科学通报 2026 年 第 71 卷 第 9 期: 1876 ~ 1887
光电探测材料与器件专题 评 述
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

铁电材料集成光电探测系统的研究进展

王志莹, 潘峪, 金贤宇, 苏莉*, 张大伟

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093
* 联系人, E-mail: lisu@usst.edu.cn

2025-04-10 收稿, 2025-08-11 修回, 2025-08-13 接受, 2025-08-14 网络版发表
国家自然科学基金(62204046)资助

摘要 光电探测器作为基于光电效应的功能性器件是下一代物联网系统不可或缺的组成部分. 研发满足多样化需求的高效光电探测器正成为重要发展趋势. 铁电材料因晶胞对称性破缺可产生独特自发极化, 且该极化在外电场下具有可切换性. 铁电极化场具备非易失性和可重写特性, 在铁电集成光电探测器中, 铁电材料的引入可有效调控能带弯曲与载流子输运. 铁电集成为高性能光电探测提供了极具前景的设计策略. 本文综述典型铁电材料基础特性与光电探测器基础原理, 并对铁电材料集成光电探测系统的研究进展以及铁电场调控机制展开深入讨论, 总结铁电集成光电探测系统的潜力与挑战.

关键词 铁电材料, 铁电场, 铁电集成光电探测器, 铁电场调控

光电探测器作为光电转换的功能器件是物联网系统不可或缺的核心组件, 而多功能化需求是器件发展的必然趋势. 铁电体(ferroelectricity)是一类具有非中心对称结构的极性晶体, 由于晶胞对称性破缺诱导自发极化, 其中极化取向相同的区域将会形成铁电畴(domain), 铁电畴之间的界面称之为畴壁(domain wall)(图1(a))[1]. 极化可随着外电场E实现翻转, 因此电滞回线是判断材料是否具有铁电性的依据(图1(b))[2]. 铁电材料的不断研究推动了其集成器件的发展. 在铁电材料集成光电系统中, 铁电自极化可有效调控能带弯曲与载流子输运, 且其与内建电场的协同效应都有利于器件性能的优化. 本文综述了典型的铁电材料特性、集成光电探测系统研究进展, 讨论了铁电集成光电系统中铁电调制机制及协同机制, 归纳总结了铁电材料集成光电探测器的发展潜力与铁电材料在光电子领域面临的挑战.

1 铁电材料

1.1 铁电材料的类型

当代研究通常认为, 20世纪初罗息盐(酒石酸钾钠, $C_4O_6H_4KNa$)的发现开启了铁电材料的研究之路, 后续研究也从理论与实验方面不断地发掘各类新型铁电材料, 并验证材料铁电性[3]. 本文根据材料结构和化学组成综述了钙钛矿型铁电材料、二维铁电材料、有机聚合物以及新型非传统铁电材料(图2).

1.1.1 钙钛矿型铁电材料

ABO_3型的钙钛矿氧化物是最为常见的一类铁电体, 典型的有钛酸钡($BaTiO_3$)[4]、锆酸铅($PbZrO_3$)[5]、钛酸铅($PbTiO_3$)[6]及锆钛酸铅($PbZr_xTi_{1-x}O_3$)等[1]. 传统铁电体由顺电相转变为铁电相主要包括中心离子偏移、有序-无序型以及两者混合型[3]. $BaTiO_3$是典型的中心离子偏移诱导自极化的铁电体(居里点位393 K), 低于居里温度时Ti^{4+}沿[001]方向发生偏心位移, 诱导自

引用格式: 王志莹, 潘峪, 金贤宇, 等. 铁电材料集成光电探测系统的研究进展. 科学通报, 2026, 71: 1876–1887
Wang Z, Pan Y, Jin X, et al. Research progress on ferroelectric material-integrated optoelectronic detection systems (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 1876–1887, doi: 10.1360/CSB-2025-0492

© 2025《中国科学》杂志社

发极化，从而实现从立方顺电相到四方铁电相的相变. 再如，$PbTiO_3$低于居里温度(~763 K)，Ti^{4+}和O^{2-}均沿[001]方向向上位移，因O^{2-}的位移量大于Ti^{4+}，从而产生净偶极矩，此时$PbTiO_3$从立方顺电相转变为四方铁

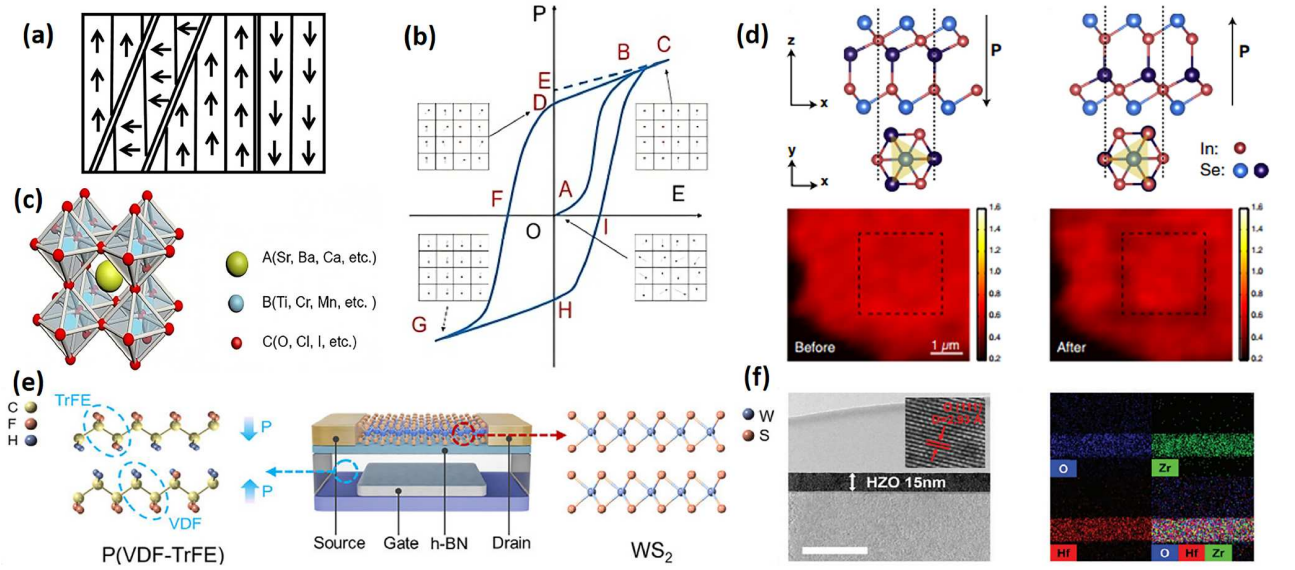

图 1 (网络版彩色)(a) 90°和180°铁电畴示意图(反向平行自极化取向为180°电畴，其畴壁称为180°畴壁，自极化方向为直角则为90°畴壁)[1]; (b) 铁电材料磁滞回线及铁电畴随电场翻转示意图[2]; (c) ABC_3型钙钛矿结构[2]; (d) 偶极互锁的α-In_2Se_3侧视与顶视图，在PFM反转极化前后，对三层In_2Se_3样品进行二次谐波(SHG)强度mapping[11]; (e) P(VDF-TrFE)分子结构及其与WS_2集成的FET器件结构示意图[12]; (f) 铁电相HZO铁电薄膜(15 nm)的HR-TEM图以及截面HR-TEM显示HZO为正交晶相[13]

Figure 1 (Color online) (a) Schematic diagram of 90° and 180° ferroelectric domains. The antiparallel spontaneous polarization orientation results in 180° electric domains, and their domain walls are referred to as 180° domain walls[1]. (b) Schematic diagram of the hysteresis loop of a ferroelectric material and the flip of ferroelectric domains with electronic field[2]; (c) crystal structure of a typical ABC_3 perovskite[2]; (d) side and top views of two energy-degenerate ferroelectric In_2Se_3 structures and SHG intensity mapping on a trilayer In_2Se_3 sample before and after PFM reversed poling[11]; (e) schematic diagram of the molecular structure of P(VDF-TrFE) and its FET device structure integrated with WS_2[12]; (f) HR-TEM image showing the thickness (15 nm) of the ferroelectric HZO film and cross-sectional image of orthorhombic HZO crystallite using HR-TEM[13]

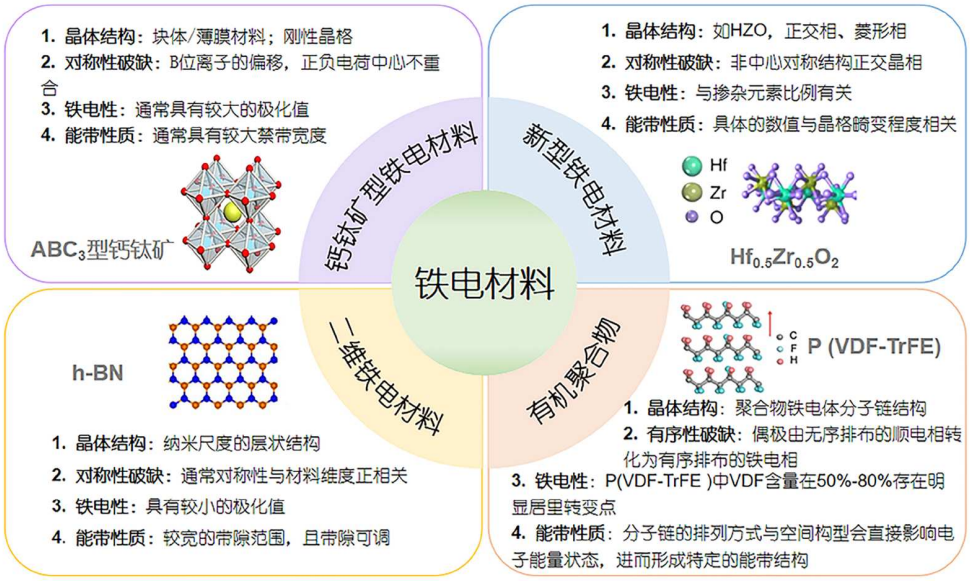

图 2 (网络版彩色)铁电材料性能总结

Figure 2 (Color online) Summary of ferroelectric material properties

电相. 钙钛矿氧化物铁电体是较早被用于光电探测系统研究的铁电体, 如$PbZr_xTi_{1-x}O_3$(PZT)作为栅极电介质被用于MoS_2/PZT的铁电场效应晶体管(Fe-FET), 通过探究极化效应与界面的相互作用, 证实MoS_2/PZT Fe-FET在随机存取储器(RAM)中的优势[7]. 当O离子被卤素离子取代(Cl^-、Br^-、I^-)时, 即形成ABC_3型的卤化物钙钛矿, 其铁电性亦主要源于中心离子偏移(图1(c))[2]. 正交晶系$CsPbBr_3$的铁电性源于八面体$[PbBr_6]^{4-}$结构单元的畸变与Cs^+的偏心位移, 导致正负电荷中心略微分离[8]. 相较于氧基钙钛矿, 卤化物钙钛矿具有更为灵活的晶体结构调控性. 调控A位为有机阳离子, 基于其化学多样性及易调控特性, 赋予杂化钙钛矿除铁电特性外的其他物理性质. 譬如, Luo等人报道的双钙钛矿(n-propylammonium)$_2$CsAgBiBr$_7$具有明显的铁电性(饱和极化强度~1.5 mC/cm^2), 这归源于其结构对称性的变化: 居里温度(~222 K)时的晶体为中心对称的单斜空间群*P21/m*, 整个框架位于镜面平面; 当低于居里温度时, 则会转变为极性空间群*P2*, 晶体结构性降低, 镜面对称性被打破[9]. 该研究证实铁电相钙钛矿的极化反转可促进光电探测器在光照与暗态产生更大的电导率差, 进而提高器件开关比至10^4, 探测率可达5.3×10^{11} Jones. Sun等人报道基于$BA_2CsPb_2Br_7$的光电探测器的探测率达~1.2×10^{12} Jones, 这归功于铁电自发极化(P_s)沿*C*轴方向诱导的内建电场, 协同光耦合作用共同促进光生载流子的分离[10].

1.1.2 二维铁电材料

近年来, 一系列具有超薄层状的铁电材料已经在实验室被陆续发现, 它们在功能性范德华异质结设计中展现出巨大吸引力[14]. 研究证实少层或单层的二维铁电体在室温展现出可切换的面外和面内自发极化. 如SnTe单层中Sn和Te原子的相对位移导致面内铁电性[15]. 相较于刚性铁电体中晶格造成更多的界面晶格畸变与缺陷, 悬挂键也会因吸附杂质原子而易引入额外漏电流等问题, 新型二维铁电具有强层内力和弱层间力的组合. 铁电性源于固有晶胞对称性破缺的铁电体称为本征范德华铁电材料, 如α-In_2Se_3和$CuInP_2S_6$等[15~17]. 其中, 偶极子互锁的α-In_2Se_3可在室温呈稳定铁电相, 它具有Se-In-Se-In-Se的交替五层结构, 由于中心Se层与相邻的两个In层间的不等距而呈现非等效性, 空间旋转对称性被打破[18]. α-In_2Se_3中通过移动Se原子在水平与垂直平面移动, 即可同时反转面外极化(OOP)与面内极化(IP), 这种切换是由于Se原子与方向上相邻近的In原子层间距离发生横向位移所致(图1(d))[11]. 目前研究证实二维铁电材料在高效光电子器件方面展现出巨大潜力. Wang等人利用铁电相α-In_2Se_3作为沟道材料设计铁电半导体场效应晶体管(Fe-FET), 器件展现出超高比探测率(6.34×10^{17} Jones)及超过10^6的耐久循环稳定性[19]. 该研究中铁电极化方向可通过栅压或光照切换: 极化向上时沟道电子耗尽而呈现高阻态, 极化向下时电子累积使电阻大幅降低, 使得器件开关比可达2.9×10^5. 此外, 器件在脉冲栅压“开”状态表现为n型半导体特性, “关”状态因铁电极化束缚电荷的作用而呈现p型半导体的导电特性, 这种“类型反转”源于铁电-半导体耦合引起的载流子浓度调制. 随后, 团队基于$CuInP_2S_6$设计的可重构离子光电二极管用于高并行度传感器内计算的三维范德华集成[20]. 正电压极化时, $CuInP_2S_6$中的Cu^+向底电极迁移产生向上内电场, 促进光生载流子分离, 使短路电流(J_{sc})正向增大; 反之则产生向下内电场, J_{sc}方向反转. 离子迁移诱导的内电场可调控器件的光伏效应.

目前多数二维铁电体是中心对称结构, 但通过特定的堆叠方式可使其实现稳定的铁电特性. 近年来, 研究人员发现可通过改变二维材料的堆叠顺序, 进而破坏空间反演对称性. 早在2017年, Wu等人提出滑移铁电(sliding ferroelectricity)理论, 揭示了二维层状中垂直晶面的面外铁电性普遍存在[21]. 这一理论预测在系列二维材料中得到证实, 如Td-WTe_2、3R-MoS_2、双层转角h-BN等滑移铁电体系. 譬如, Td-WTe_2是非中心对称的正交晶系, 具有极性空间点群*pmn2*, 研究人员利用PFM表征及微纳器件的电切换证实其具有面外极化性, 且维度从双层至块体的室温测试表明其铁电切换能力具有厚度依赖性[22]. 此外, 两片超薄h-BN纳米片中界面处的滑移铁电性也被研究证实, 即h-BN以亚稳态的非中心对称平行取向堆叠在一起, 实验观察到由畴间晶格位点横向位移引起的反向法向极化交替畴, 利用探针对表面施加偏压与扫描, 实现横向滑移耦合的可逆极化切换[23]. 研究人员通过堆叠工程发现了二维材料中滑移铁电性, 拓展了铁电性诱导新机制的认知与材料应用范围.

1.1.3 有机聚合物铁电材料

它是一类具有铁电性的有机聚合物, 聚偏二氟乙烯(PVDF)及其共聚物是过去数十年中研究最为广泛的铁电聚合物[24]. 早在20世纪70年代, PVDF的压电性和热释电性就已被先后证实[25]. PVDF以-CH_2-CF_2-(VDF)

偏二氟乙烯单体为基础，根据分子链构象不同分为α、β、γ及δ四种多晶型. 其中，分子排列反式-偏转交替的α相是非铁电相，这是因为相邻电偶极子的偶极矩方向相反而抵消. 相比之下，β相的晶胞由两条全反式构象链组成，分子链呈锯齿状，每个重复单元的偶极矩垂直于分子链轴，即所有偶极矩具有相同极化取向，使得β相产生强分子极化[26]. 后续，研究人员将三氟乙烯(TrFE)和四氟乙烯(TFE)等第二单体分子引入PVDF，以获得环境稳定且铁电性更优异的共聚物如P(VDF-TrFE)和P(VDF-TFE)[27]. P(VDF-TrFE)的饱和极化强度P_s为100 mC/m，其居里点随TrFE单体比例(20mol%~50mol%)的增加而降低. 因此，可通过调节TrFE的含量来改变P(VDF-TrFE)的相变温度[28]. 早期Wang等人提出利用P(VDF-TrFE)作为栅极设计P(VDF-TrFE)/MoS_2异质体系的光电探测器，其中P(VDF-TrFE)的剩余极化不仅可有效抑制MoS_2沟道暗电流，且可在沟道中提供高的局部静电场(在几纳米尺度内约为10^9 V/m)，使得MoS_2沟道处于全耗尽态，因此器件具有高达2570 A/W的光响应率[29]. Fang团队研究发现在P(VDF-TrFE)铁电负电容效应及光门控效应协同作用下，P(VDF-TrFE)/h-BN/WS_2/h-BN基器件展现出2.3×10^{13} Jones的光探测率，以及>10^4的编程/擦除比(图1(e))[12]. 这项工作展示了有机铁电-二维半导体材料在传感、存储和逻辑一体化器件中的应用潜力.

1.1.4 新型铁电材料

早在2011年，德国科学家已研究证实氧化铪(HfO_2)薄膜展现出铁电性[30]. 后续的研究表明通过掺杂如Al、Si、Y、Sr、Zr及Gd等元素可显著增强HfO_2的铁电性. Zr因与Hf归属于同族元素，因而掺杂后的$HfZrO_2$也是一种高K介电材料，当掺杂量为50%时具有稳定且良好的铁电性[31]. 譬如，Hyuk-Jun Kwon等人报道利用纳米级的铁电材料$HfZrO_2$和二维半导体材料SnS_2设计FET，器件展现出多级数据存储能力并成功模拟了兴奋性/抑制性突触等关键生物特性(图1(f))[13]. Kwon等人提出了一种铁电-反铁电混合相的$HfZrO_2$(HZO)材料设计方法，以实现形态相界(morphotropic phase boundary, MPB)场效应晶体管的性能优化. 该研究不仅验证了混合相HZO的电容增强效应，制备的双层MPB-FETs实现了无滞后I_{on}增强和优越的短沟道效应免疫性[32]. $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$铁电薄膜作为新型铁电材料兼具超薄厚度及与Si基半导体工艺兼容等优势，展现出小型化光电子器件的设计潜力. 铝钪氮(AlScN)是一种新兴的III族氮化物宽禁带半导体材料，具有纤锌矿结构的AlScN在晶体生长方向上存在正负电荷的不对称分布，这种极性源于不同原子之间的电负性差异导致的电偶极矩[33]. Simon Fichtner等人于2019年发现了AlScN薄膜中铁电性的存在，认为AlScN的铁电性来源于纤锌矿结构的形变，并证实了其剩余极化超过了100 μC/cm^2，铁电性能优于III族铁电薄膜[34]. 随后，Dinh等人利用分子束外延在GaN表面制备AlScN薄膜，由于两者间高的晶格匹配度，AlScN/GaN异质结界面处具有较高的二维电子气面密度和迁移率[35].

1.2 基于多场调控的铁电极化

基于铁电材料的极化特性，通过设计铁电二极管、铁电晶体管以及铁电隧道结等器件结构实现了铁电材料与衬底的各种集成.

1.2.1 传统电场调控

铁电极化通常采用电场调控实现，其自发极化方向会因电场作用而发生改变. 当外电场强度低于矫顽场时，极化方向沿着电场方向轻微偏转，但畴壁不移动；当电场大于矫顽场E_c时，与电场方向相一致的铁电畴通过畴壁迁移，克服晶格势垒，偶极子整体绕晶体学轴转动，使极化方向转向电场方向[36]. 如$BaTiO_3$的极化反转依赖Ti^{4+}在电场下偏离中心位置的离子位移. 而有机铁电体(如PVDF)依赖分子偶极的取向转动，因分子间相互作用较弱，所以其低的矫顽场实现极化. 多晶材料的晶界会阻碍畴壁移动，导致矫顽场高于单晶，如$BaTiO_3$单晶的矫顽场约1 kV/cm，而陶瓷可达10 kV/cm[37].

1.2.2 光、热、力、离子场调控

传统的电场调控易引发较大漏电流，甚至介电击穿，导致器件性能失效. 研究人员通过光场、离子及力等手段代替电场实现铁电极化调控. 譬如，Tan等人研究发现光生载流子在内建电场(源于$BaTiO_3$与电极界面)作用下向两端分离，随着电荷的不断累积并超过矫顽场，铁电极化发生反转[38]. Zhang等人揭示α-In_2Se_3/Te异质体系中光电流局域增强效应：入射光聚焦于沟道诱导局域极化，有序排列铁电畴与去极化场方向一致，且与内建电场方向重合，引发界面处电子-空穴累积，进而显著降低界面能带弯曲程度[39]. Xu等人利用飞秒激光在$LiNbO_3$区域产生温度梯度，进而形成一对对立的等效电场，通过调控扫面方向与间距实现铁电极化的写入与擦除[40]. 针对二维铁电材料，该团队又利

用离子调控$CuInP_2S_6$的极化, 即置于阳离子液一段时间后的本征向上的铁电畴因吸附阳离子而产生内建电场, 从而引发极化翻转[41]. Lu等人提出力学调控铁电极化策略, 即利用AFM探针对铁电体($BaTiO_3$)施加力的作用, 使其局部引发不均匀形变, 进而打破原本对称的吉布斯自由能双势阱分布, 实现极化调控[42].

2 铁电基光电探测器研究现状

2.1 光电探测器的基础理论

2.1.1 器件结构

典型的光电探测器是由基底、光电功能层和电极构成水平结构或垂直结构的器件. 场效应晶体管(FET)一般由基底、栅极、电介质、光电功能层、源极和漏极构成. 光电功能层作为光电探测器核心部分, 通常利用光电半导体设计p-n结形成内建电场, 以促进载流子的分离与输运. 研究证实可采取界面工程、掺杂调控和电场调控等方法提升器件灵敏度、拓宽响应光谱范围等光电性能[43]. 对FET而言, 栅极是除光电功能层外的另一核心部分, 通过施加栅压产生电场进而调控半导体沟道中载流子浓度, 实现对源漏电极间电流的开关或放大控制.

2.1.2 光电转化基本过程

器件光电探测性能优化不仅依赖器件结构设计, 也依赖其光电效应原理的工作机制[42]. 半导体基光电探测器一般基于光电效应原理, 即将光信号转化为电信号. 根据入射光子与光电材料中电子相互作用而产生载流子机制, 可分为外光电效应和内光电效应. (1) 外光电效应是金属或半导体表面在特定波长的光辐照下吸收光子并逸出电子的现象. (2) 内光电效应是半导体材料在光量子的作用下, 其价带上的电子被激发至导带形成载流子, 使其导电性增加的现象[44]. 内光电效应又可分为光电导效应与光伏特效应. 当半导体材料受入射光照射并吸收入射光子产生光生载流子(电子-空穴对)时, 使自身电导率增大的现象为光电导效应. 当一定波长入射光照在非均匀半导体(如p-n结)时, 会在界面处形成内建电场, 光生载流子在内建电场作用下会被有效地自发分离, 该现象称之为光伏特效应.

2.1.3 基本性能参数

光电探测器主要从响应度、探测率、响应时间、开关比及光谱响应范围这五个方面进行性能评价.

(1) 响应度:

$$R_\lambda = I_{ph} / P_\lambda S, \tag{1}$$

其中, P_λ为入射光功率, S为有效光接受面积, I_{ph}为光暗电流差.

(2) 探测率:

$$D^* = R_\lambda / (2eI_d / S)^{1/2}, \tag{2}$$

其中, D^*为归一化探测率, I_d为暗电流.

(3) 响应时间: 上升(t_{rise})和下降时间(t_{decay})定义为探测器分别接受和去除光照射时, 输出信号由光电流稳定值的10%上升到90%和由90%下降到10%所需要的时间.

(4) 开关比: 一般是指I-t曲线中I_{ph}电流差值.

(5) 光谱响应范围: 基于光电效应, 其光谱响应曲线存在长波截止边.

$$\lambda = 1240 / \Delta E(\text{eV})\ \text{nm}. \tag{3}$$

2.2 铁电材料集成光电探测系统

随着对器件小型化、柔性可穿戴化以及低功耗等需求的日益增长, 研究人员通过结构设计、能带工程、掺杂工程等技术提高光电探测器性能. 譬如, Yan等人设计的有机-无机异质界面FTO/TiO_2/P3HT(PTB7)/Ag中, 有机层和Ag纳米电极有效降低了暗电流[45]. 又如, Zhang等人设计WS_2/石墨烯二维半导体异质结, 提高了载流子传输速率和响应度[46]. 尽管光电探测器的性能已经得到改善, 但器件仍然面临着灵敏度低、稳定性差等挑战. 特别是这类技术设计的异质体系, 往往还需要考虑半导体带隙匹配, 且多界面的晶界与缺陷也易加剧载流子散射, 从而导致器件性能的衰减. 新兴的功能材料可通过施加电场、磁场、光场及应力等外场实现器件性能调控.

铁电材料因其强响应性、极化可调谐性以及晶体结构简单正吸引越来越多的关注. 受限于临界尺寸效应和结构不稳定性, 传统块体氧基钙钛矿的铁电极化会在纳米尺度下被破坏. 超薄二维铁电材料、有机聚合物铁电性的不断发现与发展, 不仅解决了材料尺度问题, 也为后续铁电材料集成柔性、小型化器件集成提供了可能性[2]. 将铁电材料引入光电探测系统后, 基于铁电场效应实现载流子浓度及输运调节以及半导体能带弯曲调控等现象也已逐步被研究证实.

2.2.1 铁电材料集成异质结型器件

譬如, 在P(VDF-TrFE)调谐的GeSe/MoS_2范德华异

质结构中, 极化向上的P(VDF-TrFE)可使GeSe能带向上弯曲, 促进载流子的分离[47]. 此外, 借助原子力显微镜(AFM)探针作为极化电极, P(VDF-TrFE)薄膜被精确极化形成向上或向下极化的不同畴区, 可被用于调控MoS_2半导体沟道中载流子掺杂[48]. 石墨烯/铋铁氧(BFO)体系中, 通过压电力显微镜(PFM)对铁电层向上与向下极化状态进行编辑, 实现铁电极化的切换, 使得该器件实现高达7.62×10^6 A/W的响应度[49]. 铁电相的锆钛酸铅(PZT)引入聚3-己基噻吩(P3HT)/石墨烯体系, 垂直异质结中PZT的永久表面偶极调节沟道中电荷迁移: 向下极化场作用下促使空穴从P3HT向石墨烯传输, 响应时间从无极化0.35 s/4.02 s有效缩短至极化后0.18 s/1.62 s[50]. 在$MoSe_2/NbOI_2$异质体系中, 利用$NbOI_2$的面内极化和$MoSe_2$的高吸收率, 实现了高效的偏振敏感自供电光电探测[51]. 由此可见, 在铁电/半导体异质体系中, 通过铁电层极化场调控可实现电荷的累积或耗尽.

2.2.2 铁电材料集成FeFET型器件

基于铁电材料/二维半导体设计的铁电场效应晶体管(FeFET)正逐渐被用于逻辑运算、数据存储和光电探测等研究. 譬如, 具有高K(>3.9)值的锆钛酸铪(HZO)作为栅极电介质有利于调控沟道中载流子输运特性, 可提供电荷屏蔽以及减少杂质散射. 譬如, Tu等人利用HZO薄膜作为栅极电介质, 基于铁电负电容效应引起的更强的光电栅效应与电压放大协调作用, HZO/MoS_2基光电探测器展现出4.75×10^{14} Jones的超高探测率[52]. Wu等人利用P(VDF-TrFE)作为栅极电介质, 与多层$MoTe_2$集成FET光电探测器, 通过改变栅极偏压在沟道中实现n-p、p-p及n-n型等不同掺杂类型, 器件开关比可达5×10^5, 探测率高达3×10^{12} Jones[53]. 此外, 该团队的研究报道P(VDF-TrFE)/$MoTe_2$集成的二维光电二极管阵列, 铁电畴的渐进式切换支持线性、对称的多态光响应调节, 阵列可在无需任何外部存储或计算单元的条件下, 通过训练完成模式识别与分类任务, 成功实现了高性能图像传感、权重存储及高级计算在单一架构中集成[54]. 此外, 基于α-In_2Se_3和滑移铁电工程的双层h-BN的系统FeFET器件也在非易失性存储器件设计中得到实验验证. 譬如, 已报道的Al_2O_3/α-In_2Se_3/HfO_2/Si结构中, 通过铁电半导体沟道中的移动电荷提供有效屏蔽以有效消除退极化场, 器件获得10^8的开关比以及862 μA/μm的最大漏极电流值[55].

2.2.3 光电功能型的铁电材料集成器件

与光电功能层中的半导体材料类似, 研究人员研究发现了一类具有良好光敏特性且具有铁电性的杂化钙钛矿型铁电材料: 周期性交替的有机无机层(自然量子阱)的独特结构引起了不同晶相的非线性光学与电学性质, 且由本征自发极化引起的内建电场提供了驱动力, 以用于光激发载流子的分离与传输. Luo团队生长的$EA_4Pb_3Cl_{10}$杂化钙钛矿因有机阳离子有序-无序相变以及八面体形变产生自发极化, 以此设计的光电探测器展现出自极化特性[56]. 该团队成功构建自供能日盲紫外光电探测器, 其在0 V偏压具有18.6 μA/cm^2的光电流. 除此之外, 研究人员在α-In_2Se_3纳米片中也证实了铁电场可提升平面单层光电探测器光响应度的类似结论[57].

3 光电探测器中铁电极化场调控机制

3.1 铁电场对光电半导体能带调控

铁电-光电半导体异质体系中形成不对称的能带结构, 铁电极化可直接调控界面处半导体的能带弯曲程度. 早期研究表明, 在$TiO_2/BaTiO_3$核壳结构纳米线的异质体系中, 通过调节偏压调控铁电极化状态, 当$BaTiO_3$在界面处呈现负的自极化(即正极化)时会诱导TiO_2表面能带向上弯曲, 增加耗尽层宽度, 促进光生电子-空穴分离, 提高PEC性能(图3(a))[58]. 随后, Fang等人报道的纳米纤维基$BaTiO_3$@TiO_2体系中, $BaTiO_3$的向下极化场增强与之接触的TiO_2能带弯曲水平, 促进载流子的分离与传输, 协同优化器件开关比达到~10^4, 这是TiO_2器件的375倍[59]. Li等人报道的VZnO/Si体系中, V掺杂的ZnO施加偏压后, 铁电层形成内建电场, 加速光生载流子分离, 界面处分别出现空穴的聚集和电子的耗尽, 导致能带向上弯曲[60]. 此外, 通过超强的铁电局域场诱导改变低维晶体的键长与键角, 进而改变光电材料带隙的研究也被报道证实. P(VDF-TrFE)/MoS_2体系中, MoS_2在强铁电局域场的作用下, 其响应光波长可从850 nm扩展至1550 nm, 且向上极化驱动的MoS_2器件PL光谱也从678.46 nm红移至687.26 nm, 即表明其带隙相较于初始MoS_2有所减小[29].

3.2 铁电场对载流子输运调控

据报道, 铁电自发极化也可以通过化学诱导和界面工程来控制. 铁电体与半导体结合形成层状异质结,

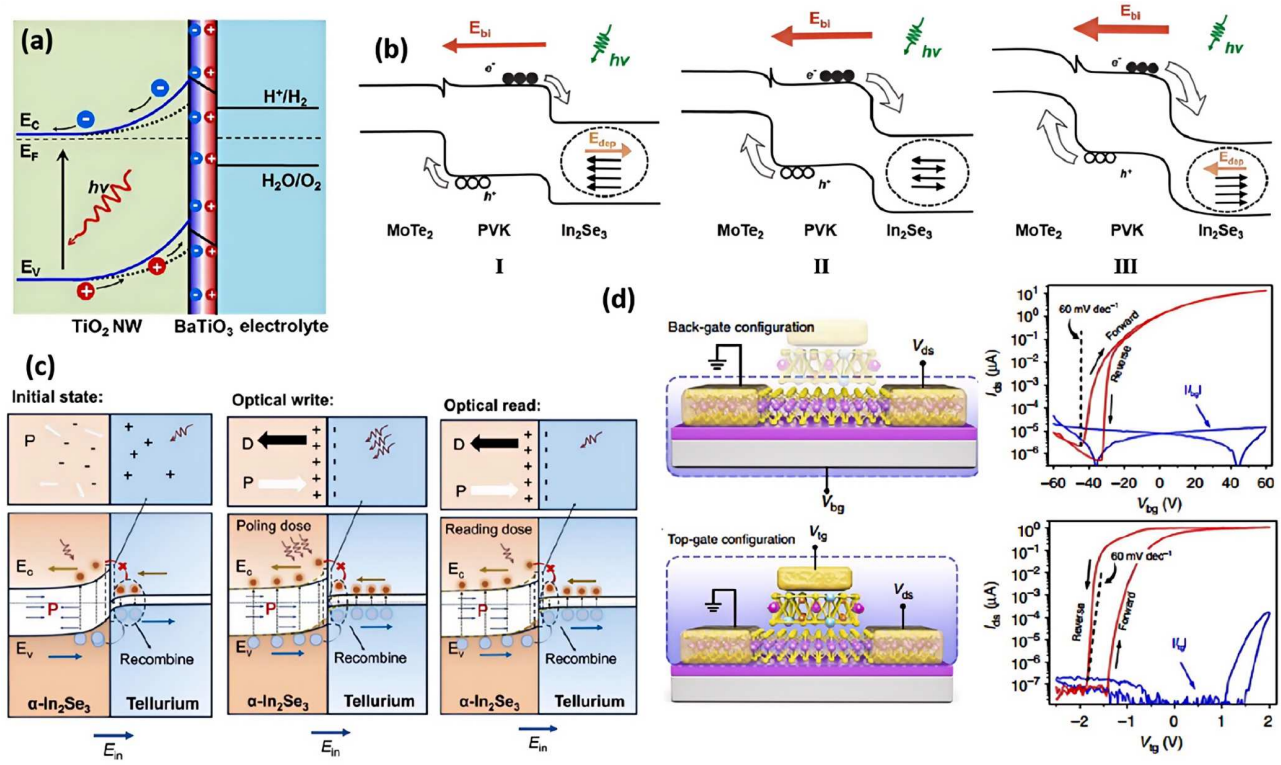

图 3 (网络版彩色)(a) 壳层中$BaTiO_3$自发极化诱导TiO_2能带向上弯曲[58]; (b) 异质结中三种极化状态下的能带图[63]; (c) 能带排列及光生载流子输运过程[39]; (d) CIPS/MoS_2范德华负电容场效应晶体管背栅与顶栅示意图及$I_{ds}-V_{bg}$和$I_{ds}-V_{tg}$曲线[66]

Figure 3 (Color online) (a) The spontaneous polarization in $BaTiO_3$ shell induced an upward band bending of TiO_2 core[58]; (b) energy band diagrams of the heterostructure at three α-In_2Se_3 polarization states[63]; (c) band alignment and the photogenerated carrier transport process[39]; (d) schematics of the characterization configuration for back-gate and top-gate measurements of CIPS/MoS_2 vdW NC-FETs and the curves of $I_{ds}-V_{bg}$ and $I_{ds}-V_{tg}$[66]

本征自发极化调节载流子的分布与迁移. 譬如, 早期的$SrRuO_3/BaTiO_3/ZnO/Ag$体系的研究中, 通过脉冲极化I–V扫描及PFM分析证实异质结中的极化翻转行为, 在异质界面处形成势垒, 可有效抑制光生载流子的复合并增强光电流[61]. 在FET中的MoS_2/PZT, 在负偏压诱导向下铁电极化作用下, 界面已俘获电子会释放进入MoS_2沟道(捕获过程), 这些进入电子会使MoS_2具有n型掺杂效应; 反之极化强度减弱, 电子捕获量减少, MoS_2沟道电流减小, 对应FET的关态[62]. P(VDF-TrFE)/$MoTe_2$体系利用PFM技术建立局域静电场实现非易失性掺杂(p型和n型), 即铁电场的反转引发周期性极化畴, 以此在沟道中建立可调谐p-n结[53]. 此外, 由$MoTe_2$/$(C_4H_9NH_3)_2(CH_3NH_3)_2Pb_3I_{10}$/α-$In_2Se_3$构建的铁电范德华异质体系中, 由$MoTe_2$和$(C_4H_9NH_3)_2(CH_3NH_3)_2Pb_3I_{10}$与α-$In_2Se_3$接触形成p-i-n异质结, 以此诱导从α-$In_2Se_3$指向$MoTe_2$的内建电场($E_{bi}$), 光生电子在$E_{bi}$作用下漂移至α-$In_2Se_3$层, 而空穴漂移至$MoTe_2$层, 电极收集后产生光伏特效应(图3(b))[63].

3.3 铁电场协同内建电场

半导体构建异质体系形成内建电场, 达到促进光生电子-空穴对的分离和传输的目的. 譬如, 在ZnO/PLZT体系中, 通过调节PLZT的极化状态实现内建电场调控, 即PLZT层向上极化时, 可以加快载流子的分离和输运. 因此, 铁电场和内建电场的协同效应可被证明是增强光电性能的切实可行的方法[64]. 譬如, 在$BaTiO_3$/ZnO叠层结构中, 在BTO薄膜自极化电场的调控下, ZnO薄膜中电子浓度的空间分布得以优化, 器件获得极低暗电流和14300的开/关比[65]. Zhang等人通过光诱导局域极化(LIPS)揭示了α-In_2Se_3/Te的异质体系中光电流的局域增强效应. 暗态时, α-In_2Se_3/Te之间的type-I型能带偏移形成的势垒会阻碍载流子输运, 尽管结区存在内建电场, 但α-In_2Se_3中无序偶极子排列会阻碍耗尽区电荷的提取. 当入射光聚焦于沟道中心, 会诱

导局域极化并促使光照区域内铁电畴定向有序排列, 因铁电畴与去极化场方向一致, 并于内建电场重合, 进而导致空穴向Te界面累积, 电子则在α-In_2Se_3界面累积, 这种电荷累积会显著降低界面能带弯曲程度, 减小势垒高度(图3(c))[39].

3.4 新型铁电调控效应

微型化是光电子器件发展必然趋势, 这一过程面临着一个重要挑战, 即降低供电电压以降低器件功耗, 负电容效应晶体管提供了一个解决新策略, 即在晶体管栅极中使用具有负电容的铁电薄膜层用于内部电压放大. 在基于$CuInP_2S_6$/MoS_2的负电容晶体管中, 漏电流变化7个数量级, 对应的亚阈值摆幅始终保持低于60 mV/decade(图3(d))[66]. 此外, 研究发现一些二维铁电材料从单层至块体维度都能保持强的压电性. 譬如, 研究人员发现α-In_2Se_3由偶极锁定效应产生的面内与面外的压电效应能够在任何方向上促进压电输出, 进而在柔性电子中表现出稳定的压电性能, 使其在自供电的柔性电子器件设计中展现出巨大潜力[67].

简言之, 铁电基光电探测器相较于传统光电探测器更具有性能优势(见表1). 在铁电材料集成光电探测器的研究中, 铁电场调控展现出显著的技术优势, 其核心机制源于铁电材料的极化特性. (1) 能带结构调控以优化载流子分离效率: 铁电材料通过调控半导体能带弯曲程度, 提高光生载流子的分离效率, 增加电荷收集效率; (2) 铁电畴的可编程性实现载流子输运的动态调控: 在铁电材料表面施加电场, 调控铁电畴的有序排列程度, 可构建调谐的p-n结, 铁电极化可逆特性使掺杂过程具有可控性和可重写性; (3) 铁电场与内建电场的协同效应, 增强光电响应: 在协同效应作用下加速载流子的输运, 且铁电畴与内建电场重合可降低界面势垒, 增强光电流响应. 相较于能带工程、界面工程等技术手段, 铁电场调控为铁电集成光电探测器性能优化提供了一种非破坏性且协调可控的方法.

4 总结与展望

综上, 相较于传统掺杂、缺陷工程与表面工程, 铁电材料集成光电探测系统已展现出显著优势. 本文通过详细阐述铁电材料结构与极化特性, 及其在光电探测中的应用, 如杂化钙钛矿铁电材料为高性能光电探测器开辟了新机遇, 高介电常数的超薄二维铁电材料用于晶体管沟道或栅极材料, 为器件小型化奠定基础, 兼具透明性与柔性的有机铁电材料为器件柔性化设计提供了材料基础. 本文通过讨论铁电光电集成混合系统在光电探测中的调控机制, 如铁电场有效调控光电半导体能带弯曲程度, 证实了铁电性调制界面能带的可能性, 通过编程铁电场产生局部静电场以灵活调控光电功能层中载流子输运. 此外, 铁电场与内建电场的协同效应也被证实是器件性能优化的有效设计策略. 光电探测器引入铁电材料的研究证实, 其可有效降低暗电流、拓宽响应波长、加快响应时间.

尽管研究人员已经对铁电材料及其特性进行了大量研究, 但其在光电探测系统中仍然面临诸多挑战. (1) 铁电材料会随着时间推移出现极化疲劳而导致性能退化, 这限制了集成器件稳定性和可靠性的需求. (2) 铁电材料减小至临界尺寸会引发晶体结构对称性变化, 导致铁电性减弱或消失, 因而器件性能与小型化的兼容性面临诸多挑战. (3) 良好的界面接触是影响器件性能的一个关键因素, 因而这对铁电材料与光电半导体的集成工艺提出了更高要求. 这些挑战凸显了铁

表 1 铁电集成光电探测器与传统光电探测器的参数

Table 1 Parameters of ferroelectric-integrated photodetectors and conventional photodetectors

光电探测器	类型/结构	波长(nm)	偏压(V)	*R*(A/W)	*D**(Jones)	上升/下降时间(ms)	开关比	文献
P(VDF-TFE)/MoS_2	铁电FET	635	5	2570	2.2×10^{12}	1.8/2	/	[29]
HZO/MoS_2	铁电FET	637	0.5	96.8	4.75×10^{14}	0.03	5×10^{5}	[52]
P(VDF-TFE)/$MoTe_2$	铁电FET	520	0	5	3×10^{12}	118/51.7	2×10^{7}	[53]
P(VDF-TFE)/InSe	铁电MSM	532	3	14250	1.63×10^{13}	0.6/1.2	10^{8}	[68]
MoS_2/SnO_2	p-n异质结	900	0	0.35	1.25×10^{11}	153/220	/	[69]
β-$(Al_{0.25}Ga_{0.75})_2O_3$/β-$Ga_2O_3$	MSM	254	5	4.12	9.26×10^{17}	320/100	2.16×10^{5}	[70]
Ag/Si/$Cs_3Bi_2I_9$/Au	MSM	450	3	/	3.9×10^{11}	0.0015/0.422	3000	[71]
ITO/PEDOT:PSS/ perovskite/PC71BM/Ag	异质结	460	0	0.41	7.23×10^{12}	0.000161/0.00191	5×10^{4}	[72]

电材料集成光电探测系统领域持续研发的重要性与必要性. 随着新型铁电材料以及新的铁电调控机制不断被研究, 铁电材料集成光电探测器也势必为高速信息处理、低功耗智能感知等领域的快速发展提供助力.

参考文献

1 De Luca G, Rossell M D, Schaab J, et al. Domain wall architecture in tetragonal ferroelectric thin films. Adv Mater, 2017, 29: 1605145
2 Bai C, Wu G, Yang J, et al. 2D materials-based photodetectors combined with ferroelectrics. Nanotechnology, 2024, 35: 352001
3 Liu J, Su L, Zhang X, et al. Ferroelectric–optoelectronic hybrid system for photodetection. Small Methods, 2024, 8: 2300319
4 Su L, Li Z, Cao F, et al. Tailoring the interface assembly of mesoporous TiO_2 on BTO film toward high-performance UV photodetectors. J Mater Chem C, 2022, 10: 9035–9043
5 Liu Y, Zhang H, Shapovalov K, et al. Vortices and antivortices in antiferroelectric $PbZrO_3$. Nat Mater, 2025, 24: 1359–1363
6 Zhao S, Shen S S, Han L, et al. Ferroelectric perovskite $PbTiO_3$ for advanced photocatalysis. Rare Met, 2024, 43: 4038–4055
7 Lipatov A, Sharma P, Gruverman A, et al. Optoelectrical molybdenum disulfide (MoS_2)—Ferroelectric memories. ACS Nano, 2015, 9: 8089–8098
8 Li X, Chen S, Liu P F, et al. Evidence for ferroelectricity of all-inorganic perovskite $CsPbBr_3$ quantum dots. J Am Chem Soc, 2020, 142: 3316–3320
9 Zhang W, Hong M, Luo J. Halide double perovskite ferroelectrics. Angew Chem Int Ed, 2020, 59: 9305–9308
10 Wang J, Liu Y, Han S, et al. Ultrasensitive polarized-light photodetectors based on 2D hybrid perovskite ferroelectric crystals with a low detection limit. Sci Bull, 2021, 66: 158–163
11 Xiao J, Zhu H, Wang Y, et al. Intrinsic two-dimensional ferroelectricity with dipole locking. Phys Rev Lett, 2018, 120: 227601
12 Liu J, Han W, Hong E, et al. In-memory sensing and logic processing in negative capacitance phototransistors. Adv Funct Mater, 2025, 35: 2425350
13 Song C, Kim D, Lee S, et al. Ferroelectric 2D SnS_2 analog synaptic FET. Adv Sci, 2024, 11: 2308588
14 Leiserson C E, Thompson N C, Emer J S, et al. There's plenty of room at the top: what will drive computer performance after Moore's law? Science, 2020, 368: eaam9744
15 Chang K, Liu J, Lin H, et al. Discovery of robust in-plane ferroelectricity in atomic-thick SnTe. Science, 2016, 353: 274–278
16 Liu F, You L, Seyler K L, et al. Room-temperature ferroelectricity in $CuInP_2S_6$ ultrathin flakes. Nat Commun, 2016, 7: 12357
17 Belianinov A, He Q, Dziaugys A, et al. $CuInP_2S_6$ room temperature layered ferroelectric. Nano Lett, 2015, 15: 3808–3814
18 Ding W, Zhu J, Wang Z, et al. Prediction of intrinsic two-dimensional ferroelectrics in In_2Se_3 and other III_2-VI_3 van der Waals materials. Nat Commun, 2017, 8: 14956
19 Yang J, Wang F, Guo J, et al. Ultrasensitive ferroelectric semiconductor phototransistors for photon-level detection. Adv Funct Mater, 2022, 32: 2205468
20 Wang Y, Cai Y, Wang F, et al. A three-dimensional neuromorphic photosensor array for nonvolatile in-sensor computing. Nano Lett, 2023, 23: 4524–4532
21 Li L, Wu M. Binary compound bilayer and multilayer with vertical polarizations: two-dimensional ferroelectrics, multiferroics, and nanogenerators. ACS Nano, 2017, 11: 6382–6388
22 Fei Z, Zhao W, Palomaki T A, et al. Ferroelectric switching of a two-dimensional metal. Nature, 2018, 560: 336–339
23 Vizner Stern M, Waschitz Y, Cao W, et al. Interfacial ferroelectricity by van der Waals sliding. Science, 2021, 372: 1462–1466
24 Qian X X, Chen X, Zhu L, et al. Fluoropolymer ferroelectrics: multifunctional platform for polar-structured energy conversion. Science, 2023, 380: 0902
25 Bergman Jr J G, McFee J H, Crane G R. Pyroelectricity and optical second harmonic generation in polyvinylidene fluoride films. Appl Phys Lett, 1971, 18: 203–205
26 Stadlober B, Zirkl M, Irimia-Vladu M. Route towards sustainable smart sensors: ferroelectric polyvinylidene fluoride-based materials and their integration in flexible electronics. Chem Soc Rev, 2019, 48: 1787–1825
27 Legrand J F. Structure and ferroelectric properties of P(VDF-TrFE) copolymers. Ferroelectrics, 1989, 91: 303–317
28 Li B, Cai C, Liu Y, et al. Ultrasensitive mechanical/thermal response of a P(VDF-TrFE) sensor with a tailored network interconnection interface. Nat Commun, 2023, 14: 4000
29 Wang X, Wang P, Wang J, et al. Ultrasensitive and broadband MoS_2 photodetector driven by ferroelectrics. Adv Mater, 2015, 27: 6575–6581
30 Schroeder U, Park M H, Mikolajick T, et al. The fundamentals and applications of ferroelectric HfO_2. Nat Rev Mater, 2022, 7: 653–669
31 Hoffmann M, Fengler F P G, Herzig M, et al. Unveiling the double-well energy landscape in a ferroelectric layer. Nature, 2019, 565: 464–467
32 Kim S, Kim H, Kwon K, et al. Stacked nanosheet gate-all-around morphotropic phase boundary field-effect transistors. Adv Sci, 2025, 12:

2413090
33 Zhang Y, Zhu Q, Tian B, et al. New-generation ferroelectric AlScN materials. Nano-Micro Lett, 2024, 16: 227
34 Fichtner S, Wolff N, Lofink F, et al. AlScN: a III-V semiconductor based ferroelectric. J Appl Phys, 2019, 125: 114101
35 Dinh D V, Lähnemann J, Geelhaar L, et al. Lattice parameters of $Sc_xAl_{1-x}N$ layers grown on GaN(0001) by plasma-assisted molecular beam epitaxy. Appl Phys Lett, 2023, 122: 152101
36 Monserrat B, Bennett J W, Rabe K M, et al. Antiferroelectric topological insulators in orthorhombic AMgBi compounds (A = Li, Na, K). Phys Rev Lett, 2017, 119: 036802
37 Jiang Y, Parsonnet E, Qualls A, et al. Enabling ultra-low-voltage switching in $BaTiO_3$. Nat Mater, 2022, 21: 779–785
38 Tan H, Castro G, Lyu J, et al. Control of up-to-down/down-to-up light-induced ferroelectric polarization reversal. Mater Horiz, 2022, 9: 2345–2352
39 Zhang K, Li H, Mu H, et al. Spatially resolved light-induced ferroelectric polarization in α-In_2Se_3/Te heterojunctions. Adv Mater, 2024, 36: 2405233
40 Xu X, Wang T, Chen P, et al. Femtosecond laser writing of lithium niobate ferroelectric nanodomains. Nature, 2022, 609: 496–501
41 Xu D D, Ma R R, Fu A P, et al. Ion adsorption-induced reversible polarization switching of a van der Waals layered ferroelectric. Nat Commun, 2021, 12: 655
42 Lu H, Bark C W, Esque de los Ojos D, et al. Mechanical writing of ferroelectric polarization. Science, 2012, 336: 59–61
43 Wu D, Li W, Liu H, et al. Universal strategy for improving perovskite photodiode performance: interfacial built-in electric field manipulated by unintentional doping. Adv Sci, 2021, 8: 2101729
44 Tran V, Soklaski R, Liang Y, et al. Layer-controlled band gap and anisotropic excitons in few-layer black phosphorus. Phys Rev B, 2014, 89: 235319
45 Yan T, Cai S, Hu Z, et al. Ultrafast speed, dark current suppression, and self-powered enhancement in TiO_2-based ultraviolet photodetectors by organic layers and Ag nanowires regulation. J Phys Chem Lett, 2021, 12: 9912–9918
46 Zhang Y, He X. WS_2/graphene/MoS_2 sandwich van der Waals heterojunction for fast-response photodetectors. ACS Appl Mater Interfaces, 2025, 17: 1826–1833
47 Chen Y, Wang X, Huang L, et al. Ferroelectric-tuned van der Waals heterojunction with band alignment evolution. Nat Commun, 2021, 12: 4030
48 Lv L, Zhuge F, Xie F, et al. Reconfigurable two-dimensional optoelectronic devices enabled by local ferroelectric polarization. Nat Commun, 2019, 10: 3331
49 Guo J, Liu Y, Lin Y, et al. Simulation of tuning graphene plasmonic behaviors by ferroelectric domains for self-driven infrared photodetector applications. Nanoscale, 2019, 11: 20868–20875
50 Tan W, Shih W, Chen Y F. A highly sensitive graphene-organic hybrid photodetector with a piezoelectric substrate. Adv Funct Mater, 2014, 24: 6818–6825
51 Huang X, Wang Q, Song K, et al. In-plane bulk photovoltaic effect in a $MoSe_2$/$NbOI_2$ heterojunction for efficient polarization-sensitive self-powered photodetection. Nano Lett, 2025, 25: 1495–1503
52 Tu L, Cao R, Wang X, et al. Ultrasensitive negative capacitance phototransistors. Nat Commun, 2020, 11: 101
53 Wu G, Wang X, Chen Y, et al. $MoTe_2$ p–n homojunctions defined by ferroelectric polarization. Adv Mater, 2020, 32: 1907937
54 Wu G, Zhang X, Feng G, et al. Ferroelectric-defined reconfigurable homojunctions for in-memory sensing and computing. Nat Mater, 2023, 22: 1499–1506
55 Si M, Saha A K, Gao S, et al. A ferroelectric semiconductor field-effect transistor. Nat Electron, 2019, 2: 580–586
56 Wang S, Li L, Weng W, et al. Trilayered lead chloride perovskite ferroelectric affording self-powered visible-blind ultraviolet photodetection with large zero-bias photocurrent. J Am Chem Soc, 2020, 142: 55–59
57 Hou P, Lv Y, Zhong X, et al. α-In_2Se_3 nanoflakes modulated by ferroelectric polarization and Pt nanodots for photodetection. ACS Appl Nano Mater, 2019, 2: 4443–4450
58 Yang W, Yu Y, Starr M B, et al. Ferroelectric polarization-enhanced photoelectrochemical water splitting in TiO_2–$BaTiO_3$ core–shell nanowire photoanodes. Nano Lett, 2015, 15: 7574–7580
59 Su L, Yan T, Liu X, et al. A tunable polarization field for enhanced performance of flexible $BaTiO_3$@TiO_2 nanofiber photodetector by suppressing dark current to pA level. Adv Funct Mater, 2023, 33: 2214533
60 Li L, Zhang Y, Wang R, et al. Ferroelectricity-induced performance enhancement of V-doped ZnO/Si photodetector by direct energy band modulation. Nano Energy, 2019, 65: 104046
61 Yu S, Wang S, Lu M, et al. A metal-insulator transition study of VO_2 thin films grown on sapphire substrates. J Appl Phys, 2017, 122: 235102
62 Sun Y, Xie D, Zhang X, et al. Temperature-dependent transport and hysteretic behaviors induced by interfacial states in MoS_2 field-effect transistors with lead-zirconate-titanate ferroelectric gating. Nanotechnology, 2017, 28: 045204
63 Yan T, Liu F, Wang Y, et al. A ferroelectric p–i–n heterostructure for highly enhanced short-circuit current density and self-powered

photodetection. Adv Elect Mater, 2022, 8: 2101385
64 Chen J, Wang Z, He H, et al. High-performance self-powered ultraviolet photodetector based on coupled ferroelectric depolarization field and heterojunction built-in potential. Adv Elect Mater, 2021, 7: 2100717
65 Guo R, Shen L, Wang H, et al. Tailoring self-polarization of $BaTiO_3$ thin films by interface engineering and flexoelectric effect. Adv Mater Inter, 2016, 3: 1600737
66 Wang X, Yu P, Lei Z, et al. Van der Waals negative capacitance transistors. Nat Commun, 2019, 10: 3037
67 Dai M, Wang Z, Wang F, et al. Two-dimensional van der Waals materials with aligned in-plane polarization and large piezoelectric effect for self-powered piezoelectric sensors. Nano Lett, 2019, 19: 5410–5416
68 Liu L, Wu L, Wang A, et al. Ferroelectric-gated InSe photodetectors with high on/off ratios and photoresponsivity. Nano Lett, 2020, 20: 6666–6673
69 Augustine P, Kumawat K L, Singh D K, et al. MoS_2/SnO_2 heterojunction-based self-powered photodetector. Appl Phys Lett, 2022, 120: 181106
70 Yue J Y, Ji X Q, Li S, et al. Dramatic reduction in dark current of β-Ga_2O_3 ultraviolet photodectors via β-$(Al_{0.25}Ga_{0.75})_2O_3$ surface passivation. Chin Phys B, 2023, 32: 016701
71 Li Z, Liu X, Zuo C, et al. Supersaturation-controlled growth of monolithically integrated lead-free halide perovskite single-crystalline thin film for high-sensitivity photodetectors. Adv Mater, 2021, 33: 2103010
72 Zhang X, Li Z, Hong E, et al. Effective dual cation release in quasi-2D perovskites for ultrafast UV light-powered imaging. Adv Mater, 2025, 37: 2412014

Summary for “铁电材料集成光电探测系统的研究进展”

Research progress on ferroelectric material-integrated optoelectronic detection systems

Zhiying Wang, Yu Pan, Xianyu Jin, Li Su* & Dawei Zhang

Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China
* Corresponding author, E-mail: lisu@usst.edu.cn

The optical communication system is an important part of the front-end information collection of the Internet of Things, and the photodetectors (PDs) are the key component of the system. Currently, researchers continue to explore the development path of high-performance PDs by using structural design, energy band engineering, and other technologies. However, devices still face challenges such as high dark current and low light absorption efficiency. The performance of PDs depends not only on the device structures but also on optoelectronic materials. Therefore, the development of novel optoelectronic materials and modulation mechanisms is imperative. Ferroelectric materials have attracted more and more attention because of their advantages, such as controllable polarization coordination, simple structure, and stable response characteristics. Spontaneous polarization occurs in ferroelectric materials due to the breaking of crystal symmetry. In this review, the structural and polarization characteristics of ferroelectric materials and their applications in photodetection are described in detail: the hybrid perovskite ferroelectrics open up new opportunities for high-performance PDs. Ultrathin two-dimensional (2D) ferroelectrics with high dielectric constants are used as channel or gate materials in transistors, laying the foundation for device miniaturization. Organic ferroelectric materials with both transparency and flexibility provide the material basis for the flexible device design. Moreover, the control mechanisms of ferroelectric-optoelectronic hybrid systems in photodetection are discussed and summarized. Ferroelectric fields effectively regulate the band bending of optoelectronic semiconductors, which confirms the possibility of ferroelectricity-modulating the interface band. A local electrostatic field generated by programmed ferroelectric domains flexibly controls carrier transport in optoelectronic functional layers. In addition, the synergistic effect of ferroelectric fields and built-in electric fields has also proved to be an effective design strategy for optimizing device performance. The introduction of ferroelectric materials into photodetectors has been proven to be effective in reducing the dark current, broadening the response wavelength, and speeding up the response time. Ferroelectric material-integrated PDs have shown significant advantages. Despite extensive research on ferroelectric materials and their properties, challenges remain in their application to photodetection systems. Polarization fatigue in ferroelectric materials over time leads to performance degradation, limiting the stability and reliability of integrated devices. Reducing ferroelectric materials to critical dimensions causes crystal structure symmetry changes, weakening or eliminating ferroelectricity, thus challenging the compatibility between device performance and miniaturization. Good interface contact is a key factor affecting device performance, imposing higher requirements on the integration process of ferroelectric materials and optoelectronic semiconductors. These challenges highlight the importance and necessity of continuous research and development in the field of ferroelectric-integrated photodetection systems. With the ongoing discovery of novel ferroelectric materials and modulation mechanisms, ferroelectric-integrated PDs are poised to drive rapid advancements in high-speed information processing, low-power intelligent sensing, and other cutting-edge fields.

ferroelectric materials, ferroelectric field, ferroelectric integrated photodetector, ferroelectric field control

doi: 10.1360/CSB-2025-0492