科学通报 2026 年 第 71 卷 第 9 期: 1838 ~ 1851
光电探测材料与器件专题 进 展
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

二维钙钛矿型铌酸盐多功能光电探测器

张勇[1*], 王琳[2*]

1. 苏州工学院电子信息工程学院, 常熟 215500
2. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所先进材料部, 苏州 215123
* 联系人, E-mail: 202000045@szut.edu.cn; linwang2022@sinano.ac.cn

2025-06-26 收稿, 2025-08-18 修回, 2025-08-21 接受, 2025-08-22 网络版发表
国家自然科学基金(52272136)资助

摘要 近年来, 二维钙钛矿型铌酸盐材料体系正在快速拓展与革新, 在材料合成、结构调控及性能探索等方面取得长足进步. 二维铌酸盐的环境稳定性、宽带隙以及紫外光敏等特性使得二维铌酸盐成为构筑高性能、多功能光电探测器件的理想候选材料, 在该领域迅速积累了丰富且具有突破性的研究成果. 然而, 尽管基础实验研究不断深入, 柔性器件、异质结器件、人工突触等新颖的器件设计理念层出不穷, 但大量研究成果相对分散, 缺乏从材料基础到器件应用、从物理机制到未来挑战的系统性梳理与发展方向凝练. 鉴于此, 本文旨在全面梳理二维铌酸盐在光电探测领域的最新研究进展, 重点评述其在各类光电器件架构中的多功能应用, 涵盖基于单一材料的原型器件、旨在性能优化的复合材料体系、模拟神经形态的光电-突触器件以及兼具光电与介电调控能力的集成器件等, 深入剖析二维铌酸盐光电探测物理机制以及展望该领域未来发展方向, 旨在为高性能二维铌酸盐光电器件的设计与开发提供参考.

关键词 光电探测器, 钙钛矿型铌酸盐, 二维纳米片, 多功能光电器件

在现代信息社会中, 光电探测技术作为实现光信号与电信号高效转换的关键技术, 是信息感知、传输与处理的核心基础[1]. 传统光电探测器受限于材料体系与器件架构, 在响应带宽、环境稳定性及多功能集成度方面面临瓶颈. 面对从紫外到红外的宽谱域探测需求、复杂环境下的稳定工作要求, 以及多参数协同感知的功能拓展诉求, 多功能光电探测的兴起为该领域带来新的发展契机[2~4]. 因此, 开发具有多性质耦合的新型半导体材料对于拓展光电探测器的多功能应用至关重要.

近年来, 二维材料因其原子级厚度、能带结构可调及层间耦合特性, 为构建多功能光电探测器件提供全新范式[5~7], 其中二维钙钛矿型铌酸盐以其独特的层状结构、宽禁带特性及优异的环境稳定性, 被广泛应用于催化、非线性光学、压电及铁电领域[8~12]. 值得注意的是, 这些本征特性恰恰为解决传统光电探测器的关键瓶颈提供了极具潜力的方案. 二维铌酸盐材料因其本征宽带隙特性[13~17], 能够有效吸收紫外-可见光, 同时避免了传统宽禁带材料复杂的生长工艺和成本问题. 此外, 传统探测器在低偏压下常受显著暗电流噪声困扰, 限制其探测灵敏度. 二维铌酸盐材料普遍具有较高的介电常数[13,15], 这有助于在器件结构中形成更强的内建电场或更有效的载流子调控, 从而显著抑制暗电流的产生. 二维铌酸盐层状结构通过“无机钙钛矿层-间隔离子层”的有序堆叠赋予其独特的光吸收和载流子传输特性, 能够高效地将光信号转换为电信号[18,19], 使其在光电探测领域的应用价值逐渐凸显, 为系统性地解决传统探测器的核心瓶颈(光谱范围、暗

引用格式: 张勇, 王琳. 二维钙钛矿型铌酸盐多功能光电探测器. 科学通报, 2026, 71: 1838–1851
Zhang Y, Wang L. Two-dimensional perovskite niobate materials for multifunctional photodetectors (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 1838–1851, doi: 10.1360/CSB-2025-5153

© 2025《中国科学》杂志社

电流噪声、稳定性、响应速度)提供了极具吸引力的材料基础. 通过材料的成分设计和结构调控, 二维铌酸盐能够与有机半导体、量子点及二维异质结耦合, 进一步拓展光谱响应范围, 实现光电性能的优化与多功能集成, 使得二维铌酸盐在构建高性能、多功能光电探测器件方面具有独特的优势[20]. 尽管二维铌酸盐在稳定性、多功能性方面优势突出, 但其在光电器件中的应用研究仍处于相对早期阶段. 如何精确控制其厚度和缺陷态, 深入理解其光生载流子的产生、分离、输运和复合机制, 优化器件界面工程以提升电荷输运效率, 以及充分挖掘其突触、介电特性与光电性能的协同效应, 都是当前面临的重要挑战和研究机遇.

鉴于此, 我们对二维铌酸盐材料光电探测性能展开深入研究, 并以此为基础进行系统性综述. 本文首先概述二维铌酸盐的结构、制备及薄膜组装方法; 随后重点评述其在光电探测器中的应用, 包括单一材料、复合材料、光电-突触集成器件及光电-介电集成器件; 最后深入分析光电特性及界面调控机制, 并展望该领域的未来发展方向. 通过这篇综述, 我们希望为研究者提供二维铌酸盐材料从基础结构到器件应用的系统认知, 促进研究者对二维铌酸盐光电特性及界面调控机制的深入理解, 并激发其在下一代高稳定性、高性能、多功能光电器件中的创新应用.

1 二维铌酸盐结构、制备及组装

钙钛矿结构, 其通式一般为ABO_3, 主要有卤化物钙钛矿和氧化物钙钛矿. 氧化物钙钛矿中存在一些具有层状结构的类钙钛矿型氧化物, 最具代表性的有Dion-Jacobson (D-J)型、Ruddlesden-Popper (R-P)型和Aurivillius (AV)型类钙钛矿氧化物, 其基本通式分别为$A'[A_{n-1}B_nO_{3n+1}]$、$A'_2[A_{n-1}B_nO_{3n+1}]$和$(Bi_2O_2)[A_{n-1}B_nO_{3n+1}]$, 其中A′代表碱金属($K^+$、$Na^+$、$Rb^+$、$Cs^+$等), A为碱土金属($Mg^{2+}$、$Ba^{2+}$、$Sr^{2+}$、$Ca^{2+}$等)、铋、镧系元素, B为过渡金属离子($Nb^{5+}$、$Ta^{5+}$、$Ti^{4+}$等), n是每个钙钛矿氧化物片中BO_6八面体层的数量[21,22]. 图1(a)为D-J型(如$RbLaNb_2O_7$、$KCa_2Nb_3O_{10}$)、R-P型(如$K_2La_2Ti_3O_{10}$)和AV型(如$(Bi_2O_2)La_2Ti_3O_{10}$、$Bi_2SrTa_2O_9$)层状钙钛矿的结构示意图[23], 它们具有一些共同的特征, 即在一定厚

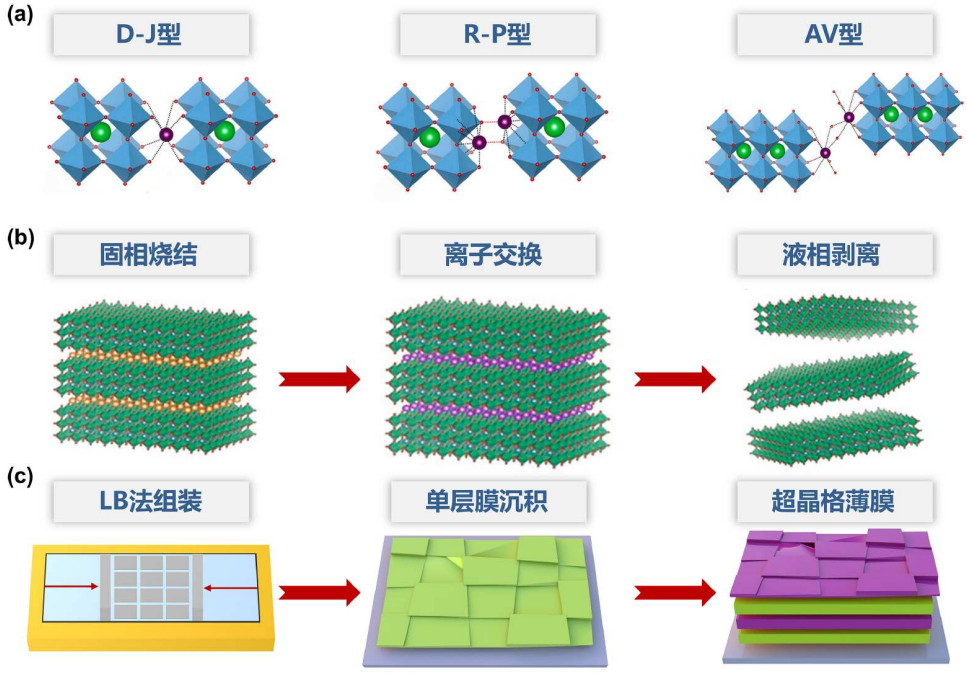


图 1 (网络版彩色)二维铌酸盐结构、制备及组装. (a) D-J型、R-P型和AV型层状钙钛矿的结构示意图[23]. (b) 通过固相烧结、离子交换和液相剥离过程制备二维铌酸盐纳米片示意图(Copyright©2021, American Chemical Society)[25]. (c) 采用LB法制备二维铌酸盐超晶格薄膜的工艺流程[27]

Figure 1 (Color online) The structure, preparation and assembly of 2D niobates. (a) The structural diagrams of layered perovskites corresponding to D-J-type, R-P-type, and AV-type phases[23]. (b) The diagrammatic sketch of the preparation of niobate nanosheets via solid-state calcination, proton-exchange, and liquid-phase exfoliation process (Copyright©2021, American Chemical Society)[25]. (c) Fabrication procedure for superlattice niobate films using the LB method[27]

度的二维平面保持钙钛矿结构，钙钛矿层之间被不同的原子序列单元分隔，区分它们的方式是构成分隔层的类型差异．这种被间隔层分离的钙钛矿结构为获得二维铌酸盐材料提供了途径．二维铌酸盐形成R-P型或AV型的报道相对较少，实验获得的二维铌酸盐剥离产物及其前驱体主体上均属于D-J型，因此本文主要聚焦于D-J型钙钛矿铌酸盐材料．

与石墨烯、二硫化钼这类层状材料不同[24]，铌酸盐材料层与层之间存在较强的离子键，这使得用传统机械剥离法直接剥离难度较大．此外，考虑到大规模工业生产的需求，离子交换辅助液相剥离法逐渐成为制备二维铌酸盐纳米片的主要策略，其中包括固相烧结-离子交换-液相插层剥离过程．图1(b)展示了二维铌酸盐纳米片制备过程示意图[25]，在离子交换辅助液相剥离过程中，通过化学剥离来削弱层状钙钛矿氧化物层间的强离子键．由于层间离子(如碱金属离子K^+、Na^+、Rb^+、Cs^+)具有化学反应活性，可参与离子交换反应，因此层状钙钛矿氧化物在与酸溶液(如盐酸)反应时会发生质子化．质子进入带正电的相邻结构单元层间，取代层间离子，使层间的库仑相互作用大幅减弱．后续的剥离主要通过在层间插入有机分子(如四丁基氢氧化铵)来实现，插入的有机分子在层间形成较大的空间位阻，进一步削弱层间作用力，最终促使层状块体材料解离成纳米片悬浮液．这种层间膨胀过程对于从层状前驱体直接剥离二维纳米片至关重要．此外，水进入层间会使层间空间进一步膨胀，层间膨胀会大幅削弱层间作用力，使相邻层片层分离，最终形成二维铌酸盐纳米片悬浮液．

通过离子交换辅助液相剥离法制备的二维铌酸盐纳米片，普遍存在尺寸较小的问题，而满足实际应用需求的晶圆级薄膜是发挥其性能优势的关键．因此，选择合适的薄膜组装方法显得尤为重要．LB (Langmuir-Blodgett)法是一种将预先排列好的单层分子膜从水与空气的界面上转移至衬底上的制膜方法，其可用于制备单层或多层的分子薄膜[26]．通过LB膜仪的滑障向溶液施加一定的表面压力，即可使两亲性分子排列成致密的薄膜．然后通过提拉或浸蘸衬底，即可将薄膜转移至衬底上．如图1(c)所示，Sasaki等人[27]在衬底上交替沉积$LaNb_2O_7$(LNO)纳米片和$Ca_2Nb_3O_{10}$(CNO)纳米片，得到有序堆叠的超晶格结构．LB法可以直接用于液相剥离的二维铌酸盐的沉积，且薄膜取向性较好，覆盖度较高．旋涂法[28]和电泳沉积法[29,30]也是制备铌酸盐薄膜材料的有效手段．这些方法各有优势，适用于不同的应用场景，为铌酸盐薄膜材料的制备提供了多样化选择．

2 二维铌酸盐光电探测器

随着科技的不断进步，光电探测领域对高性能材料的需求日益迫切．早在2005年，Saruwatari等人[31]验证了层状钙钛矿型铌酸盐在紫外光照下的光敏特性，随后Okamoto等人[32]报道了层状铌酸盐(即$(CH_3)_3$-$NHSr_2Nb_3O_{10}$)薄片中存在的持续光电流现象，然而二维铌酸盐的光电响应特性直至近年才得到系统研究．

2.1 单一二维铌酸盐光电探测器

二维铌酸盐因其宽带隙和紫外光敏性等特性，在光电探测器领域展现出巨大应用潜力[17,30]．对二维铌酸盐系列材料光电性能进行验证，并深入研究单一二维铌酸盐材料光电探测器性能，不仅能为光电探测器的理论研究提供关键数据，还能为未来高性能光电器件研发与实际应用奠定基础．我们首次通过液相剥离法制备出超薄$Sr_2Nb_3O_{10}$(SNO)纳米片(厚度低至1.8 nm)，并成功构建二维SNO光电探测器(图2(a))．如图2(b)所示，少层SNO纳米片在270 nm紫外光照射下展现出优异的光电性能，响应度高达1214 A/W，外量子效率超过5.6×10^5%以及快速光响应(0.4 ms, 40 ms) (图2(c))．如图2(d)所示，不同层厚器件的性能也呈现出显著变化[33]．这一现象充分揭示了层间耦合作用对载流子传输过程的重要影响，为深入理解和优化该类材料的光电性能提供了关键依据．我们通过固相烧结-离子交换-液相剥离工艺，制备出带隙为3.85 eV的少层CNO纳米片．在3 V电压、280 nm紫外光照射下，CNO纳米片紫外光探测器展现出高响应度(14.94 A/W)和高探测率(8.7×10^{13} Jones)．基于该探测器的紫外/可见光抑制比(R_{280}/R_{400})为8.84×10^3，表明其在日盲区具有很高的光谱选择性[25]．此外，通过B位元素取代(如用钽部分替代铌)可调节材料的带隙和陷阱态密度，从而优化器件响应速度与灵敏度．基于$Ca_2Nb_{3-x}Ta_xO_{10}$光电探测器通过引入适量钽掺杂，光电流和响应度均显著提升，这源于Ta引入的陷阱态增强了光导增益效应[34]．SNO和CNO光电探测器激发了科研工作者对基于二维铌酸盐紫外光探测器研究的兴趣．基于$Pb_2Nb_3O_{10}$、$NdNb_2O_7$-(NNO)、LNO光探测器也相继被我们报道．我们将NNO纳米片用于紫外探测，单个NNO纳米片光探测器在探测紫外光(260 nm，3 V)时表现出优异性能，包括

高响应度(62 A/W)、高光谱选择性(R_{260}/R_{400}=9000)以及快速响应时间(0.1/7.8 ms)[35]，其性能优于多数已报道的氧化物基探测器(如ZnO、Ga_2O_3). 环境稳定性是光电探测器实际应用的关键指标. 如图2(e)~(h)所示,

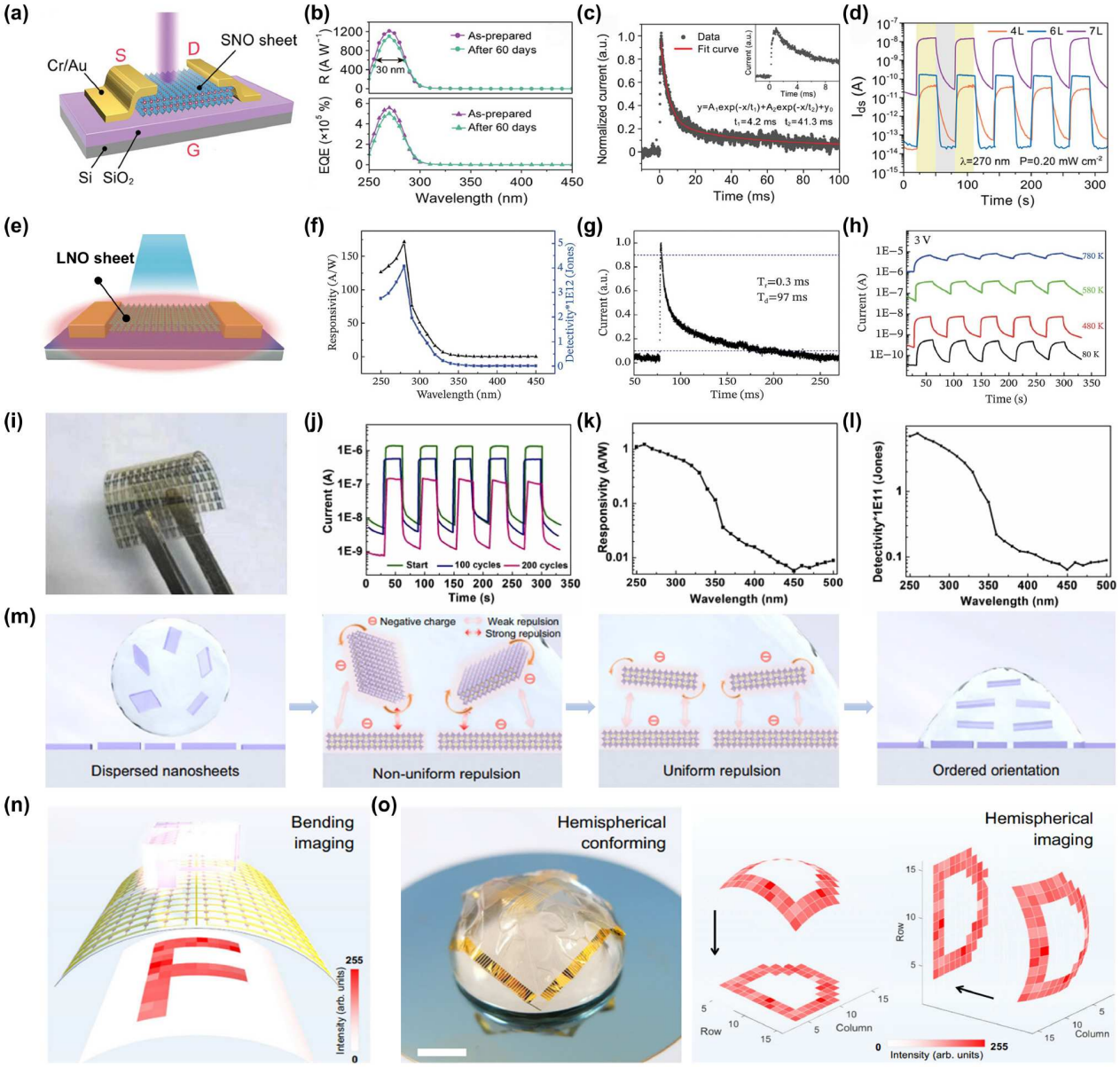


图 2 (网络版彩色)代表性的二维铌酸盐光电探测器. (a) 基于少层SNO纳米片光电晶体管示意图. (b) SNO基光电探测器的光谱响应度和外量子效率. (c) 在1 V偏置电压下SNO光电探测器的脉冲响应及提取的时间常数图. (d) 不同厚度SNO纳米片的电流-时间曲线(Copyright©2019, Wiley)[33]. (e)~(g) 单个LNO纳米片器件的结构示意图、响应度与探测率、归一化脉冲响应. (h) 单个LNO纳米片器件在80~780 K真空条件下的电流-时间曲线[36]. (i) 柔性NNO薄膜器件照片. (j) NNO薄膜器件在不同弯曲周期后的电流-时间曲线. (k, l) NNO薄膜器件的响应度和探测率(Copyright©2023, Elsevier Inc.)[35]. (m) S-CNO薄膜电荷辅助定向组装成膜过程示意图. (n), (o)基于S-CNO薄膜阵列器件的柔性与成像能力[38]

Figure 2 (Color online) The representative photodetectors based on 2D niobate nanosheets. (a) The schematic illustration of fabricated phototransistors based on few layer SNO nanosheets. (b) The spectral responsivity and EQE of the SNO-based device. (c) The pulse response of the SNO device at 1 V bias with the extracted time constants. (d) *I-t* curves of SNO nanosheets with various thicknesses (Copyright©2019, Wiley)[33]. (e)–(g) The schematic diagram, the responsivity and the detectivity, and the normalized pulse response of an individual LNO nanosheet device. (h) *I-t* curves of individual LNO nanosheet device at 80–780 K under vacuum conditions[36]. (i) The photograph of the flexible NNO film device. (j) *I-t* curves of the NNO film device after various bending cycles. (k, l) Responsivity and detectivity for the NNO film device (Copyright©2023, Elsevier Inc.)[35]. (m) Schematic of the charge-assisted oriented assembly film-formation process of S-CNO film. (n), (o) Flexibility and imaging capacity of the device based on S-CNO film array[38]

基于LNO纳米片光电器件的响应度达171 A/W、探测率为4×10^{12} Jones，具有0.3/97 ms的快速响应速度与长期环境稳定性，并且可在80~780 K的超宽温度范围内实现紫外光检测[36]. 此外，$Pb_2Nb_3O_{10}$纳米片与不对称电极(Au/Ti)构成的肖特基结器件展现出2.8 A/W的自供电响应度，为开发自驱动光电器件提供了新思路[37]. 这些研究成果不仅深入探究了单一二维铌酸盐材料光电探测器的性能优势，还为其在光电器件领域的实际应用奠定了基础，为后续开发高性能二维铌酸盐光电器件提供了理论依据和实践指导.

二维铌酸盐材料因其制备工艺简便和可扩展性强的特点, 在光电探测器领域展现出重要应用价值. 这类材料通常由铌酸盐纳米片通过溶液法组装形成连续的薄膜结构. 与单片纳米片器件相比, 薄膜结构虽然存在较多的晶界和缺陷态，但其大面积均匀性和工艺兼容性更适合工业化生产需求. 将二维铌酸盐纳米片与柔性基底(如聚对苯二甲酸乙二酯，PET)相结合，可制备出高性能柔性光电探测器. 这些柔性器件在弯曲状态下仍能保持良好的光电性能. 我们通过真空过滤等简单工艺组装的SNO薄膜在可见光区透光率超过75%, 且经反复弯曲后光电性能无明显衰减[33]. 这种兼具透明性与柔韧性的特点，使其可集成于可穿戴设备、柔性显示屏等新兴领域. 基于CNO纳米片的柔性光电探测器集成在PET基底上，经多次弯曲测试后，其线性动态范围可达96 dB, 可用于紫外成像[25]. 此外, 将CNO纳米片集成到滤膜孔隙中形成的复合结构器件，不仅保持了0.08 A/W的响应度, 还能实现紫外成像功能, 验证了其阵列化集成的可行性[39]. 如图2(i)~(l)所示, NNO纳米片通过界面自组装制备的透明薄膜, 在PET基底上经200次弯曲后性能保持率>90%，弯曲后响应度保持1.2 A/W[35]. 利用简易的滴涂技术，我们制备了晶圆级LNO薄膜, 该薄膜具备紫外光的空间分辨能力, 使其成为像素阵列探测器的理想选择，适用于紫外成像领域. LNO薄膜的光电性能在宽温区范围和弯曲状态下均表现出色. 经过100~200次的弯曲循环测试后，尽管在300 nm波长光照下的光电流从7.8 nA降低至1.5 nA, 暗电流也从28 pA减少到5 pA，但其开关比却从240增加到了300. 这一现象归因于弯曲过程中纳米片堆叠结构的滑移，导致接触电阻增加. 尽管光电流有所下降，但暗电流的减少更为显著，从而使得开关比得到提升[36]. 此外，LNO薄膜不仅能在80~780 K的宽区温范围内进行紫外探测, 还具有压电效应, 使其适用于人体运动应力传感. 复旦大学方晓生团队开发了一种“电荷辅助纳米片有序组装成膜”技术(图2(m))，利用二维铌酸盐CNO纳米片自带的负电荷排斥力，使其在喷雾液滴中均匀分散, 并在基底上定向排列, 形成大面积、高有序的薄膜[38]. 这种薄膜具有优异的光电性能, 在280 nm紫外光照射下，响应度达11.9 A/W, 探测率高达3.71×10^{12} Jones, 远超同类钙钛矿紫外探测器, 且对紫外光的选择性极高, 紫外可见抑制比达到18万倍, 非常适用于紫外通信和生物检测等特定紫外应用场景. 该团队进一步构建了基于超柔性Parylene-C基底的16×16器件阵列, 该阵列在弯曲状态下仍能保持优异的成像性能，并且可以转移到任意形状的基底上, 如玻璃半球, 实现类似视网膜的成像功能(图2(n), (o)). 此外, 结合卷积神经网络处理，器件能够利用高质量单帧成像能力实现对多方向运动轨迹的高效识别，准确率超过99.8%，展现出在运动识别和预测等高级成像应用中的巨大潜力[38]. 这些进展表明，二维铌酸盐薄膜通过结构设计与制备工艺优化，在高稳定性紫外探测、柔性光电器件及多功能集成领域具有广阔应用前景[19]. 表1综合比较了二维铌酸盐与其他二维材料在光电性能和工艺兼容性方面的差异. 从表中可清晰看出二维铌酸盐的核心优势, 其宽带隙特性使其可实现高纯度紫外探测，解决了窄带隙材料在紫外光响应中的串扰问题. 得益于高介电常数和层间内建电场，二维铌酸盐的响应度(最高达10^3 A/W)和探测率(>10^{12} Jones)在紫外探测器中处于领先水平, 响应时间可达亚毫秒级. 然而，二维铌酸盐大面积制备方面存在局限，其合成过程中不可控的煅烧与剥离过程导致纳米片横向尺寸受限，严重影响实际应用的规模化.

2.2 复合二维铌酸盐光电探测器

二维铌酸盐通过与其他功能材料复合，为高性能、多功能光电探测器的发展开辟新方向，有望满足光通信、生物成像、环境监测等领域对光电探测日益严苛的需求. 电荷调控是提升光电器件性能的有效策略. 我们提出通过器件上电荷重构来实现高性能光电探测器. 如图3(a)所示，通过在器件沟道内原位交换电荷，可将单个PNO纳米片器件转化为(Ag)PNO器件. (Ag)PNO器件在3 V电压、380 nm光照下的响应度(1141 A/W)和探测率(4.1×10^{13} Jones)及开关比显著增强(图3(b)~(d))[40]. 随后，复旦大学方晓生团队设计了一种基于二维钙钛矿SNO纳米片与氮掺杂石墨烯量子点(NGQDs)

表 1　二维铌酸盐与其他二维材料在光电性能及工艺兼容性方面的差异

Table 1　Differences in optoelectronic properties and process compatibility between 2D niobates and other 2D materials

特性	二维铌酸盐	过渡金属硫属化合物	黑磷
带隙	2.6~3.9 eV	1.1~2 eV	0.3~2 eV(厚度依赖)
光谱范围	紫外-深紫外	可见-近红外	可见-中红外
响应度	1~10^3 A/W	10^2~10^5 A/W	10^{-3}~10^2 A/W
响应时间	0.1~10^2 ms	10^2~10^4 ms	1~10^2 ms
探测率	10^{11}~10^{14} Jones	10^9~10^{12} Jones	10^{13} Jones
环境稳定性	优异	中等(需封装)	极差(需惰性气氛)
柔性集成	可实现	可实现	可实现
大面积制备	溶液组装(晶圆级)-低温	化学气相沉积(晶圆级)-高温	机械剥离(微米级)

复合的纳米级异质结结构，旨在通过调控表面/界面载流子传输提升光电探测器性能．NGQDs的引入显著提高了SNO基光电探测器的光电性能，含4% NGQDs的复合探测器(4% NGQDs-SNO光电探测器)展现出优异的光电特性(图3(e)，(f))[41]．该器件在250~320 nm紫外波段具有显著光响应，峰值响应度达10.8 A/W，对应的外量子效率和比探测率分别为4.97%和3.39×10^{11} Jones (图3(g))[41]．此外，基于4% NGQDs-SNO光电探测器构建的单像素成像验证系统，成功实现了对“SH”图案的清晰紫外光成像(图3(h))，充分证明了其在紫外成像传感器领域的应用潜力．将二维铌酸盐纳米片与MXene量子点构建异质结结构，不仅增强了材料的光吸收能力，还优化了载流子传输路径，使其在柔性基底上仍能保持稳定的光电性能．$Ti_3C_2T_x$量子点修饰的CNO纳米片光电探测器在310 nm处的最大响应度为264 A/W，比单一CNO纳米片光电探测器响应度高12倍[42]．在界面工程方面，引入有机半导体层可有效解决二维铌酸盐薄膜的孔洞缺陷问题．如图3(i)所示，以$Ca_2Nb_{2.5}Ta_{0.5}O_{10}$(CNTO)纳米片为光敏层，引入$PC_{71}BM$有机层，通过构建无机-有机异质结有效填充纳米片薄膜孔洞，器件的暗电流被抑制了5个数量级，同时响应速度提升至亚毫秒级．这种结构设计特别适合自供电型紫外通信器件，其响应度可达60 mA/W (图3(j)，(k))，为实时数据传输提供新方案．如图3(l)所示，该器件在紫外通信系统中检测角度30°，可实现1.2 m近距离通信[43]．

功函数是决定金属电极与半导体接触的核心参数，优化能带对齐对高性能光电探测器至关重要．复旦大学方晓生团队通过对MXene进行表面修饰，将其功函数调节至4.55~5.25 eV．如图3(m)所示，基于此构建的p-$CsCu_2I_3$/n-$Ca_2Nb_{3-x}Ta_xO_{10}$垂直异质结光探测器可以改变n-$Ca_2Nb_{3-x}Ta_xO_{10}$与电极之间的肖特基势垒．如图3(n)所示，基于聚乙二胺乙氧基化物修饰的MXene电极显著增强整流效应，整流比达16136，紫外响应度达81.3 A/W．这种基于MXene电极的高性能器件与标准洁净室制造工艺兼容，可实现大规模柔性紫外探测器，PET基底上经5000次弯曲后仍保持80%原始电流，其8×8阵列可实现紫外图像传感，利用Au/p-$CsCu_2I_3$/n-$Ca_2Nb_{3-x}Ta_xO_{10}$/MXene-PEIE光电探测器还能构建“与”和“或”功能的光电子逻辑门电路(图3(o)，(p))[44]．二维铌酸盐易于与其他微纳结构或功能材料进行复合，通过优化器件结构和集成方式，可以进一步提高光电探测器的性能和功能，实现小型化、高性能化的光探测器阵列，满足现代光电子系统对集成化、多功能化的需求．表2总结了二维铌酸盐基光电探测器的光电探测性能，凸显其在下一代高性能、低功耗光电探测领域中的应用潜力．

3　集成二维铌酸盐多功能光电探测器

迄今为止，二维铌酸盐已在光电探测器、柔性电子器件等领域展现出广泛的应用潜力．在物联网时代，前沿光电器件研究正突破传统功能设计与渐进式性能提升的局限．这一趋势推动下，基于二维铌酸盐的光电探测器也正朝着多功能器件、神经形态光电技术、机器视觉和多维视觉传感器等方向演进．

3.1　二维铌酸盐光电-突触集成光电探测器

人工智能技术在多功能光电子设备的发展中发挥着越来越重要的作用[46]．光电子神经形态器件巧妙融合传统的电学与光学优势，不仅具备宽频带、低功耗等显著特点，还能模拟甚至超越生物视觉系统功能，成为前沿研究热点．二维铌酸盐合成产生的大量杂质和缺陷通常作为陷阱态，导致显著的持续光电导效应

(persistent photoconductivity effect, PPC). 虽然PPC通常由于俘获和去俘获周期延长而导致光电探测器的响应速度变慢，但它通过产生显著的持久突触后电流为神经形态应用开辟了新途径. 如图4(a)所示，复旦大学方

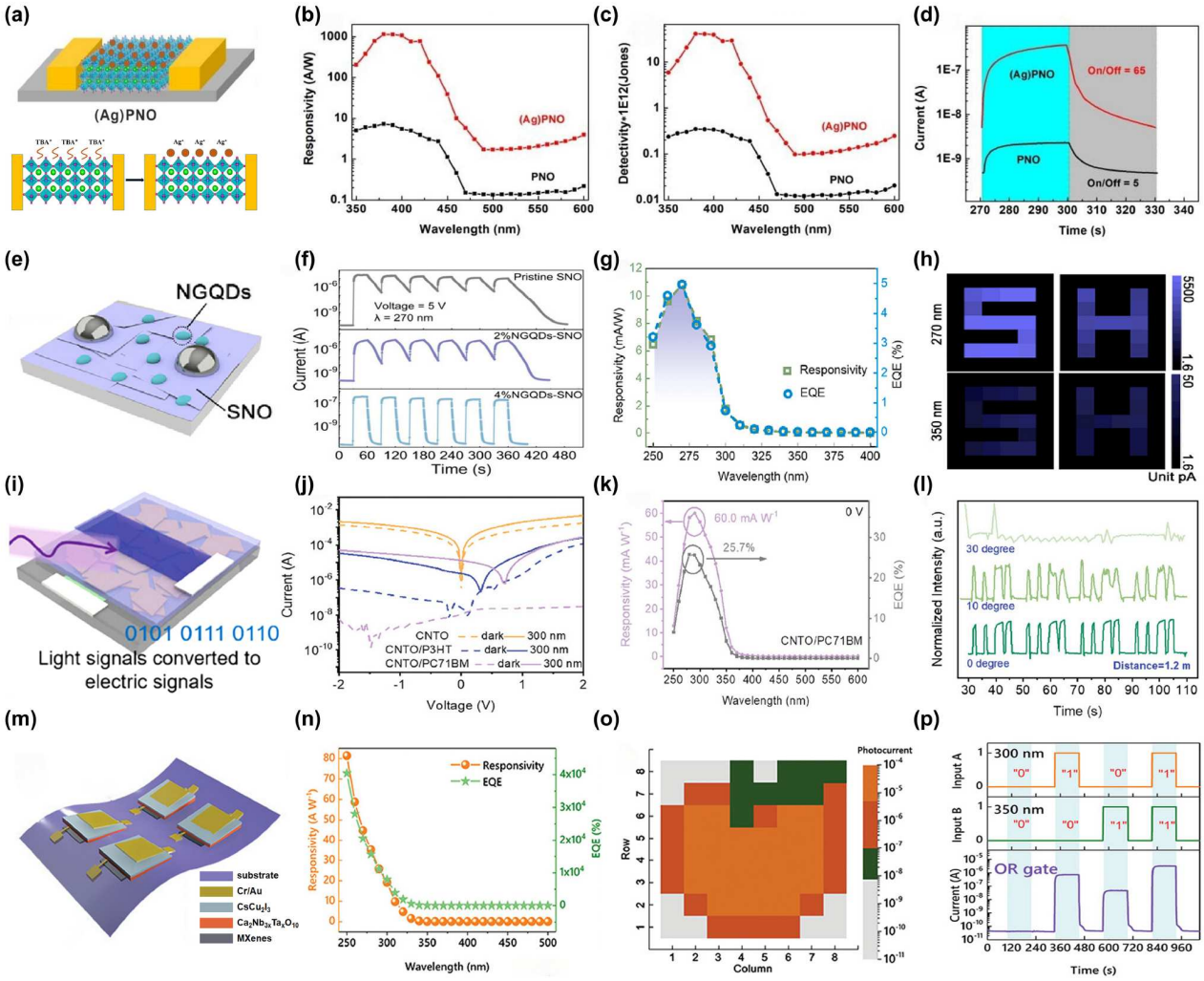


图 3 (网络版彩色)代表性的复合二维铌酸盐光电探测器. (a) (TBA)PNO到(Ag)PNO的电荷工程示意图. (b)~(d) 基于PNO和(Ag)PNO器件的响应度、探测率及开关比对比图(Copyright©2021, Elsevier Inc.)[40]. (e) SNO薄片上负载NGQDs的示意图. (f) 不同NGQDs-SNO光电探测器的电流-时间曲线. (g) 4%NGQDs-SNO光电探测器在5.0 V偏压下的响应度与外量子效率曲线. (h) NGQDs-SNO光电探测器在270和350 nm光照条件下“SH”的图像传感特性[41]. (i) 基于CNTO/PC_{71}BM混合光敏层器件紫外通信系统的原理示意图. (j) 以CNTO、CNTO/P3HT及CNTO/PC_{71}BM作为光敏层的光电器件*I-V*曲线. (k) 基于CNTO/PC_{71}BM混合光敏层器件在0 V偏压下的响应度与外量子效率. (l) 当发射端与接收端距离为1.2 m时，不同仰角(0°、10°、30°)入射光的电流信号[43]. (m) 以MXene作为底电极的Au/p-$CsCu_2I_3$/n-$Ca_2Nb_{3-x}Ta_xO_{10}$/MXenes器件结构示意图. (n)~(p) Au/p-$CsCu_2I_3$/n-$Ca_2Nb_{3-x}Ta_xO_{10}$/MXenes/MXene-PEIE器件的响应度与外量子效率、紫外图像传感阵列的光电流映射图以及双波长激发下“或门”逻辑的*I-t*曲线[44]

Figure 3 (Color online) The representative photodetectors based on 2D composite niobate nanosheet. (a) The schematic diagram of charge engineering from (TBA)PNO to (Ag)PNO. (b)–(d) Comparing the responsivity, detectivity, and on/off ratio of PNO and (Ag)PNO devices (Copyright©2021, Elsevier Inc.)[40]. (e) Schematic illustration of the NGQDs loading on the SNO sheet. (f) *I-t* curves of different NGQDs-SNO photodetectors. (g) Responsivity and EQE curves of the 4%NGQDs-SNO PD at 5.0 V bias. (h) The image-sensing profile of “SH” under 270 and 350 nm illumination[41]. (i) Schematic diagram of the UV communication system based on the CNTO/PC_{71}BM hybrid as the photosensitive layer. (j) *I-V* curves of CNTO, CNTO/P3HT, and CNTO/PC_{71}BM as the photosensitive layer. (k) Responsivities and external quantum efficiency of the device with CNTO/PC_{71}BM as the photosensitive layer at 0 V. (l) Current signals of the light incident from different elevations of 0°, 10°, and 30° with the receiver and transmitter distance being 1.2 m[43]. (m) Scheme of Au/p-$CsCu_2I_3$/n-$Ca_2Nb_{3-x}Ta_xO_{10}$/MXenes device with different MXenes as bottom electrodes. (n)–(p) The responsivity, EQE, photocurrents mapping results of 8×8 UV image sensing array, and the *I-t* curves of OR gate stimulated with dual wavelengths of Au/p-$CsCu_2I_3$/n-$Ca_2Nb_{3-x}Ta_xO_{10}$/MXenes/MXene-PEIE[44]

表 2　二维铌酸盐基光电探测器的光电探测性能

Table 2　The photoelectric parameters of 2D niobate-based photodetectors

二维铌酸盐光电探测器器件结构	材料形貌	响应波长 (nm)	偏压 (V)	开关比	响应度 (A W^{-1})	探测率 (Jones)	响应时间 (ms)	文献
Cr/Au-$Sr_2Nb_3O_{10}$-Cr/Au	纳米片	270	1	≈1×10^4	1214	1.4×10^{14}	0.4/40	[33]
	薄膜	300	1	340	≈0.6			
Cr/Au-$Ca_2Nb_3O_{10}$-Cr/Au	纳米片	270	1	≈87	1156	–	–	[25]
	薄膜	280	3	3.4×10^4	14.94	8.7×10^{13}	0.08/5.6	
Au-$Ca_2Nb_3O_{10}$-Au	薄膜	280	5	1089595	11.9	3.71×10^{14}	0.04/1.77	[38]
Cr/Au-$Ca_2Nb_{3-x}Ta_xO_{10}$-Cr/Au	薄膜	295	1	5.6×10^4	469.5	7.65×10^{13}	0.9/152	[34]
Cr/Au-$LaNb_2O_7$-Cr/Au	纳米片	300	3	88	171	4×10^{12}	0.3/97	[36]
Cr/Au-$NdNb_2O_7$-Cr/Au	纳米片	260	3	1250	62	6.7×10^{12}	0.1/7.8	[35]
	薄膜	260	3	190	1.2	7.7×10^{11}	–	
Cr/Au-$NbWO_6$-Cr/Au	纳米片	290	1	8.84×10^3	378		1.05/88	[12]
	薄膜	290	1	82	–	–	–	
Au-$Pb_2Nb_3O_{10}$-Ti	纳米片	350	0	700	2.8	1.1×10^{12}	0.2/1.2	[37]
Ag-NGQDs-$Sr_2Nb_3O_{10}$-Ag	异质结	270	5	22000	0.0108	3.39×10^{11}	t_d=67.3	[41]
Cr/Au-TQDs-$Ca_2Nb_3O_{10}$-Cr/Au	异质结	310	1	≈100	264	–	–	[42]
Au-$CsCu_2I_3$/$Ca_2Nb_{3-x}Ta_xO_{10}$-MXene-PEIE	异质结	250	–5	≈10000	81.3	–	12900/1820	[44]
FTO-$Ca_2Nb_{2.5}Ta_{0.5}O_{10}$-$PC_{71}BM$-PH1000	异质结	290	5	–	17	≈10^{13}	–	[43]
	异质结	290	0	2200	0.06		0.7/8.5	
Ag-$Ca_2Nb_3O_{10}$-PM6:$PC_{71}BM$-ITO	异质结	320	0	≈10000	0.36	–	t_d=570	[45]

晓生团队构建基于二维宽带隙半导体CNO纳米片的光电子神经形态器件, 利用材料的宽带隙和持久PPC能够区分UV-A、UV-B和UV-C辐射，展现出典型的突触行为，如长期可塑性、短期可塑性和脉冲强度依赖可塑性. 这种高灵敏度的二维铌酸盐基光突触器件能够响应低至70 nW/cm^{-2}的弱紫外光，具有37.9 fJ的低能耗(图4(b)). 基于这些特性，该器件可实现UV图像感知、识别和记忆功能, 并构建了人工神经形态网络(artificial neuromorphic network, ANN)实现92%的识别准确率, 在超灵敏UV-C视觉和加密通信等领域展现出应用潜力(图4(c), (d))[47].

随后，复旦大学方晓生团队成功研发出一种基于CNO与有机材料PM6:$PC_{71}BM$的异质结(图4(e))，集成了可切换光探测与光突触功能[45]. 通过精确调节偏置电压，可有效控制异质结内载流子及氧空位的动态行为，实现器件功能模式的灵活切换. 如图4(f)~(h)所示, 施加偏置电压时，CNO晶格中氧空位的离子化效应显著增强，导致器件表现出显著的PPC效应，从而产生大的突触电流. 在–0.5 V偏置下, 可实现超过300%的双脉冲异化(paired-pulse facilitation,) PPF指数, 这对于人工视觉系统应用中的视觉信息识别非常有利. 当偏置电压关闭时，CNO层中离子化的氧空位可在内置电场的驱动下与有机异质结层产生光电子复合，从而实现快速光响应. 在零偏置电压条件下, 器件展现出卓越的光探测性能，其响应度高达0.36 A/W(在320 nm波长光照下)，响应速度快，仅需0.57 s，这种偏置可切换特性使得单一器件能够完成从图像采集到模式识别的完整信息处理流程. 二维铌酸盐CNO的层状特性为载流子调控提供了独特优势，通过构建有机-无机异质结界面，可以有效调控光生载流子的分离与复合动力学，从而实现短期记忆向长期记忆的转变. 如图4(i), (j)所示, 8×8传感器阵列不仅能实现图像传感功能，偏压从0 V切换到–0.5 V时显示原位增强成像, 且在偏置切换后保持图像记忆超过200 s. 这种记忆特性源于材料中陷阱态对载流子的可控捕获与释放，为神经形态计算提供了物理基础. 如图4(k)所示，通过构建由28×28器件阵列与人工神经网络结合的人工视觉系统，进一步探索了图像处理和识别能力. 不同反向偏压下可调的突触权重允许优化模拟识别，经过160个训练周期后准确率达到92%. 这些研究进展为开发新一代低功耗、高集成

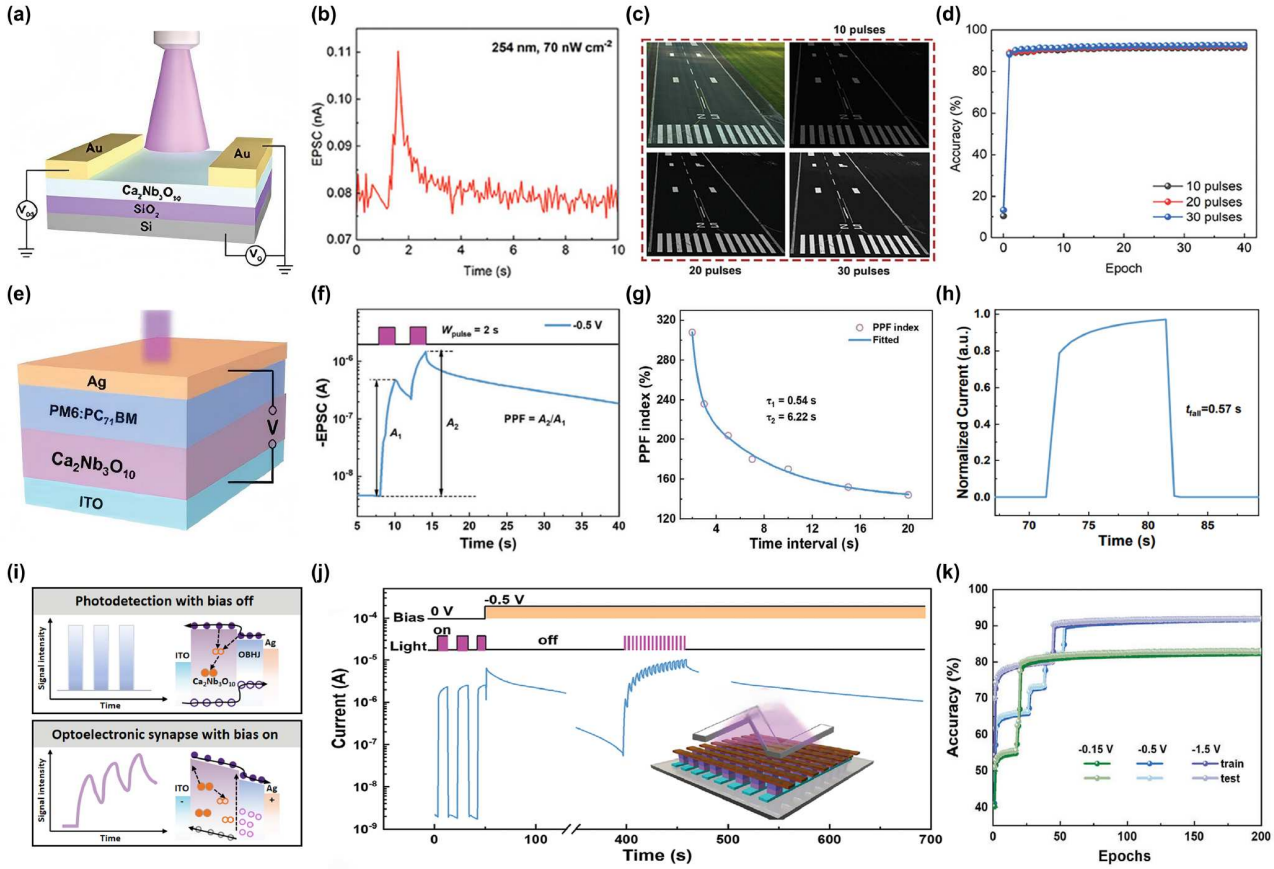


图 4 (网络版彩色)二维铌酸盐光电-突触双功能器件. (a) CNO突触器件结构示意图. (b) CNO突触器件在70 nW/cm^{2}弱紫外光照射下产生的兴奋性突触后电流. (c) UV-C波段引导飞机仪表着陆演示. (d) 28×28像素无噪手写数字图像在不同脉冲数和训练周期下的识别准确率演变[47]. (e) 基于CNO有机无机杂化结构器件的结构示意图. (f) 在–0.5 V偏置电压下, $Ca_2Nb_3O_{10}$/PM6:PC_{71}BM器件受两个连续的300 nm、脉宽2 s的光脉冲激发产生的兴奋性突触后电流. (g) $Ca_2Nb_3O_{10}$/PM6:PC_{71}BM器件的成对脉冲易化指数与脉冲间隔时间的关系. (h) 零偏置下, $Ca_2Nb_3O_{10}$/PM6:PC_{71}BM器件在一个周期内的归一化*I*-*t*曲线. (i) 双功能$Ca_2Nb_3O_{10}$/PM6:PC_{71}BM器件工作机制示意图. (j) $Ca_2Nb_3O_{10}$/PM6:PC_{71}BM器件在光照和偏压切换过程中的电流特性. (k) 基于双功能$Ca_2Nb_3O_{10}$/PM6:PC_{71}BM器件的人工神经网络(ANN)在不同偏置下的识别准确率[45]

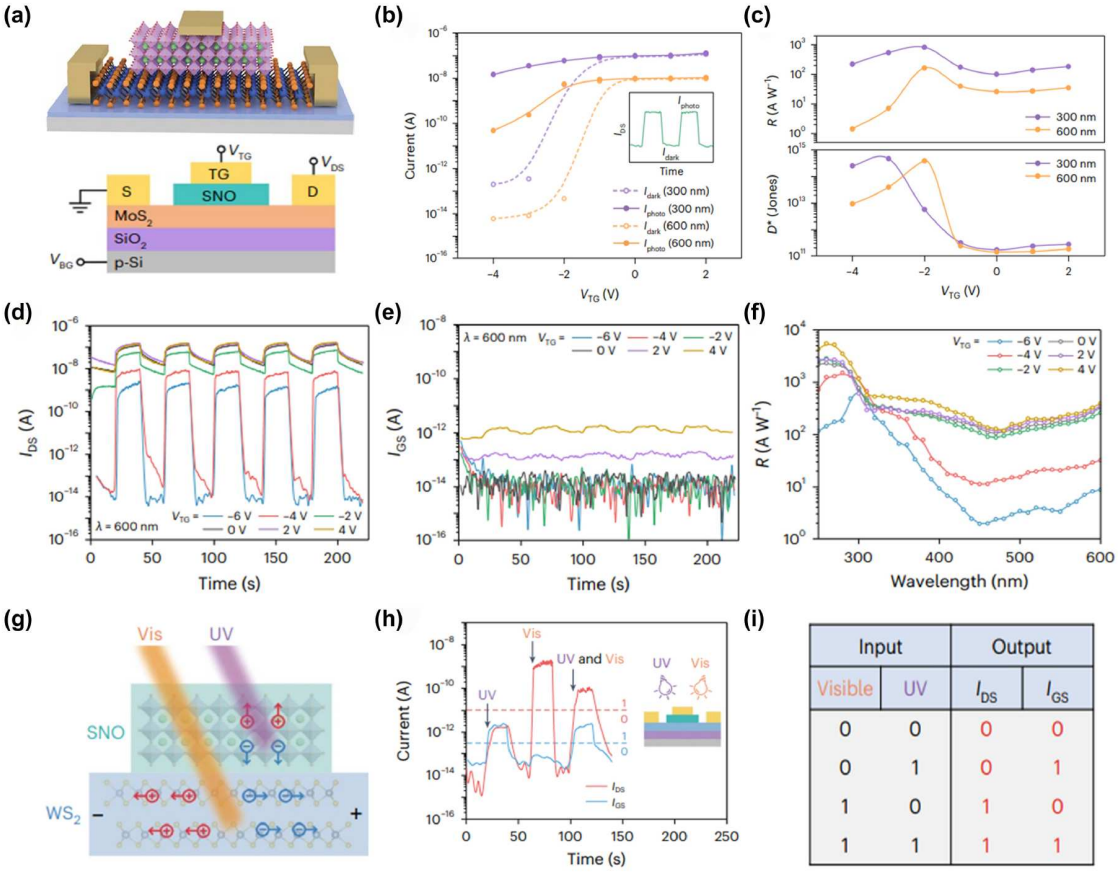
Figure 4 (Color online) Photodetection and photosynapse dual-functional devices based on 2D niobate. (a) Schematic representation of the CNO synaptic device. (b) EPSCs of the CNO artificial synaptic device in response to weak UV-C light of 70 nW/cm^2. (c) Demonstration of the UV-C-guided aircraft instrument landing. (d) Recognition accuracy evolution with pulse numbers and training epochs for 28×28 pixels handwritten digit images without noise[47]. (e) Schematic of the structure of the $Ca_2Nb_3O_{10}$/PM6:PC_{71}BM-based device. (f) The EPSC of device induced by two consecutive 300 nm pulsed light with W_{pulse} of 2 s under –0.5 V bias. (g) The relationship between the PPF index of $Ca_2Nb_3O_{10}$/PM6:PC_{71}BM-based devices and pulse interval. (h) The normalized *I*-*t* curve of the $Ca_2Nb_3O_{10}$/PM6:PC_{71}BM-based device under zero bias in one cycle. (i) Schematic illustration of the working mechanism of the dual-functional $Ca_2Nb_3O_{10}$/PM6:PC_{71}BM device. (j) The current of the $Ca_2Nb_3O_{10}$/PM6:PC_{71}BM device with light- and bias-switching process. (k) The recognition accuracy of the ANN based on the dual-functional $Ca_2Nb_3O_{10}$/PM6:PC_{71}BM devices under different applied bias[45]

度的类脑光电器件提供了重要技术路径.

3.2 二维铌酸盐光电-介电集成光电探测器

适用于二维半导体的高介电常数(高κ)栅极电介质对规模化光电子器件至关重要[48]. 然而, 传统三维电介质(如HfO_2、Al_2O_3)难以与表面无悬挂键的二维材料(如石墨烯、MoS_2)异质集成形成高质量界面[13]. 具有清洁和平坦表面的高κ层状二维铌酸盐展现出改善基于二维半导体的光电子设备的性能和降低功耗的潜力. 复旦大学方晓生团队通过自上而下液相剥离成功制备二维钙钛矿氧化物纳米片SNO, 并通过简单且无损伤的集成方法, 将其用作具有各种二维沟道材料(包括石墨烯、MoS_2、WS_2和WSe_2)的光电晶体管中的光活性高κ电介质[49]. SNO的高介电常数(24.6)能够对沟道材料进行有效的栅极控制, 基于SNO电介质的顶栅MoS_2晶体管在顶栅电压±2 V范围内可实现10^6的开关比和

88 mV dec^{-1}的亚阈值摆幅. 如图5(a)~(c)所示, 由于栅极调控和光活性栅极电介质的光生电荷转移协同效应, 具有SNO顶栅电介质的MoS_2光电晶体管在可见光或紫外光照射下表现出约10^6的开关比, 以及5.5×10^3 A W^{-1}的紫外响应度, 其探测率高达4.6×10^{14} Jones. SNO纳米片展现出与多种二维材料(包括石墨烯、MoS_2、WS_2和WSe_2)的良好集成兼容性. 如图5(d)所示, 在600 nm可见光照射下, 由于耗尽区的暗电流被极大抑制(~10^{-14} A), 基于SNO电介质的顶栅WS_2晶体管最大开关比约为10^6. 随着顶栅电压(V_{TG})的正向偏移, 器件的光电流增加, 而开关比降低. 由于SNO顶栅电介质对沟道WS_2提供出色的控制, 在600 nm入射光的开关循环中, 顶栅电流(I_{GS})保持在<10^{-12} A(图5(e)). 通过栅极控制和SNO栅极电介质的电荷转移的协同效应, 如图5(f)所示, WS_2光电晶体管对入射光表现出高响应度, 在V_{TG}=4 V时最大响应度达到5.5×10^3 A/W. 与具有用于不同波长的独立探测器的传统双波段传感系统相比, 将双波段传感集成到单个器件中可满足未来对低功耗小型



Input		Output	
Visible	UV	I_{DS}	I_{GS}
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	1	1

图 5 (网络版彩色)二维钙钛矿铌酸盐作为顶栅介电层的双栅极光电晶体管的电气特性与光响应特性. (a) 双栅MoS_2光晶体管的示意图. (b) 在不同顶栅电压下, 双栅MoS_2光晶体管的暗电流和光电流. (c) 双栅MoS_2光晶体管在300和600 nm光照下的响应度和噪声探测度与顶栅电压的关系图. (d) 在600 nm可见光照开关周期下, 不同顶栅电压下双栅WS_2光晶体管的时间分辨I_{DS}曲线. (e) 在600 nm可见光照开关周期下, 双栅WS_2光晶体管的时间分辨I_{GS}曲线. (f) 在不同顶栅电压下的双栅WS_2光晶体管光谱响应度. (g) 双栅WS_2光晶体管在可见光和紫外光照明下的示意图. (h) 双栅WS_2光晶体管V_{DS}=1 V和V_{TG}=−6 V下, 在可见光(600 nm)和紫外光(254 nm)光照开关下的时间分辨I_{DS}和I_{GS}曲线. (i) 双栅WS_2光晶体管输入光信号与输出电信号之间的关系[49]

Figure 5 (Color online) Electrical characteristics and photoresponse of dual-gate phototransistors with 2D perovskite niobate top-gate dielectric. (a) Schematic illustrations of a dual-gate MoS_2 phototransistor. (b) I_{dark} and I_{photo} of the dual-gate MoS_2 phototransistor at various V_{TG}. (c) Responsivity and specific detectivity of the dual-gate MoS_2 phototransistor under 300 and 600 nm light illumination at various V_{TG}. (d) Time-resolved I_{DS} of the dual-gate WS_2 phototransistor at various V_{TG} during 600 nm light on/off switching cycles. (e) Time-resolved I_{GS} of the dual-gate WS_2 phototransistor at various V_{TG} during 600 nm light on/off switching cycles. (f) Spectral responsivity of the dual-gate WS_2 phototransistor at various V_{TG}. (g) Schematic illustration of the dual-gate WS_2 phototransistor under visible and UV light illumination. (h) Time-resolved I_{DS} and I_{GS} curves of the dual-gate WS_2 phototransistor at V_{DS}=1 V and V_{TG}=−6 V during visible (600 nm) and UV (254 nm) light on/off switching. (i) Relationship of the input optical signal and output electrical signal of dual-gate WS_2 phototransistor[49]

化器件的需求. 基于SNO栅控WS_2光电晶体管的出色光电性能，如图5(g)，(h)所示，WS_2光电晶体管依次用600 nm可见光和254 nm紫外光照射，低能量可见光将穿过SNO顶栅电介质并被WS_2沟道吸收，而紫外光则被宽带隙SNO直接吸收，通过I_{GS}检测紫外光、漏极电流(I_{DS})检测可见光, 在时间分辨电流曲线中, I_{GS}显示出明显的紫外光响应，而I_{DS}在可见光下处于高电流水平, 从而实现单器件紫外-可见光双波段区分. 当电流水平高于或低于特定阈值时，可将其定义为二进制“1”或“0”输出，I_{DS}和I_{GS}的阈值分别设置为10和0.3 pA. 输入光信号和输出电信号之间的关系如图5(i)所示. 根据输入光信号序列在不同端子产生电输出，证明了其紫外-可见光双波段光探测性能. 二维钙钛矿SNO兼具高κ栅极调控与光活性载流子转移双重功能，突破了传统电介质的单一性能限制，为下一代低功耗光电子器件(如紫外探测器、多功能传感器)提供了新材料范式.

4 总结与展望

二维铌酸盐材料以其独特的层状结构和优异的光电特性, 在光电探测领域展现出巨大的应用潜力. 从单一材料到复合结构, 从光电探测到光电-突触和光电-介电双功能器件，这些研究成果不仅推动了传统光电技术的革新，更为发展高效、集成化、多功能的新一代光电子技术提供了关键理论依据与实验基础. 尽管二维铌酸盐在光电探测器领域取得了显著进展，要充分发挥二维铌酸盐在光电探测领域的潜力，仍面临一些挑战和机遇.

(1) 规模化生产技术突破: 现有自上而下合成工艺复杂耗时, 导致生产成本居高不下, 需通过优化流程细节提升整体效率. 合成过程中不可控的煅烧与剥离过程导致纳米片横向尺寸受限，严重影响实际应用的规模化. 为此, 需开发可控、可重复的制备策略以获得更大尺寸、形状规则的纳米片，其中开发更高效助熔剂材料是可行方案.

(2) 界面调控与缺陷机制的深入研究: 对二维铌酸盐电子结构和缺陷化学等本征特性开展深入研究，揭示PPC本征机制，为结构优化与表面钝化提供理论依据. 尽管二维铌酸盐在神经形态光电子学中展现出创新应用潜力，但缺陷或陷阱诱导的PPC严重制约了其在高性能光电探测器中的应用, 导致响应迟缓. 虽然目前已研究了包括结构优化和表面钝化在内的有效对策, 但仍然需要深入研究界面载流子调控机制. 例如, 通过界面工程优化异质结与复合结构的界面质量，减少载流子复合与界面散射损失; 同时精确调控界面态密度, 提升载流子迁移率，从而显著增强器件的光电响应速度和灵敏度, 实现一体化可切换的光电探测-神经形态器件.

(3) 多功能集成的拓展: 二维铌酸盐的多场耦合特性(光电、介电、铁电、突触)为构建感-存-算一体化光电子系统提供了独特平台. 未来应设计高效异质结构, 实现光探测、光突触与介电调控的多功能协同, 在

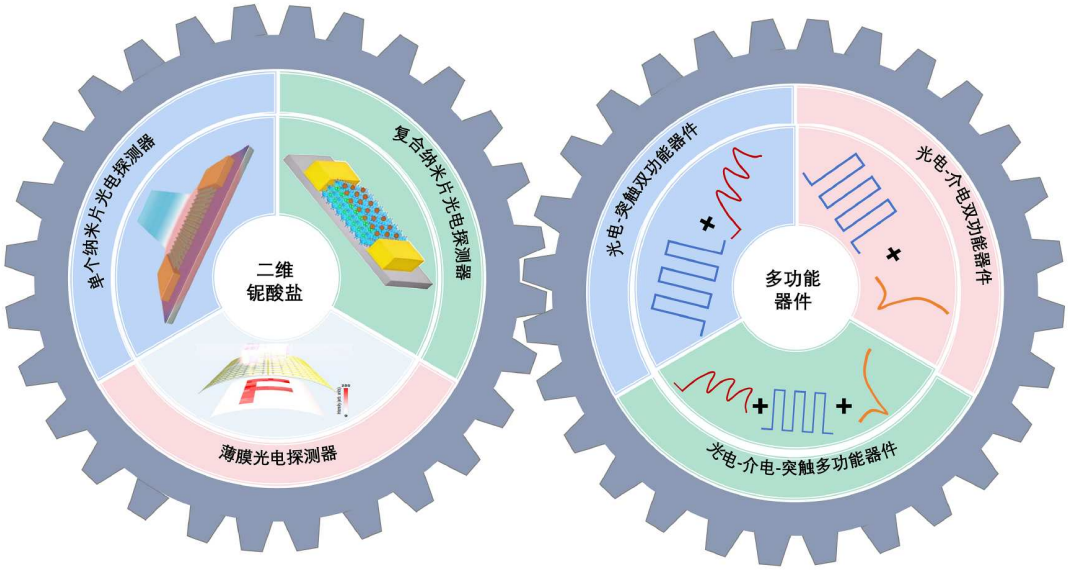


图 6 (网络版彩色)二维铌酸盐多功能光电探测器展望
Figure 6 (Color online) Prospects of two-dimensional perovskite niobate multifunctional optoelectronic devices

单一器件中达成高灵敏度、快速响应与低能耗的数据处理与信息存储，推动其在智能感知、神经形态计算及柔性电子中的深度应用.

总之，如图6所示，二维铌酸盐凭借其独特的结构和性能，在光电探测器领域展现出广阔的应用前景. 未来通过跨学科融合(材料-器件-算法)，突破光电-介电-突触等多功能集成瓶颈，有望在柔性电子、神经形态计算和智能传感领域开辟全新应用.

参考文献

1 Feng Y, Zhou Z, Li J, et al. Precise construction of two-dimensional materials and heterostructures (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 508–521 [冯懿辰, 周振佳, 李骏, 等. 二维材料及其异质结的精准构筑. 科学通报, 2025, 70: 508–521]

2 Kim W, Kim H, Yoo T J, et al. Perovskite multifunctional logic gates via bipolar photoresponse of single photodetector. Nat Commun, 2022, 13: 720

3 Zhao Y, Yin X, Li P, et al. Multifunctional perovskite photodetectors: from molecular-scale crystal structure design to micro/nano-scale morphology manipulation. Nano-Micro Lett, 2023, 15: 187

4 Lian X, Luo L, Dong M, et al. A review on the recent progress on photodetectors. J Mater Sci, 2024, 59: 21581–21604

5 Liu G, Sun Z, Su J, et al. Preparation and photodetection performance oftwo-dimensional $In_{2/3}PSe_3$ nanosheets (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 4036–4044 [刘贵恒, 孙宗栋, 苏建伟, 等. 二维$In_{2/3}PSe_3$纳米片的制备及其光电探测性能. 科学通报, 2021, 66: 4036–4044]

6 Zhao K, Wei Z, Xia J. Polarization-sensitive photodetectors based on main group layered low-dimensional semiconductors (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 1796–1805 [赵凯, 魏钟鸣, 夏建白. 主族层状低维半导体的偏振光探测器. 科学通报, 2022, 67: 1796–1805]

7 Xiao Y, Jiang B, Yang K N, et al. Controllable synthesis of two dimensional heterostructures and their application (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 2262–2278 [肖遥, 江贝, 杨柯娜, 等. 二维材料异质结的可控制备及应用. 科学通报, 2017, 62: 2262–2278]

8 Krasheninnikova O V, Syrov E V, Smirnov S M, et al. Synthesis, crystal structure and photocatalytic activity of new Dion-Jacobson type titanoniobates. J Solid State Chem, 2022, 315: 123445

9 Kang P G, Lee T K, Ahn C W, et al. Vertically aligned epitaxial $KNbO_3$ nanorod array for piezoelectric energy harvester and second harmonic generator. Nano Energy, 2015, 17: 261–268

10 Kim J H, Kweon S H, Nahm S. Low-temperature crystalline lead-free piezoelectric thin films grown on 2D perovskite nanosheet for flexible electronic device applications. Nano Res, 2019, 12: 2559–2567

11 Yang X, Gao Y, Xu X, et al. 2D Ca/Nb-based perovskite oxide with Ta doping as highly efficient H_2O_2 synthesis catalyst. Nano Res, 2024, 17: 4934–4942

12 Grinberg I, West D V, Torres M, et al. Perovskite oxides for visible-light-absorbing ferroelectric and photovoltaic materials. Nature, 2013, 503: 509–512

13 Joung S Y, Yim H, Lee D, et al. All-solution-processed high-performance MoS_2 thin-film transistors with a quasi-2D perovskite oxide dielectric. ACS Nano, 2024, 18: 1958–1968

14 Osada M, Akatsuka K, Ebina Y, et al. Robust high-κ response in molecularly thin perovskite nanosheets. ACS Nano, 2010, 4: 5225–5232

15 Taniguchi T, Li S, Nurdiwijayanto L, et al. Tunable chemical coupling in two-dimensional van der Waals electrostatic heterostructures. ACS Nano, 2019, 13: 11214–11223

16 Li B W, Osada M, Ozawa T C, et al. $RbBiNb_2O_7$: a new lead-free high-T_c ferroelectric. Chem Mater, 2012, 24: 3111–3113

17 Wang J, Ren Y, Liu H, et al. Ultrathin 2D $NbWO_6$ perovskite semiconductor based gas sensors with ultrahigh selectivity under low working temperature. Adv Mater, 2021, 34: 2104958

18 Song P, Zhang Y, Wang J, et al. Novel two-dimensional $NbWO_6$ nanosheets for high performance UV photodetectors. Adv Elect Mater, 2023, 10: 2300462

19 Cao F, Hong E, Li Z, et al. Real-time UVC imaging and high safety communication based on dual-detectable lead-free perovskite heterostructure. Adv Funct Mater, 2025, 35: 2422161

20 Li Z, Hao J, Wang H, et al. From layered perovskite oxides to multifunctional devices: recent progress in 2D niobate perovskites for photonics, catalysis, and beyond. Nano Energy, 2025, 136: 110719

21 Mao L, Stoumpos C C, Kanatzidis M G. Two-dimensional hybrid halide perovskites: principles and promises. J Am Chem Soc, 2018, 141: 1171–1190

22 Ricciardulli A G, Yang S, Smet J H, et al. Emerging perovskite monolayers. Nat Mater, 2021, 20: 1325–1336

23 Montasserasadi D, Granier M W, Spinu L, et al. Synthesis and characterization of the rare-earth Dion–Jacobson layered perovskites, $APrNb_2O_7$ (A = Rb, Cs and CuCl). Dalton Trans, 2015, 44: 10654–10660

24 Long M, Wang P, Fang H, et al. Progress, challenges, and opportunities for 2D material based photodetectors. Adv Funct Mater, 2018, 29: 1803807

25 Zhang Y, Li S, Li Z, et al. High-performance two-dimensional perovskite $Ca_2Nb_3O_{10}$ UV photodetectors. Nano Lett, 2020, 21: 382–388

26 Khan M S, Osada M, Dong L, et al. Rational assembly of two-dimensional perovskite nanosheets as building blocks for new ferroelectrics. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 13: 1783–1790

27 Li B W, Osada M, Ozawa T C, et al. Engineered interfaces of artificial perovskite oxide superlattices via nanosheet deposition process. ACS Nano, 2010, 4: 6673–6680

28 Yano H, Sakai N, Ebina Y, et al. Construction of multilayer films and superlattice- and mosaic-like heterostructures of 2D metal oxide nanosheets via a facile spin-coating process. ACS Appl Mater Interfaces, 2021, 13: 43258–43265

29 Kweon S H, Im M, Lee W H, et al. Electrophoretic deposition of $Ca_2Nb_3O_{10}^-$ nanosheets synthesized by soft-chemical exfoliation. J Mater Chem C, 2016, 4: 178–184

30 Lee W, Im M, Kweon S, et al. Synthesis of $Sr_2Nb_3O_{10}$ nanosheets and their application for growth of thin film using an electrophoretic method. J Am Ceram Soc, 2016, 100: 1098–1107

31 Saruwatari K, Sato H, Idei T, et al. Photoconductive properties of organic−inorganic hybrid films of layered perovskite-type niobate. J Phys Chem B, 2005, 109: 12410–12416

32 Okamoto K, Sato H, Saruwatari K, et al. Persistent phenomena in photocurrent of niobate nanosheets. J Phys Chem C, 2007, 111: 12827–12833

33 Li S, Zhang Y, Yang W, et al. 2D perovskite $Sr_2Nb_3O_{10}$ for high-performance UV photodetectors. Adv Mater, 2019, 32: 1905443

34 Liu X, Li S, Li Z, et al. Boosted responsivity and tunable spectral response in B-site substituted 2D $Ca_2Nb_{3-x}Ta_xO_{10}$ perovskite photodetectors. Adv Funct Mater, 2021, 31: 2101480

35 Zhang Y, Yao J, Teng Y, et al. Two-dimensional perovskite $NdNb_2O_7$ for high-performance UV photodetectors by a general exfoliation and assembly strategy. Nano Energy, 2023, 117: 108915

36 Zhang Y, Yao J, Wang L, et al. High-stability two-dimensional perovskite $LaNb_2O_7$ for high-performance wide-temperature (80–780 K) UV light detection and human motion detection. InfoMat, 2024, 7: e12614

37 Zhang Y, Yao J, Zhang Z, et al. Two-dimensional perovskite $Pb_2Nb_3O_{10}$ photodetectors. J Mater Sci Tech, 2023, 164: 95–101

38 Deng M, Li Z, Liu S, et al. Wafer-scale integration of two-dimensional perovskite oxides towards motion recognition. Nat Commun, 2024, 15: 8789

39 Zhang Y, Cao F, Li S, et al. Integration of filter membrane and $Ca_2Nb_3O_{10}$ nanosheets for high performance flexible UV photodetectors. J Mater Sci Tech, 2022, 129: 108–114

40 Zhang Y, Wang L, Wang X, et al. On-device charge engineering in 2D perovskite oxides for high performance photodetectors. Chem Eng J, 2024, 500: 157045

41 Liu X, Li S, Li Z, et al. Enhanced response speed in 2D perovskite oxides-based photodetectors for UV imaging through surface/interface carrier-transport modulation. ACS Appl Mater Interfaces, 2022, 14: 48936–48947

42 Zheng Y, Wang Y, Li Z, et al. MXene quantum dots/perovskite heterostructure enabling highly specific ultraviolet detection for skin prevention. Matter, 2023, 6: 506–520

43 Yan T, Liu X, Zhang X, et al. Large-area 2D perovskite oxides/organic heterojunction enables highly-sensitive self-powered photodetector for ultraviolet light communication. Adv Funct Mater, 2023, 34: 2311042

44 Chen J, Liu X, Li Z, et al. Work-function-tunable MXenes electrodes to optimize p-$CsCu_2I_3$/n-$Ca_2Nb_{3-x}Ta_xO_{10}$ junction photodetectors for image sensing and logic electronics. Adv Funct Mater, 2022, 32: 2201066

45 Zhao Z, Hu Z, Deng M, et al. Bias-switchable photodetection and photosynapse dual-functional devices based on 2D perovskite/organic heterojunction for imaging-to-recognition conversion. Adv Mater, 2024, 37: 2416033

46 Yim H, Yoon C, Ryu A, et al. Heterosynaptic plasticity in a vertical two-terminal synaptic device. Nano Lett, 2023, 23: 6360–6368

47 Chen J, Liu X, Zhu Q, et al. 2D $Ca_2Nb_3O_{10}$ optoelectronic neuromorphic device for ultrasensitive UV-C vision and encrypted communication. Adv Funct Mater, 2024, 34: 2402684

48 Kang L, An H L, Jung S, et al. Low-voltage operating solution-processed CdS thin-film transistor with $Ca_2Nb_3O_{10}$ nanosheets deposited using Langmuir–Blodgett method for a gate insulator. Appl Surf Sci, 2019, 476: 374–377

49 Li S, Liu X, Yang H, et al. Two-dimensional perovskite oxide as a photoactive high-κ gate dielectric. Nat Electron, 2024, 7: 216–224

Summary for “二维钙钛矿型铌酸盐多功能光电探测器”

Two-dimensional perovskite niobate materials for multifunctional photodetectors

Yong Zhang[1*] & Lin Wang[2*]

[1] *School of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Technology, Changshu 215500, China*
[2] *Advanced Materials Division, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China*
* Corresponding authors, E-mail: 202000045@szut.edu.cn; linwang2022@sinano.ac.cn

Over the past decade, the material system of two-dimensional perovskite niobates has undergone a remarkable and rapid evolution, marked by significant expansion and groundbreaking innovation. This evolution has propelled substantial progress across multiple key areas, including material synthesis techniques, structural modulation strategies, and in-depth performance exploration. In the realm of material synthesis, a wide variety of techniques have been explored. These approaches have facilitated the fabrication of two-dimensional perovskite niobates with precise control over parameters such as layer thickness, lateral dimensions, and defect densities. Structural modulation has been another focal point, with scientists exploring ways to engineer crystal structures at the atomic scale. By introducing various dopants or altering the stoichiometry of the materials, they have been able to fine-tune the electronic band structures and crystal symmetries, which in turn significantly impact the physical and chemical properties of the materials. The exceptional properties of two-dimensional niobate perovskites render them highly promising for multifunctional optoelectronic detection applications. Their ultrahigh specific surface area not only provides an extensive interface for interactions with external stimuli but also enhances the adsorption and reaction capabilities, which are crucial for sensitive detection. The excellent flexibility and transparency make them ideal candidates for the fabrication of flexible and transparent optoelectronic devices, opening up new avenues for wearable electronics and transparent display-integrated sensing systems. Moreover, their high chemical stability ensures long-term operational reliability, reducing the risk of material degradation under harsh environmental conditions. The unique physical characteristics, such as dielectric, ferroelectric, and semiconducting behaviors, offer a rich palette of functionalities that can be harnessed for diverse detection mechanisms, including photodetection, sensing of chemical and biological molecules, and signal conversion. Despite the continuous emergence of numerous experimental studies and innovative device designs, the field of two-dimensional perovskite niobates for optoelectronic detection lacks comprehensive and systematic reviews. As a result, the existing research findings are scattered, making it difficult for researchers to gain a holistic understanding of the current state-of-the-art and identify potential research directions. To address this gap, this review aims to comprehensively consolidate the latest research advances in two-dimensional perovskite niobates for optoelectronic detection. It conducts a critical and in-depth review of their application efficacy in various optoelectronic device architectures. For single-material-based prototype devices, the review analyzes how the intrinsic properties of two-dimensional perovskite niobates contribute to device performance. In composite material systems designed for performance optimization, it explores the synergistic effects between different components and how they enhance the overall detection capabilities. Regarding photonic synaptic devices that mimic neuromorphic computing, the review delves into the mechanisms of information processing and storage, as well as the potential for developing intelligent sensing systems. Additionally, for optoelectronic-dielectric bifunctional integrated devices, it discusses the integration strategies and the resulting multifunctionalities. Furthermore, this review meticulously analyzes the core challenges faced by the material system of two-dimensional perovskite niobates in optoelectronic detection applications. These challenges include issues related to material scalability, device stability under long-term operation, and the development of efficient interface engineering techniques. By thoroughly understanding these challenges, the review also provides a forward-looking perspective on future development directions in the field. It explores potential solutions to overcome the existing limitations and outlines emerging research trends that could drive the further development of high-performance optoelectronic devices based on two-dimensional niobate perovskites. The ultimate goal of this review is to offer valuable insights and guidance for researchers engaged in the design and development of advanced optoelectronic devices, thereby facilitating the realization of their full potential in a wide range of applications.

photodetectors, perovskite niobates, 2D nanosheets, multifunctional optoelectronic devices

doi: 10.1360/CSB-2025-5153