中国科学: 技术科学 2023 年 第 53 卷 第 6 期: 892 ~ 901
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述 北京纳米能源与系统研究所专辑

基于二维材料的压电光电子学器件

贾萌萌[1,2†], 郭鹏文[3†], 翟俊宜[1,2*], 王中林[1,2,4*]

1. 中国科学院北京纳米能源与系统研究所, 北京 101400;
2. 中国科学院大学纳米科学与工程学院, 北京 100049;
3. 清华大学集成电路学院, 北京 100084;
4. 佐治亚理工学院材料科学与工程学院, 亚特兰大 30332-0245, 美国
† 同等贡献
* E-mail: jyzhai@binn.cas.cn; zlwang@binn.cas.cn

收稿日期: 2023-04-18; 接受日期: 2023-05-08; 网络版发表日期: 2023-05-25

摘要 二维(2D)材料由于原子级超薄、可调带隙和优异的光电性质, 在柔性光电子学领域有着巨大的潜力. 利用应变诱导的压电势或压电极化电荷可以调控二维材料界面载流子的传输和光电过程, 这种将压电、半导体特性、光激发三者耦合产生的压电光电子学效应推动了新型二维材料光电器件的开发, 特别是压电光电子学增强的光电探测、光电化学、气体传感和太阳能电池等方向. 本文简要综述了近年来二维材料在压电光电子学领域取得的研究进展, 并对这一新兴领域未来的挑战和科学突破进行了展望.

关键词 二维材料, 压电光电子学, 压电势, 柔性光电子学

1 引言

自2004年单层石墨烯被成功剥离以来, 大量二维材料被广泛关注并研究, 包括过渡金属二硫属物(TMDCs)、黑磷、氮化硼等. 由于量子限域效应, 这些原子薄层状材料表现出的可调带隙和独特的光电性能[1], 尤其是二维材料中压电性的发现, 成为新一代多功能电子和光电子器件研究的前沿和热点. 某些二维层状材料从块体减薄至原子层厚度时, 会由中心对称变为非中心对称结构, 这种对称性破缺使其表现出压电性. 2014年, Hone和Wang团队[2]从奇数层二硫化钼(MoS_2)薄片中测试出压电电压和输出电流并将其应用于纳米发电机, 证实了二维MoS_2中压电电子学效应的存在. 此后二维材料的压电特性被广泛计算和实验研究, 开启了二维压电电子学领域这一重要分支, 并为继续探索压电性与材料的其他特殊性质之间的耦合效应提供了独特的平台[3].

王中林团队[4,5]在2010年研究氧化锌纳米线中压电效应与光激发之间的局部耦合效应时, 提出压电光电子学效应这一术语, 并于2016年将这一效应应用到基于单层MoS_2的光电探测器上[6], 创新地利用了机械行为直接控制二维器件的光电性能. 压电光电子学效应是利用应变诱导的压电电势来调控金属-半导体(M-S)之间肖特基接触界面或p-n结处载流子的产生、分离、传输和复合过程, 从而进一步提高光电器件的性能. 半导体输运、压电效应和光激发三者耦合产生了

引用格式: 贾萌萌, 郭鹏文, 翟俊宜, 等. 基于二维材料的压电光电子学器件. 中国科学: 技术科学, 2023, 53: 892–901
Jia M M, Guo P W, Zhai J Y, et al. Piezo-phototronic devices based on two-dimensional materials (in Chinese). Sci Sin Tech, 2023, 53: 892–901, doi: 10.1360/SST-2023-0144

© 2023 《中国科学》杂志社

压电光电子学这一新兴研究领域(图1(a)). 之前用来制备压电光电子学器件的材料主要集中在具有一维纳米线和纳米带形态的纤锌矿结构半导体特别是氧化锌、氮化镓等, 将压电光电子学的概念扩展到二维材料会进一步推动该领域相关理论研究和技术应用. 基于二维材料的压电光电子学器件的原理是以应变诱导的电荷作为“门”电压调控二维压电半导体局部界面的载流子浓度和分布或者能带结构, 从而实现机械信号可调的光电性能, 这为主动式柔性光电子学的实现开拓了新的道路. 二维材料的晶体结构相对于三维材料来说更为简单, 有助于通过第一性原理模拟来研究压电材料结构与性质之间的关系. 一些二维材料比纤锌矿结构表现出更强的压电耦合, 其压电系数的跨度超过一个数量级. 并且二维材料中某些有趣性质例如铁磁性、拓扑绝缘体或量子自旋霍尔效应和压电效应的结合仍未被充分探索. 此外, 二维材料更容易实现与标准硅半导体加工工艺的兼容, 从而带动了压电光电子学器件集成阵列的实用化发展进程.

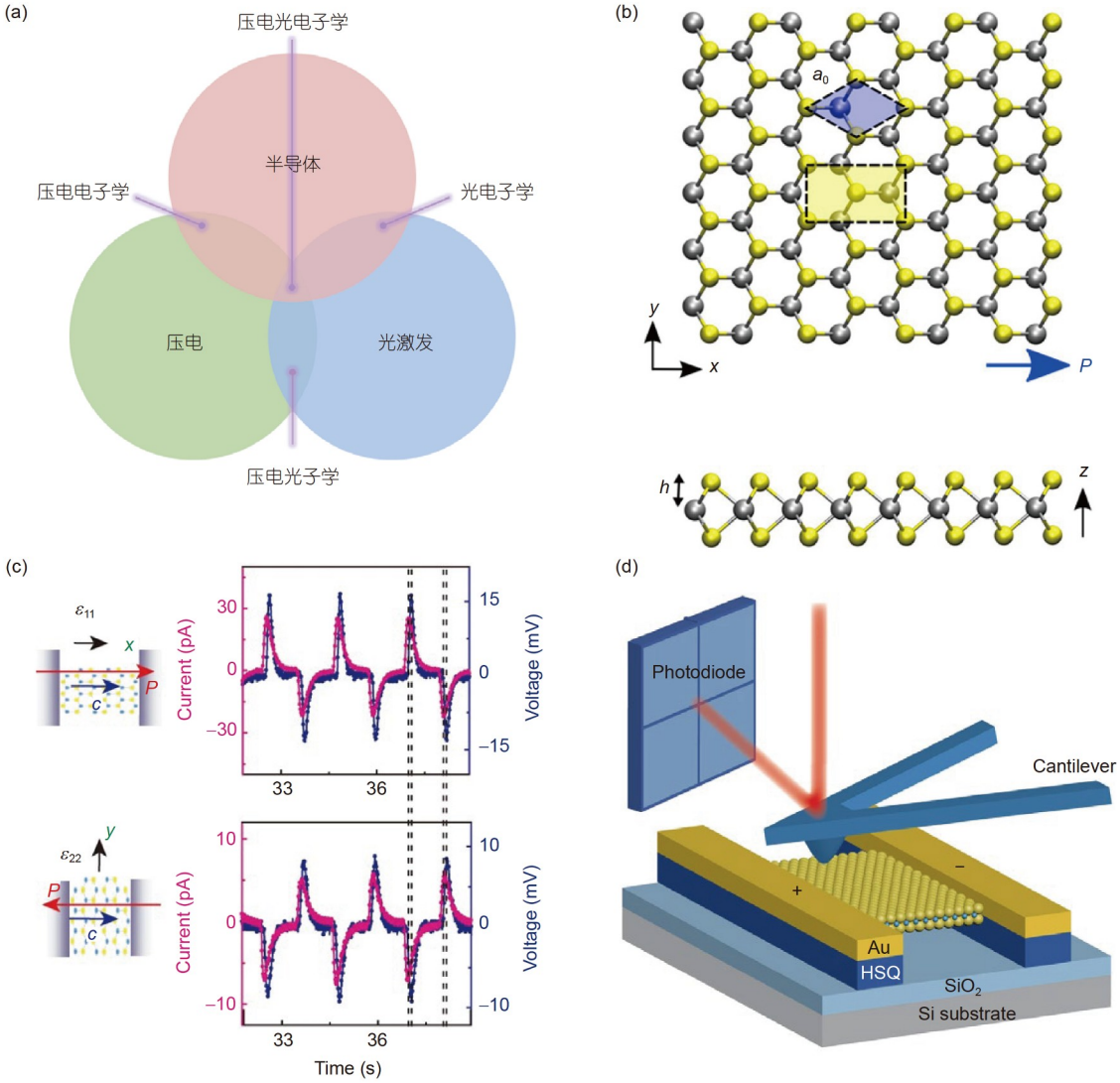


图 1　压电电子学效应. (a) 压电、光激发和半导体之间的三相耦合; (b) 2H-MoS_2的俯视图和侧视图[7]; (c) 单层MoS_2纳米发电机沿扶手椅和锯齿形方向的压电输出[2]; (d) 量化悬空MoS_2薄片的压电性能和测量压电系数的实验示意图[8]

Figure 1　Piezotronic effect. (a) Schematic of three-way coupling among piezoelectricity, photoexcitation and semiconductor. (b) Top view and side view of the 2H-MoS_2 [7]. Copyright©2012, American Chemical Society. (c) Piezoelectric outputs along armchair and zigzag directions of monolayer MoS_2 nanogenerators [2]. Copyright©2014, Springer Nature Limited. (d) Schematic of the experimental setup for quantifying piezoelectric properties and measuring piezoelectric coefficients of a free-standing MoS_2 film [8]. Copyright©2014, Springer Nature Limited.

近年来, 基于二维材料的压电光电子效应已被广泛研究, 并延伸出一系列在光电探测器、发光二极管、太阳能电池以及光电化学等领域的基础应用. 本文重点介绍了压电光电子学的基本原理以及压电光电子学效应调制的基于二维材料光电探测器、光电催化、气体传感器、太阳能电池的最新研究进展. 此外我们对这一新兴领域的未来挑战和科学突破进行了展望.

2 压电光电子学效应的调控机理

2.1 二维材料的压电性

随着材料合成在分子水平取得重要发展, 二维材料中的压电性越来越受到关注. 六方二维半导体材料例如TMDCs(MX_2, M=Mo, W; X=S, Se, Te), 由于非中心对称结构具有本征压电性, 是低维压电材料的理想候选者. 以MoS_2为例, 当厚度减薄至单层时, 块体2H相MoS_2的D_{6h}点群对称性降低到D_{3h}点群. 从图1(b)可以看出, 单层MoS_2沿面内(d_{11})方向没有对称中心, 具有压电性[7]. 当发生机械形变时, Mo^{4+}和S^{2-}离子之间的相对位移导致材料中出现压电极化电荷. 基于单层MoS_2压电效应制备的纳米发电机通过实验证实了二维材料压电性的存在, 由于MoS_2晶体中zigzag和arm-chair方向的压电系数不同, 导致了压电输出的差异性(图1(c))[2]. 随后, Zhu等人[8]通过纳米压痕法和应用横向面内电场计算出MoS_2薄片的压电系数(图1(d)). 在这些开创性研究工作的基础上, 新型二维材料的压电性得到了广泛的关注和探索. 一些单层第III主族硫属化物(MX, M=Ga, In; X=S, Se)属于D_{3h}点群, 通过第一性原理计算, 预测其也具有本征压电性.

2.2 压电光电子学效应对金属-半导体接触的影响

金属和半导体之间形成肖特基接触的器件是压电光电子学的研究热点之一. 当金属和半导体接触时, 在结区发生了电荷的重新分配, 两边费米能级对齐达到热平衡状态, 并在M-S界面形成肖特基势垒. 对于具有良好压电性的半导体, 半导体一侧附近的压电电荷可以有效地调制肖特基势垒高度(SBH), 从而调节器件的电学输运特性. 以n型半导体在反向偏置电压下的肖特基接触为例(忽略表面态), 如果其+c轴朝向金属, 当受到压缩应变时界面处诱导的负压电电荷会使得SBH增大和耗尽区变宽, 能带向上弯曲. 当能量超过半导体带隙的光照射在M-S界面上时, 会在接触面上产生光生载流子. 升高的能带会增强光生电子-空穴对的分离和载流子的移动和积累(图2(a)). 然而当应变进一步增大时, 肖特基结处感应负极化电荷密度足够大时, 向上明显弯曲的价带会产生空穴传输的新的势垒, 同样也会抑制载流子对的分离, 降低器件的光响应性能[9]. 如果器件受到拉伸应变, 感应的正极化电荷会使得SBH降低以及耗尽区变窄, 降低的能带会抑制电子-空穴对的分离和载流子的积累(图2(b)).

2.3 压电光电子学效应对p-n结的影响

与应变诱导的压电电荷改变M-S接触界面的SBH机理类似, p-n结处的能带也可以由压电电荷来调制, 因此p-n结也是压电光电子学中的常用结构之一. 处于平衡态的p-n结界面处会产生内建电场和电荷耗尽区, 光生载流子在内建电场的作用下通过耗尽区传输到n型和p型区域, 产生光电流. 以n型压电半导体(其+c轴方向指向p型区域)组成的p-n结为例, 空间电荷区可以被未屏蔽的压电电荷充分调节. 光照时p-n结会产生电子-空穴对, 当沿c轴对p-n结施加压缩应力时, 引入的负压电电荷会使得空间电荷区变宽并向n型区域一侧移动, 降低了电荷注入到接触区有效串联电阻. 并且压应力导致的局部能带凸起会显著增强光生载流子对的分离和传输, 从而导致光电流增加(图2(c)). 相反, 拉伸应变诱导的正压电电荷则会使得空间电荷区向p型区域移动并扩展, 增加了电荷注入的有效串联电阻. 同时局部降低的能带会捕获载流子, 很大程度阻碍了光生载流子的分离, 从而导致光电流减小(图2(d))[10].

3 基于二维材料的压电光电子学研究进展

3.1 光电探测

光电探测器是通过将吸收的光子能量转换为电信号来测量光子通量或光功率的器件. 对于肖特基或p-n结型光电探测器, 界面处能带结构的精准调控决定了器件的光电性能. 近年来, 二维层状半导体由于带隙可调、高迁移率和优越的机械性能, 广泛应用于光电子、柔性器件等领域. 传统基于二维材料的界面调控通常通过硬质衬底上施加静电偏压实现. 然而, 当制备柔性光电器件时, 复杂制造工艺(如制备高质量的栅

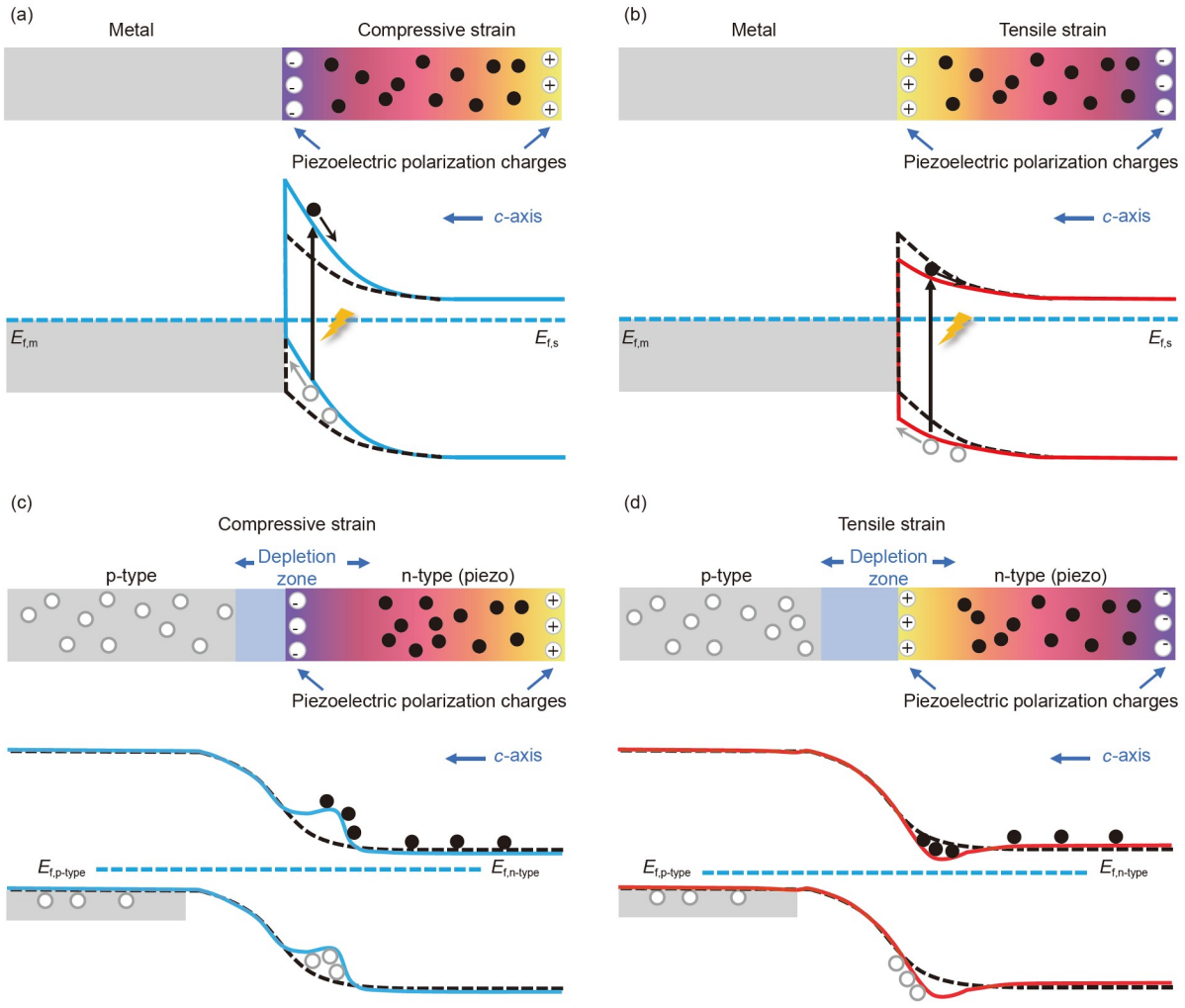


图 2　金属-半导体肖特基接触界面和p-n结界面的压电光电子学效应. 金属与半导体之间肖特基接触在压缩应变(a)和拉伸应变(b)下的能带图. p-n结在压缩应变(c)和拉伸应变(d)下的能带图. 虚线和实线分别代表无应变和施加外部应变下的能带图[11]

Figure 2　Piezo-phototronic effect on a Schottky contacted metal-semiconductor interface and a p-n junction. Energy band diagrams of a Schottky contact between metal and semiconductor under (a) compressive and (b) tensile strain conditions. Energy band diagrams of a p-n junction under (c) compressive and (d) tensile strain conditions. The dashed and solid lines represent band edges without and with external strain applied, respectively [11]. Reproduced under the terms of the CC-BY license.

介质层)的引入和界面态的存在可能会降低电学性能. 由于许多单原子层的二维材料具有本征压电性, 因此压电光电子学效应可以作为界面调控的新型方法. 2016年, Wu等人[6]报道了基于压电光电子学效应的单原子层MoS_2基柔性光电探测器(图3(a)), 利用金属-MoS_2界面产生的压电极化电荷调制光生载流子的分离和输运, 实现了应变对两端光电器件的调控. 在−0.38%压缩应变和3.4 μW cm^{-2}光强下实现了单层MoS_2光电晶体管的最大光响应度(2.3×10^4 A W^{-1}), 比之前报道的最高水平提高了26倍. 之后, Zhai研究组[12]利用化学气相沉积(CVD)法生长的单层n型MoS_2和p型CuO薄膜制备了柔性异质结光电探测器, 证明了压电光电子学效应在p-n结器件中的应用潜力. 当沿着Mo–S键方向对MoS_2施加应变时, 压电势对n-MoS_2/p-CuO异质结界面的能带结构进行调控, 提高光生载流子对的分离效率, 为优化二维材料异质结的光电性能提供了新的策略. 其中拉伸应变为0.65%时异质结对532 nm激光的响应电流比无应变时提高了27倍, 探测率高达3.27×10^8 Jones(图3(b)). 类似的, 2018年, Lin等人[13]制备了基于n-MoS_2/p-WSe_2全二维范德瓦尔斯异

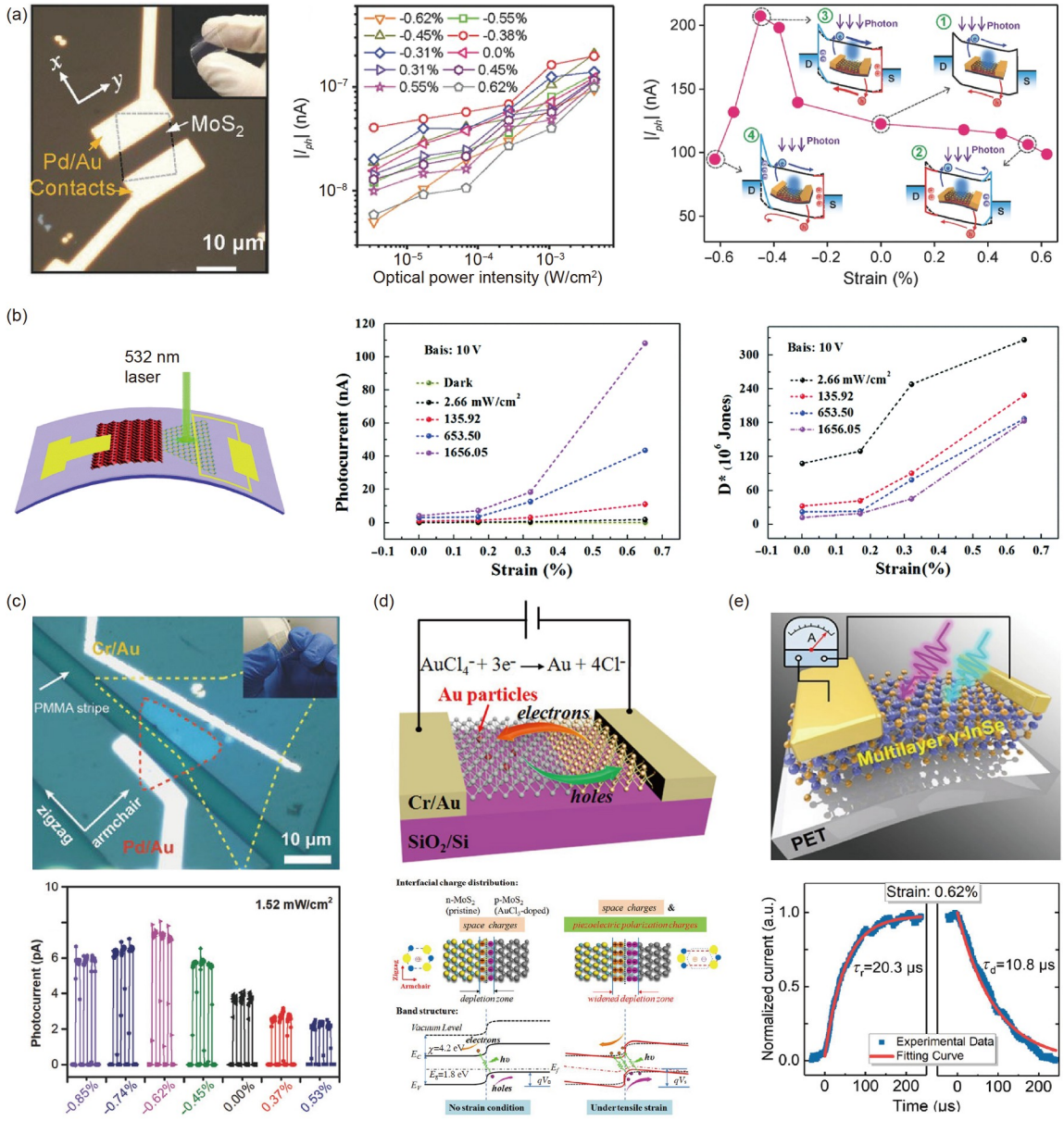


图 3 压电光电子学效应调制的光电探测器. (a) 压电光电子学效应通过调控M-S肖特基接触的势垒高度, 增强单层MoS_2基柔性光探测器的光响应[6]; (b) 压电光电子学效应增强单层n-MoS_2/p-CuO薄膜异质结柔性可见光光电探测器的光电流和探测率[12]; (c) 压电光电子学效应增强基于n-MoS_2/p-WSe_2范德瓦尔斯异质结光电二极管的光电流[13]; (d) 压电光电子学效应增强单层MoS_2同质p-n结的光电性能[14]; (e) 压电光电子学效应提升多层γ-InSe柔性自驱动光电探测器的响应速度[15]

Figure 3 Photodetectors modulated by piezo-phototronic effect. (a) Piezo-phototronic effect enhanced optical response of single-layer MoS_2-based flexible photodetectors by adjusting the barrier height of M-S Schottky contact [6]. Copyright©2016, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. (b) Piezo-phototronic effect enhanced photocurrent and detection sensitivity of single-layer n-MoS_2/p-CuO thin films heterojunction flexible visible photodetectors [12]. Copyright©2017, Royal Society of Chemistry. (c) Piezo-phototronic effect enhanced photocurrent of n-MoS_2/p-WSe_2 van der Waals heterostructure photodiodes [13]. Copyright©2018, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. (d) Piezo-phototronic effect enhanced photoelectric property of monolayer MoS_2 homogeneous p-n junction [14]. Copyright©2018, IOP Publishing. (e) Piezo-phototronic effect enhanced the response speed of flexible self-powered photodetectors based on multilayer γ-InSe [15]. Copyright©2019, American Chemical Society.

质结光电二极管, 单层MoS_2的压电极化电荷可以调节异质结界面的局部能带倾斜, 促进载流子对的分离和输运. 在532 nm激光照射(光功率密度为1.52 mW cm^{-2})和零偏压下, 引入−0.62%压应变使光响应度提高了

86%(图3(c)). 由于同质结的连续能带结构和更低的电阻导电路径, 为压电势调制提供了更高效的界面势垒, 因此二维同质结更适合应用于压电光电子学效应增强的光电探测器. 2018年, Zhai研究组[14]通过有选择性的部分化学掺杂制备了单层MoS_2横向同质p-n结, 利用压电光电子学效应调制p-n结界面处的势垒高度和耗尽区宽度实现了光电性能的显著增强(图3(d)). 当施加0.51%拉伸应变时, 光响应度和探测率分别达到1162 A W^{-1}和1.72×10^{12} Jones, 与无应变状态相比分别提高了619%和319%. 目前受限于大多数二维半导体仅在奇数层具有压电性, 特别是单层, 其光学吸收较弱, 器件的光电转换效率较差, 限制了柔性压电光电器件的实际应用. 2019年, Dai等人[15]利用二维γ-InSe奇偶层均具有非中心对称的特性及其优异的光电性能, 制备了基于多层InSe的高性能自驱动光电探测器(图3(e)). 当拉伸应变为0.62%时, 光电探测器的响应度提高了696%. 同时由于压电效应增强了内建电场, 提高了电子的传输速度, 因此响应时间从222 μs下降到20 μs, 且器件在6个月内均表现出良好的可靠性和稳定性, 为开发下一代高性能二维压电光电子器件提供了理想的途径.

3.2　光电化学

利用光催化或光电催化裂解水制氢和降解有机污染物被认为是当前能源可持续发展和环境整治最有前景的方法. 催化过程中光生载流子在半导体表面的复合和捕获是抑制光催化性能的重要因素. 施加应变和光照时, 应变诱导的内建电场和催化剂的能带弯曲可以持续促进载流子的分离. 同时对光催化剂界面能带结构的调制同样可以影响载流子的传输, 最终影响光催化性能[16]. 二维少层MoS_2同时具有压电性和半导体特性, 当打破其层间作用力暴露出更多的边缘活性位点时可以提高催化性能, 因此可以作为一种压电辅助催化剂[17]. Tu和Wu[18]制备了Au@MoS_2纳米花异质结, 通过耦合局部表面等离子体共振产生的热电子与压电势诱导的内建电场来协同提高电解水的催化活性. 施加光照和机械振动使得不同尺寸的金修饰纳米花异质结的析氢速率从2981提升到4808 μmol g^{-1} h^{-1} (图4(a)). 2018年, Li等人[19]对全太阳光响应的Ag_2O颗粒修饰MoS_2纳米花制备异质结, 在紫外到近红外光波段照射和超声刺激下均能迅速降解甲基橙染料, 这是由于压电光电子效应构建的内建电场可以实现对Ag_2O光生电子-空穴对的有效分离, 与水和溶解的氧气反应生成·OH和$\cdot O_2^-$自由基来降解污染物(图4(b)). Zhang等人[20]利用水热法设计了TiO_2-MoS_2复合层状纳米结构, 并研究其对有机染料罗丹明B压电增强的光催化降解性能. 少层MoS_2通过超声振动产生压电势来加速光生电子-空穴对的分离, 罗丹明B分子会与载流子反应并脱色, 在25 min内脱色率达到84%, 证明了MoS_2复合纳米结构中压电增强的光催化降解性能. 除多组分异质结外, 单个光催化半导体中可以同时产生压电势和光生电荷为压电光电增强催化提供了更简单的策略. 2019年, Zhao等人[21]制备了单晶CdS超薄纳米片, 同时施加超声振动和可见光照射时, 更多的光生载流子才会被压电场有效分离, 迁移到催化剂表面从而提高光催化活性, 产H_2率可高达633 μL h^{-1}, 是光和超声产氢叠加量的2.1倍以上. 这是因为CdS兼具光催化和压电性, 可以高效地利用光能和机械能进行光催化裂解水反应, 而不需要耦合其他材料或施加外部偏压. 2020年, Abbood等人[22]利用水热法进一步制备了厚度可调的CdS二维纳米片, 研究了纳米片厚度和光/压电协同作用对催化性能的影响. 其中最薄纳米片的催化产氢率为1293.62 μmol g^{-1} h^{-1}, 是单机械振动和光催化的4倍多. 这是因为同时引入光和超声振动时, 诱导的大量压电极化电荷增加了能带弯曲, 促进了光生空穴和电子向上下表面的传输, 从而增加CdS纳米片表面的电子密度, 显著提高了光催化裂解水活性(图4(c)). 还有研究人员发现少层MoS_2纳米片可以通过压电增强光催化效应从而促进活性氧的产生用于灭菌, 使得大肠杆菌在15 min内失活率达到99.999%[23]. 这些工作的核心均在于调控应变诱导的压电电势, 使其朝着有利的能带弯曲和电荷转移动力学方向发展, 为开拓高性能二维光/电催化剂和解决能源与环境危机提供了有效的策略.

3.3　气体传感

未来的电子传感系统需要高比表面积和超高灵敏度的气体传感器, 而以往的传感器均受限于较低的灵敏度、高成本和复杂的制造工艺. 2019年, Guo等人[24]制备了一种基于单层MoS_2的柔性NO_2传感器, 利用光栅效应和压电光电子效应对肖特基势垒的共同调制, 增加电荷转移过程诱导的气体吸附量, 在0.67%拉伸

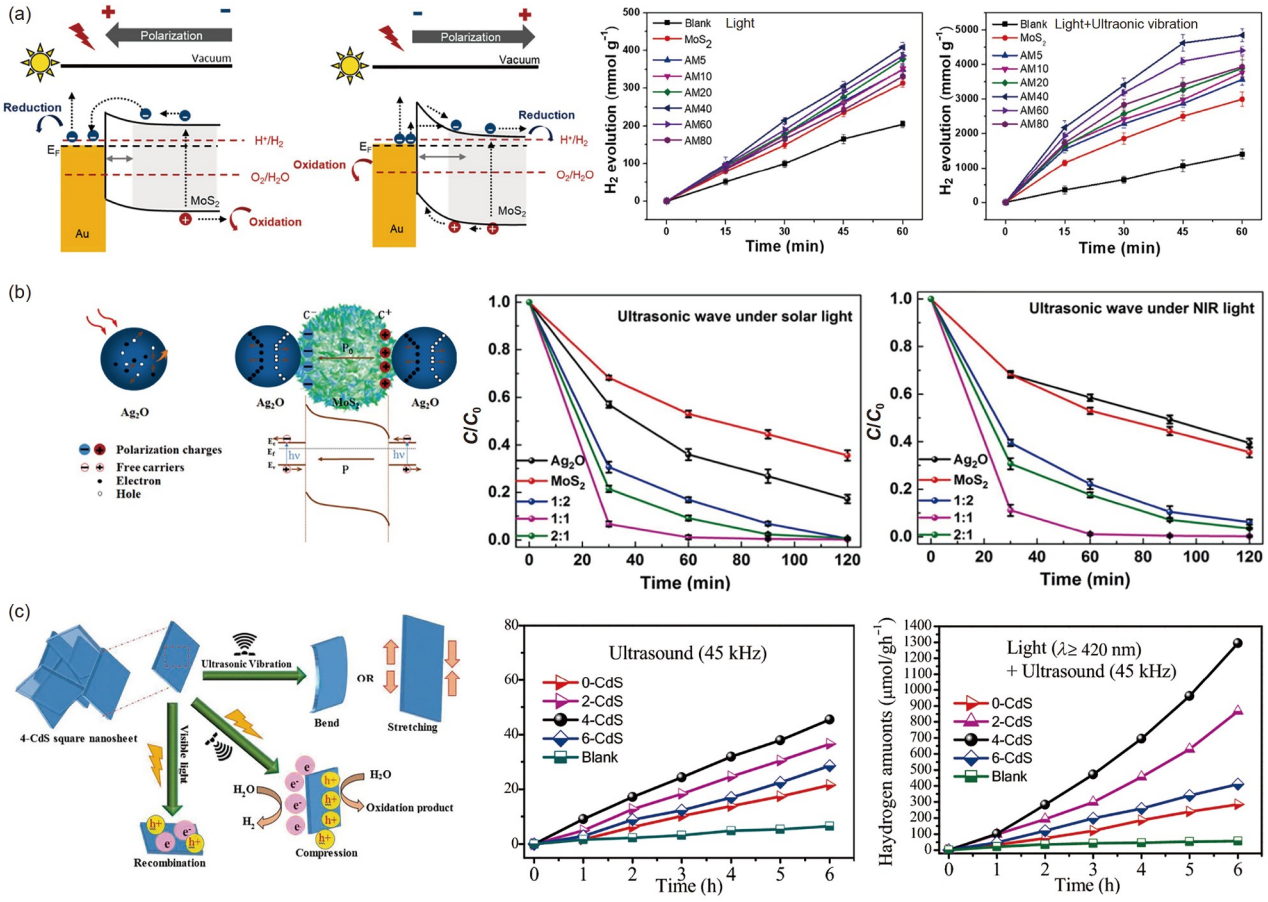


图 4 压电光电子学调制的光电化学反应. (a) 压电光电子学效应提升的基于Au@MoS_2纳米花异质结的裂解水析氢速率[18]; (b) 压电光电子学效应增强的基于MoS_2@Ag_2O异质结全太阳光催化的甲基橙有机染料降解[19]; (c) 压电光电子学效应增强的CdS超薄纳米片的光催化产氢速率[22]

Figure 4 Photoeletrochemical reactions modulated by piezo-phototronic effect. (a) The rate of water-splitting hydrogen production based on the heterostructured Au@MoS_2 nanoflowers enhanced by piezo-phototronic effect [18]. Copyright©2021, Elsevier Ltd. (b) Photocatalytic degradation of methyl orange organic dyes under solar light illumination based on MoS_2@Ag_2O heterostructures enhanced by the piezo-phototronic effect [19]. Copyright©2018, Elsevier Inc. (c) Photocatalytic hydrogen production rate of ultrathin CdS nanosheets enhanced by the piezo-phototronic effect [22]. Copyright©2020, Springer Science Business Media, LLC, part of Springer Nature.

应变和625 nm红光发光二极管照射下(光照强度为4 mW cm^{-2}), 传感器的灵敏度提高到671%. 同时传感器的检测极限降低到20 ppb, 并且其响应时间大幅度地降低到16 s(图5(a)). 压电光电子学效应增强的NO_2传感器在未来小型化、便携式和超灵敏气体传感系统中表现出良好的应用前景.

3.4 太阳能电池

太阳能电池是一种通过光伏效应将太阳能转化为电能的器件, 利用p-n结或者M-S接触的内建电场来对入射光诱导的电子-空穴对进行分离. 对于压电光电子学效应增强的太阳能电池(PSC), 压电势可以有效地促进光生载流子的分离, 有助于开发高性能、低成本的柔性太阳能电池. 目前压电光电子学效应增强太阳能电池多采用基于第三代半导体量子点、纳米线和薄膜的材料体系. 二维材料具有独特的光电特性, 但目前基于二维材料的压电光电子学效应调制太阳能电池还处在理论模型阶段. 2017年, Zhang研究组[25]提出了一种基于金属-单层MoS_2-金属结构的二维压电太阳能电池的理论模型, 两侧分别为用于太阳能电池的肖特基接触和用于电极的欧姆接触, 利用压电极化电荷来调控接触点的SBH, 在应变为1%时, PSC开路电压预计提

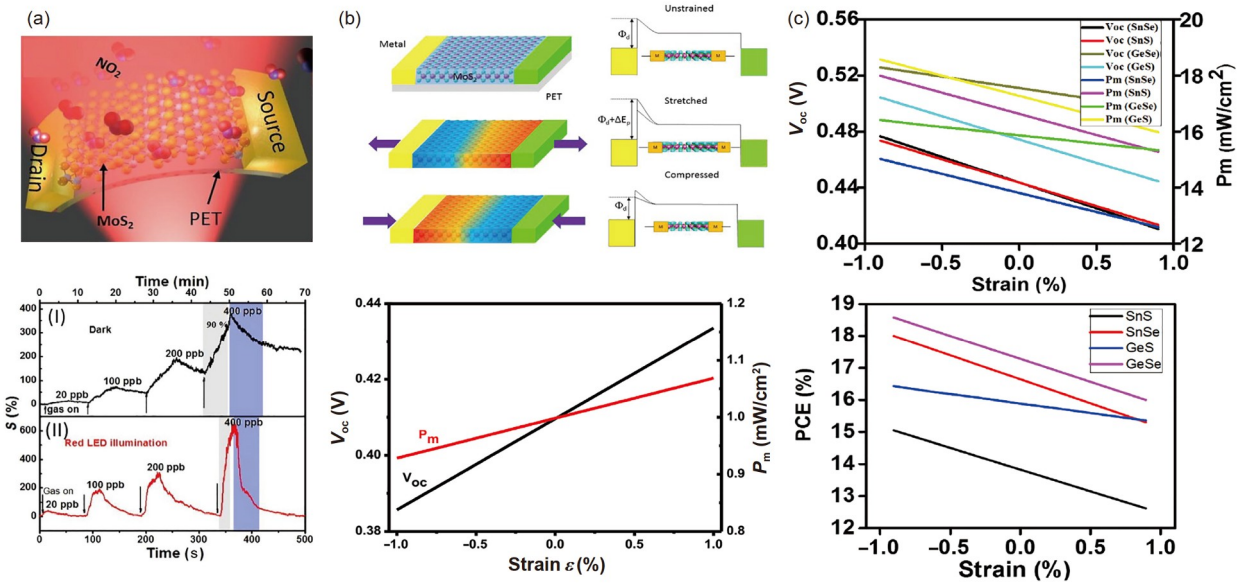


图 5　压电光电子学效应调制的气体传感器和太阳能电池. (a) 压电光电子学效应增强单层MoS_2基柔性气体传感器对NO_2的检测灵敏度[24]; (b) 压电光电子学效应通过调控能带结构, 增加单层MoS_2肖特基太阳能电池的开路电压[25]; (c) 压电光电子学效应调制SnS, SnSe, GeS, GeSe四种二维材料太阳能电池的开路电压和光电转换效率[26]

Figure 5　Gas sensors and solar cells modulated by piezo-phototronic effect. (a) Detection sensitivity to NO_2 of flexible single-layer MoS_2 based gas sensors enhanced by piezo-phototronic effect [24]. Copyright©2018, Science China Press. (b) Open circuit voltage of monolayer MoS_2 Schottky solar cells enhanced by piezo-phototronic effect by adjusting the band structure [25]. Copyright©2017, Elsevier. (c) Open circuit voltage and photoelectric conversion efficiency of solar cells based on 2D SnS, SnSe, GeS and GeSe materials modulated by piezo-phototronic effect [26]. Copyright©2019, IOP Publishing.

高5.8%(图5(b)). 2019年, 该研究组[26]从理论上预测了基于单层Ⅳ族单硫化物(如SnSe, SnS, GeSe等)-金属结构太阳能电池的性能, 并计算了压电光电子学效应增强的二维材料太阳能电池性能(图5(c)).

4　总结与展望

二维材料的超薄层状结构和优异的物理、化学性质为研究压电光电子学提供了理想的平台. 原子层厚度二维材料中存在压电性的理论预测和实践证明为进一步探索原子尺度上的新物理以及新一代光电子器件应用提供了新的视角. 通过压电、半导体特性和光激发的三者耦合, 利用二维压电半导体作为研究材料, 如过渡金属二硫化物等, 极大地拓展了压电光电子学这一重要的研究领域. 目前已经证明了压电光电子学效应在基于二维材料各种应用包括自供电系统、人机接口、光电传感、能量收集和环境检测等领域的应用潜力[27]. 这些新型研究和应用的核心思想是通过在压电半导体中施加应变产生压电势和压电极化电荷, 来调节局部界面区域的能带结构, 从而控制界面处光生载流子的产生、分离、传输和复合. 尽管这一新兴领域取得了巨大的进展, 但要全面了解并充分发展压电光电子学, 仍然面临着巨大的挑战. (1) 需要继续探索二维材料的压电性. 理论预测有压电性的新型二维材料需要实验来进一步证实, 同时也需明确影响压电性的参数, 以便在原子尺度上设计结构实现对压电性能的人工操控. (2) 二维压电光电子器件的稳定性和可靠性需要重视. 例如, 二维材料压电性的可控性、长期循环过程中金属-半导体接触的机械疲劳以及电极材料性能退化问题、环境气氛的影响以及封装技术都急需进一步研究. (3) 如何将二维材料的压电性与其他有趣的性质, 如热电性、铁磁性、超导或自旋电子学有机结合. 这些基础研究将会产生新的技术应用或新物理学的科学突破. (4) 需要更可行的表征方法来直接探测界面动力学和记录应变时压电极化电荷的动态分布, 这将为压电光电子学领域的实验研究和应用提供可靠的理论指导. (5) 外部应变会直接影响二维材料中缺陷的浓度、分布和类型, 从而影响载流子输运和光/电学性质. 因此需要计算并确认压电电荷在不同缺陷中影响电子和空穴的定量关系. (6) 二维材料的生

长工艺需要进一步发展. 实现从单个器件到实际应用的柔性压电光电系统需要大面积、高质量的二维材料. 这些研究对于合理设计、优化压电光电子学器件、推动器件实用化进程和进一步发展学科体系至关重要.

参考文献

1 Lopez-Sanchez O, Lembke D, Kayci M, et al. Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS_2. Nat Nanotech, 2013, 8: 497–501
2 Wu W, Wang L, Li Y, et al. Piezoelectricity of single-atomic-layer MoS_2 for energy conversion and piezotronics. Nature, 2014, 514: 470–474
3 Pan C, Zhai J, Wang Z L. Piezotronics and piezo-phototronics of third generation semiconductor nanowires. Chem Rev, 2019, 119: 9303–9359
4 Yang Q, Guo X, Wang W, et al. Enhancing sensitivity of a single ZnO micro-/nanowire photodetector by piezo-phototronic effect. ACS Nano, 2010, 4: 6285–6291
5 Hu Y, Chang Y, Fei P, et al. Designing the electric transport characteristics of ZnO micro/nanowire devices by coupling piezoelectric and photoexcitation effects. ACS Nano, 2010, 4: 1234–1240
6 Wu W, Wang L, Yu R, et al. Piezophototronic effect in single-atomic-layer MoS_2 for strain-gated flexible optoelectronics. Adv Mater, 2016, 28: 8463–8468
7 Duerloo K A N, Ong M T, Reed E J. Intrinsic piezoelectricity in two-dimensional materials. J Phys Chem Lett, 2012, 3: 2871–2876
8 Zhu H, Wang Y, Xiao J, et al. Observation of piezoelectricity in free-standing monolayer MoS_2. Nat Nanotech, 2015, 10: 151–155
9 Wu W, Wang Z L. Piezotronics and piezo-phototronics for adaptive electronics and optoelectronics. Nat Rev Mater, 2016, 1: 16031
10 Lin P, Pan C, Wang Z L. Two-dimensional nanomaterials for novel piezotronics and piezophototronics. Mater Today Nano, 2018, 4: 17–31
11 Wang Z L, Wu W. Piezotronics and piezo-phototronics: Fundamentals and applications. Natl Sci Rev, 2014, 1: 62–90
12 Zhang K, Peng M, Wu W, et al. A flexible p-CuO/n-MoS_2 heterojunction photodetector with enhanced photoresponse by the piezo-phototronic effect. Mater Horiz, 2017, 4: 274–280
13 Lin P, Zhu L, Li D, et al. Piezo-phototronic effect for enhanced flexible MoS_2/WSe_2 van der Waals photodiodes. Adv Funct Mater, 2018, 28: 1802849
14 Zhang K, Zhai J, Wang Z L. A monolayer MoS_2 p-n homogenous photodiode with enhanced photoresponse by piezo-phototronic effect. 2D Mater, 2018, 5: 035038
15 Dai M, Chen H, Wang F, et al. Robust piezo-phototronic effect in multilayer γ-InSe for high-performance self-powered flexible photodetectors. ACS Nano, 2019, 13: 7291–7299
16 Pan L, Sun S, Chen Y, et al. Advances in piezo-phototronic effect enhanced photocatalysis and photoelectrocatalysis. Adv Energy Mater, 2020, 10: 2000214
17 Wu J M, Chang W E, Chang Y T, et al. Piezo-catalytic effect on the enhancement of the ultra-high degradation activity in the dark by single- and few-layers MoS_2 nanoflowers. Adv Mater, 2016, 28: 3718–3725
18 Tu C Y, Wu J M. Localized surface plasmon resonance coupling with piezophototronic effect for enhancing hydrogen evolution reaction with Au@MoS_2 nanoflowers. Nano Energy, 2021, 87: 106131
19 Li Y, Wang Q, Wang H, et al. Novel Ag_2O nanoparticles modified MoS_2 nanoflowers for piezoelectric-assisted full solar spectrum photocatalysis. J Colloid Interface Sci, 2019, 537: 206–214
20 Zhang H Y, Dai J D, Liu C M. The fabrication, microstructure, photo-catalysis and piezo-catalysis of layered TiO_2-MoS_2. Mater Res Express, 2018, 6: 025025
21 Zhao Y, Huang X, Gao F, et al. Study on water splitting characteristics of CdS nanosheets driven by the coupling effect between photocatalysis and piezoelectricity. Nanoscale, 2019, 11: 9085–9090
22 Abbood H A, Alabadi A, Al-Hawash A B, et al. Square CdS micro/nanosheets as efficient photo/piezo-bi-catalyst for hydrogen production. Catal Lett, 2020, 150: 3059–3070
23 Chou T M, Chan S W, Lin Y J, et al. A highly efficient Au-MoS_2 nanocatalyst for tunable piezocatalytic and photocatalytic water disinfection. Nano Energy, 2019, 57: 14–21
24 Guo J, Wen R, Zhai J, et al. Enhanced NO_2 gas sensing of a single-layer MoS_2 by photogating and piezo-phototronic effects. Sci Bull, 2019, 64: 128–135

25 Zheng D Q, Zhao Z, Huang R, et al. High-performance piezo-phototronic solar cell based on two-dimensional materials. Nano Energy, 2017, 32: 448–453
26 Michael G, Hu G, Zheng D, et al. Piezo-phototronic solar cell based on 2D monochalcogenides materials. J Phys D-Appl Phys, 2019, 52: 204001
27 Zhang Q, Zuo S, Chen P, et al. Piezotronics in two-dimensional materials. InfoMat, 2021, 3: 987–1007

Piezo-phototronic devices based on two-dimensional materials

JIA MengMeng[1,2], GUO PengWen[3], ZHAI JunYi[1,2] & WANG ZhongLin[1,2,4]

[1] *Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China;*
[2] *School of Nanoscience and Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
[3] *School of Integrated Circuits, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*
[4] *School of Materials Science and Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta 30332-0245, USA*

Two-dimensional (2D) materials have great potential in the field of flexible optoelectronics due to their atomically ultra-thin thickness, tunable bandgap and excellent photoelectric properties. The strain-induced piezo-potential or piezoelectric polarization charges can modulate the transport of charge carriers and the photoelectric process at the interface of two-dimensional materials. This piezo-phototronic effect generated by the coupling of piezoelectric, semiconductor properties and photoexcitation has promoted the development of novel two-dimensional material-based optoelectronic devices, such as piezo-phototronics enhanced photoelectric detection, photoelectrochemistry, gas sensing and solar cells. This paper reviews the recent progress in the research field of 2D piezo-phototronics and expounds on the prospect of future challenges and scientific breakthroughs in the emerging field.

two-dimensional material, piezo-phototronics, piezoelectric potential, flexible optoelectronics

doi: 10.1360/SST-2023-0144