{air}⁻¹ cm⁻² 灵敏度和 19.78

$\text{nGy}_{\text{air}}\cdot\text{s}^{-1}$ 最低可探测剂量率。得益于有机配体对无机层间的有效隔离, 有效阻断了水氧分子向钙钛矿体内的扩散与渗透, 探测器在无封装条件下暴露于大气环境一星期后, 仍保持 86.74% 初始响应度, 显示出出色的环境稳定性。本工作为开发二维层状钙钛矿单晶的制备与应用开辟了新路径, 为其在紫外与 X 射线探测领域的实际应用奠定了基础。

参考文献

- [1] Yan, Z., Yang, H., Yang, Z., Ji, C., Zhang, G., Tu, Y., *et al.* (2022) Emerging Two-Dimensional Tellurene and Tellurides for Broadband Photodetectors. *Small*, **18**, Article ID: 2200016. <https://doi.org/10.1002/sml.202200016>
- [2] Li, L., Xu, H., Li, Z., Liu, L., Lou, Z. and Wang, L. (2023) CMOS-Compatible Tellurium/Silicon Ultra-Fast Near-Infrared Photodetector. *Small*, **19**, Article ID: 2303114. <https://doi.org/10.1002/sml.202303114>
- [3] Fu, W., Chen, H. and Jen, A.K.Y. (2021) Two-Dimensional Perovskites for Photovoltaics. *Materials Today Nano*, **14**, Article ID: 100117. <https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2021.100117>
- [4] Park, B., Beak, S., Yang, J., Hwang, S., Kwon, J., Yoon, J., *et al.* (2025) Tellurium/Silicon Based P-N Photodiode for near Infrared Heterostructure Photodetector Applications. *Applied Surface Science*, **687**, Article ID: 162242. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.162242>
- [5] Cao, F., Liu, L. and Li, L. (2023) Short-Wave Infrared Photodetector. *Materials Today*, **62**, 327-349. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2022.11.003>
- [6] Zhu, X., Cai, Z., Wu, Q., Wu, J., Liu, S., Chen, X., *et al.* (2024) 2D Black Phosphorus Infrared Photodetectors. *Laser & Photonics Reviews*, **19**, Article ID: 2400703. <https://doi.org/10.1002/lpor.202400703>
- [7] Pei, H., Wu, X.L., Wu, X., *et al.* (2025) Challenges in the Controllable Synthesis of 2D Materials. *Nano Research*, **19**, Article ID: 94908092.
- [8] Zhang, X., Zhao, S., Zhang, J. and Wang, L. (2024) Materials Design and Preparation of Ultrathin Two-Dimensional Metal Halide Perovskites. *Nano Research*, **17**, 6231-6246. <https://doi.org/10.1007/s12274-024-6648-8>
- [9] Leung, T.L., Ahmad, I., Syed, A.A., Ng, A.M.C., Popović, J. and Djurišić, A.B. (2022) Stability of 2D and Quasi-2d Perovskite Materials and Devices. *Communications Materials*, **3**, Article No. 63. <https://doi.org/10.1038/s43246-022-00285-9>
- [10] Wang, B., Iocozzia, J., Zhang, M., Ye, M., Yan, S., Jin, H., *et al.* (2019) The Charge Carrier Dynamics, Efficiency and Stability of Two-Dimensional Material-Based Perovskite Solar Cells. *Chemical Society Reviews*, **48**, 4854-4891. <https://doi.org/10.1039/c9cs00254e>
- [11] Amani, M., Tan, C., Zhang, G., Zhao, C., Bullock, J., Song, X., *et al.* (2018) Solution-Synthesized High-Mobility Tellurium Nanoflakes for Short-Wave Infrared Photodetectors. *ACS Nano*, **12**, 7253-7263. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b03424>
- [12] Zhou, Q., Duan, J., Duan, Y. and Tang, Q. (2022) Review on Engineering Two-Dimensional Nanomaterials for Promoting Efficiency and Stability of Perovskite Solar Cells. *Journal of Energy Chemistry*, **68**, 154-175. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2021.09.017>
- [13] Guo, S., Liu, B., Peng, S., Li, T., Wang, Y. and Deng, X. (2026) Planting 2D Perovskite Seeds to Prepare Mixed-Dimensional Perovskite Solar Cells with High Stability. *Chemical Engineering Journal*, **527**, Article ID: 171498. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.171498>
- [14] Baskoro, F., Chiang, P., Tran, T.T.B., Wong, H.Q., Sumboja, A., Nie, W., *et al.* (2026) 2D and 3D Organic/Inorganic Hybrid Perovskites for Electrochemical Energy Storage Applications. *Journal of Materials Chemistry A*. <https://doi.org/10.1039/d5ta06470h>
- [15] Ou, X. and Gao, F. (2024) Blossoms in Perovskite Planar X-Ray Detectors. *Nature Communications*, **15**, Article No. 5754. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50179-2>
- [16] Zha, J., Luo, M., Ye, M., Ahmed, T., Yu, X., Lien, D., *et al.* (2021) Infrared Photodetectors Based on 2D Materials and Nanophotonics. *Advanced Functional Materials*, **32**, Article ID: 2111970. <https://doi.org/10.1002/adfm.202111970>
- [17] Wang, Y., Li, M., Chai, Z., Wang, Y. and Wang, S. (2023) Perovskite Scintillators for Improved X-ray Detection and Imaging. *Angewandte Chemie International Edition*, **62**, e202304638. <https://doi.org/10.1002/anie.202304638>
- [18] Snow, J., Olson, C., Torres, E., Shirley, K. and Cazalas, E. (2024) A Perovskite-Graphene Device for X-Ray Detection. *Carbon*, **216**, Article ID: 118586. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118586>
- [19] Xing, Y., He, H., Cui, Z., Fu, Z., Qin, S., Zhang, W., *et al.* (2024) Recent Advances in Optical Properties and Light-emitting Diode Applications for 2D Tin Halide Perovskites. *Advanced Optical Materials*, **12**, Article ID: 2302679. <https://doi.org/10.1002/adom.202302679>

-
- [20] Di Carlo, A., Agresti, A., Brunetti, F. and Pescetelli, S. (2020) Two-Dimensional Materials in Perovskite Solar Cells. *Journal of Physics: Energy*, **2**, Article ID: 031003. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/ab9eab>
- [21] Shi, E., Yuan, B., Shiring, S.B., Gao, Y., Akriti, Guo, Y., *et al.* (2020) Two-Dimensional Halide Perovskite Lateral Epitaxial Heterostructures. *Nature*, **580**, 614-620. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2219-7>
- [22] Wang, K., Wu, C., Yang, D., Jiang, Y. and Priya, S. (2018) Quasi-Two-Dimensional Halide Perovskite Single Crystal Photodetector. *ACS Nano*, **12**, 4919-4929. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b01999>
- [23] Zhang, Y., Li, S., Li, Z., Liu, H., Liu, X., Chen, J., *et al.* (2020) High-Performance Two-Dimensional Perovskite $\text{Ca}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$ UV Photodetectors. *Nano Letters*, **21**, 382-388. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c03759>
- [24] Zhou, H., Lai, H., Sun, X., Zhang, N., Wang, Y., Liu, P., *et al.* (2022) Van Der Waals MoS_2 /Two-Dimensional Perovskite Heterostructure for Sensitive and Ultrafast Sub-Band-Gap Photodetection. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **14**, 3356-3362. <https://doi.org/10.1021/acsmi.1c15861>
- [25] Gao, W., Niu, K., Tao, Q., Ding, S., Zhang, J., Yu, L., *et al.* (2025) Patterning Halide Perovskite Monocrystalline Arrays via Dry Imprinting Transfer. *ACS Nano*, **19**, 34273-34282. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5c11433>
- [26] Li, Y., Chen, L., Liu, B., Jin, P., Gao, R., Zhou, L., *et al.* (2021) Scintillation Performance of Two-Dimensional Perovskite $(\text{Ba})_2\text{PbBr}_4$ Microcrystals. *Journal of Materials Chemistry C*, **9**, 17124-17128. <https://doi.org/10.1039/d1tc04072c>
- [27] Seitz, M., Gant, P., Castellanos-Gomez, A. and Prins, F. (2019) Long-Term Stabilization of Two-Dimensional Perovskites by Encapsulation with Hexagonal Boron Nitride. *Nanomaterials*, **9**, Article 1120. <https://doi.org/10.3390/nano9081120>
- [28] Thompson, M., Ellison, S.L.R. and Wood, R. (2002) Harmonized Guidelines for Single-Laboratory Validation of Methods of Analysis (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, **74**, 835-855. <https://doi.org/10.1351/pac200274050835>