

极化促进光催化剂电荷分离的最新进展

马明广, 魏云霞*, 魏慧娟, 刘芳

兰州城市学院化学工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2023年11月14日; 录用日期: 2024年1月23日; 发布日期: 2024年1月31日

摘要

近年来, 极化已被证明是一种促进光催化材料电荷分离的有效策略。本文介绍了不同的极化类型促进光催化剂体相和表面电荷分离的最新进展, 总结了相关极化机制及应用, 并对极化的产生和加强进行了讨论。该综述旨在深入认识极化促进光催化材料电荷运用的行为机制, 进而为高性能光催化材料的开发提供新的参考。

关键词

电荷分离, 光催化, 表面化学

Recent Progress in Charge Separation of Photocatalysts Facilitated by Polarization

Mingguang Ma, Yunxia Wei*, Huijuan Wei, Fang Liu

College of Chemical Engineering, Lanzhou City University, Lanzhou Gansu

Received: Nov. 14th, 2023; accepted: Jan. 23rd, 2024; published: Jan. 31st, 2024

Abstract

In recent years, polarization has been shown to be an effective strategy for promoting surface charge separation in photocatalytic materials. The recent progress of different polarization types in promoting surface charge separation of photocatalysts is reviewed. The related polarization mechanisms and applications are summarized. The generation and enhancement of polarization are discussed. The purpose of this review is to deeply understand the behavior mechanism of po-

*通讯作者。

larization promoting charge utilization of photocatalytic materials, so as to provide a new reference for the development of high-performance photocatalytic materials.

Keywords

Charge Separation, Photocatalysis, Surface Chemistry

Copyright © 2024 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

随着环境污染和化石燃料的消耗,生态失衡和能源短缺严重威胁着社会的可持续发展。半导体光催化作为理想的技术在环境修复和可再生能源生成方面显示出巨大的潜力,但由于光催化剂体相和表面光生载流子的快速重组导致电荷分离效率较低,严重限制了光催化活性[1] [2]。

极化指事物在一定条件下发生两极分化,使其性质相对于原来状态有所偏离的现象。极化(包括宏观极化、压电极化、铁电极化和表面极化)已经成为加速半导体光催化剂体相或表面光生电荷载流子分离的有效手段。在自发极化、外部应力或电场作用下,偶极矩引起极性材料两侧出现正和负极化电荷,从而形成极化电场驱使光催化剂的光生电子和空穴向相反方向迁移,实现高效电荷分离,进而大大提高有机污染物降解、光催化水分解、还原和氧活化等反应活性。

2. 极化促进催化剂体相电荷分离

在光催化过程中,第一步是通过光激发生成载流子和空穴对(e^-h^+)。然后,这些载流子从本体移动到催化剂表面的催化活性位点参与氧化还原反应。电荷迁移过程需要数百皮秒。然而,大量电荷重组只需要几皮秒,比电荷传输快得多。因此,迫切需要极化作为一种有效的策略来促进本体电荷分离,从而提高光催化性能。

2.1. 宏观极化促进体相电荷分离

由于晶体结构中缺乏对称中心,纳米多孔碳支架薄膜材料(NCS)的极性单元微观极化的积累可以产生较大的宏观极化,可作为电荷转移和分离的驱动力,从而有利于光催化活性。具有 NCS 晶体结构的非线性光学材料(NLO)产生由本征偶极矩引起的极化电场而被报道为高效的光催化剂[3]。2011年,Nguyen 等人报道了 BiOIO_3 作为一种新的 NLO 材料,不但具有强大的二次谐波(SHG)效应(12.5 KDP),而且具有较高的压电系数(约 26 pmV^{-1}) [4]。

王等人报道了 BiOIO_3 可作为降解甲基橙的高效光催化剂。其高光催化活性归因于 IO_3 多面体内的偶极矩产生较强的宏观极化,驱使 e^- 和 h^+ 向相反的方向移动[3]。在此基础上,黄等人提出了一种用 V^{5+} 代替 I^{5+} 来增强 IO_3 多面体宏观极化增长其偶极矩的策略,通过 SHG 的增强数值和理论计算结果均证实了上述策略可行[5] (图 1)。 IO_3 的多面体畸变在 $\text{BiOI}_{0.926}\text{V}_{0.074}\text{O}_3$ 中确定为 0.065,大于 BiOIO_3 中的多面体畸变[6]。宏观极化的增强极大地促进了 BiOIO_3 在光催化过程中的体相电荷分离,并显著提高其在光和超声波照射下氧活化产生超氧自由基和羟基自由基的能力(图 2)。更多的宏观极化促进电荷分离和转移的例子见表 1。

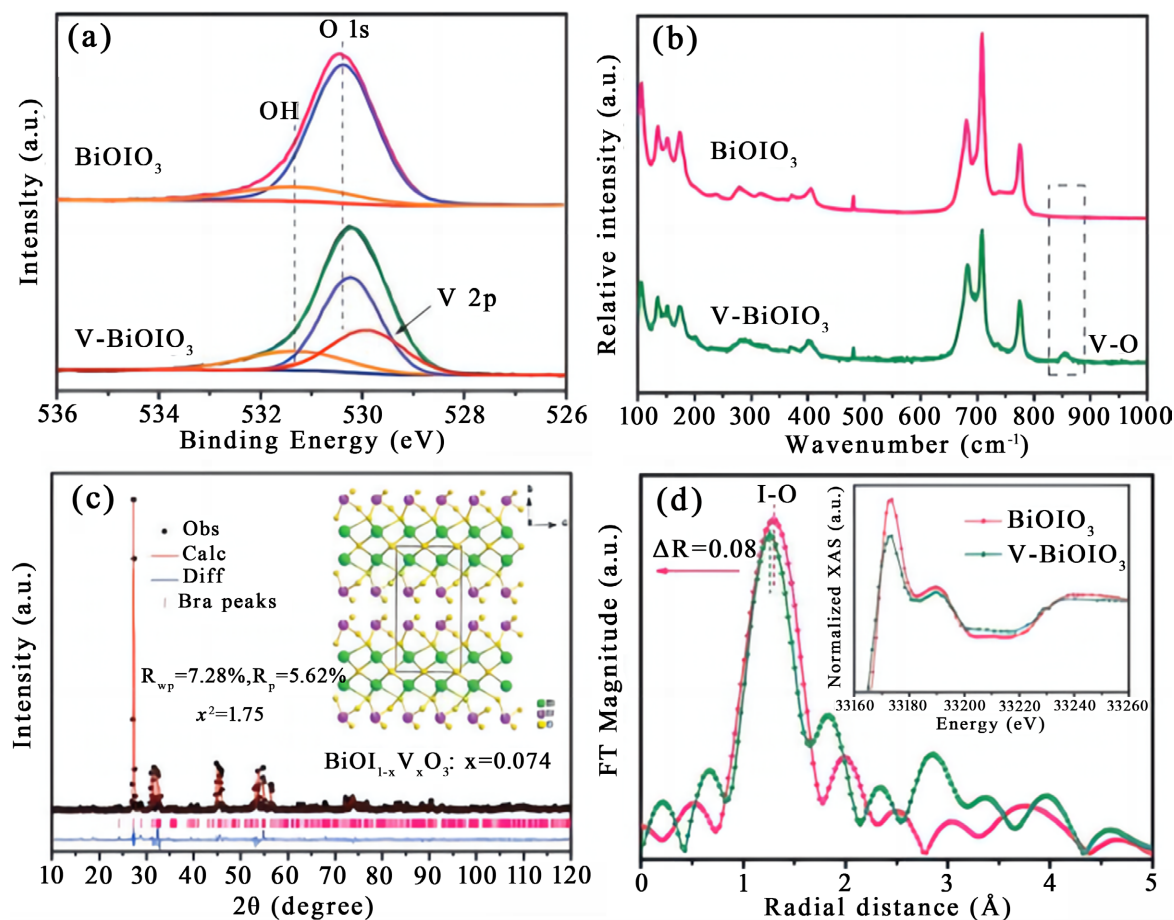


Figure 1. (a) XPS of O 1s and V 2p and (b) Raman spectra of BiOIO₃ and V-BiOIO₃ (BiO_{0.926}V_{0.074}O₃); (c) XRD Rietveld refinement of VBiOIO₃; (d) Fourier-transform (FT) curves of XAFS data of BiOIO₃ and V-BiOIO₃ [5]

图 1. (a) O 1s 和 V 2p 的 XPS; (b) BiOIO₃ 的拉曼光谱; (c) V-BiOIO₃ 的 XRD; (d) BiOIO₃ 和 V-BiOIO₃ 的 XAFS 数据的傅里叶变换(FT)曲线[5]

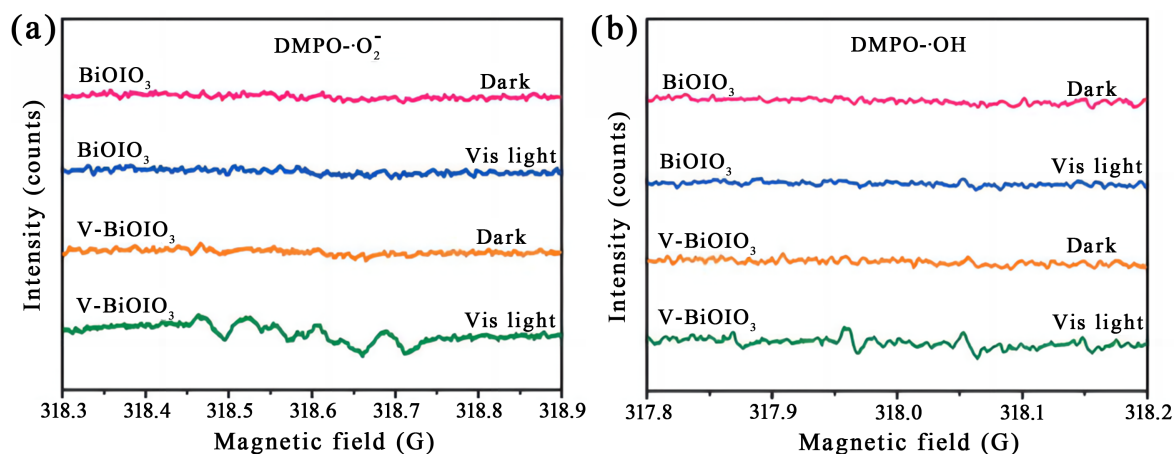


Figure 2. ESR signals for (a) DMPO-O₂⁻ and (b) DMPO-OH over BiOIO₃ and V-BiOIO₃ (BiO_{0.926}V_{0.074}O₃) under visible-light ($\lambda > 420$ nm)

图 2. 可见光下($\lambda > 420$ nm) (a) DMPO-O₂⁻ 在 BiOIO₃ 和 V-BiOIO₃ 上的 ESR 信号; (b) DMPO-OH 在 BiOIO₃ 和 V-BiOIO₃ 上的 ESR 信号[5]

Table 1. Comparison of photocatalytic performance of photocatalysts based on macroscopic polarization
表 1. 基于宏观极化的光催化剂的光催化性能比较

光催化剂	催化条件	催化应用	催化活性	文献
$K_3B_6O_{10}Br$	紫外光 (500 w 汞灯)	氯酚脱氯 (2,4-DCP, $c = 50 \text{ mgL}^{-1}$)	在 3 min 范围内的二氯化效率为 99.8%	[7]
$Na_3VO_2B_6O_{11}$	紫外光 (500 w 汞灯)	氯酚脱氯 (2,4-DCP, $c = 50 \text{ mgL}^{-1}$)	在 3 min 范围内的二氯化效率为 99.9%	[8]
$M_2B_5O_9Cl$ (M = Ca, Sr, Ba, Pb)	紫外光 (500 w 汞灯)	氯酚脱氯 (2,4-DCP, $c = 50 \text{ mgL}^{-1}$)	氯离子转化率 CBC 为 66.8%, SBC 为 69.1%, BBC 为 86.9%, PBC 为 41.9%	[9]
$Bi_2O_2 [BO_2(OH)]$	模拟太阳光 (1000 w 氙灯)	MB 的降解 ($c = 10 \text{ 5molL}^{-1}$)	在 80 min 范围内的二氯化效率为 99.9%	[10]
$Ag_6Si_2O_7$	可见光 (300 w 氙灯)	MB 的降解 ($c = 20 \text{ mgL}^{-1}$)	9 min 内降解效率为 99%	[11]
Bi_2MoO_6	可见光 (300 w 氙灯)	磺胺甲恶唑(SMX, $c = 2 \text{ ppm}$)和 苯酚($c = 10 \text{ ppm}$)的降解	在 120 min 范围内, 苯酚的降解效率为 40%	[12]

2.2. 压电极化促进体相电荷分离

压电光电子学是压电性和光活性的结合, 是针对压电半导体材料提出的。在应力或应变作用下, 压电可以产生极化。在压电极化场的驱动下, 光诱导出 e^- 和 h^+ 可以有效地分离并推动其向相反方向迁移, 有利于本体电荷向表面活性位点迁移, 参与各种光催化反应。

Xue 等人报道了一种压电光催化体系[13]。将 ZnO 纳米线垂直负载到碳纤维上(图 3(a)), 在紫外光照射下生成 e^-/h^+ 对。由于周期性的压力诱导极化场, 将其快速迁移至催化剂表面, 可有效地降解 MB。通过增加应力的频率可得到更大的极化场, 从而增强了对 MB 的降解性能(图 3(b))。

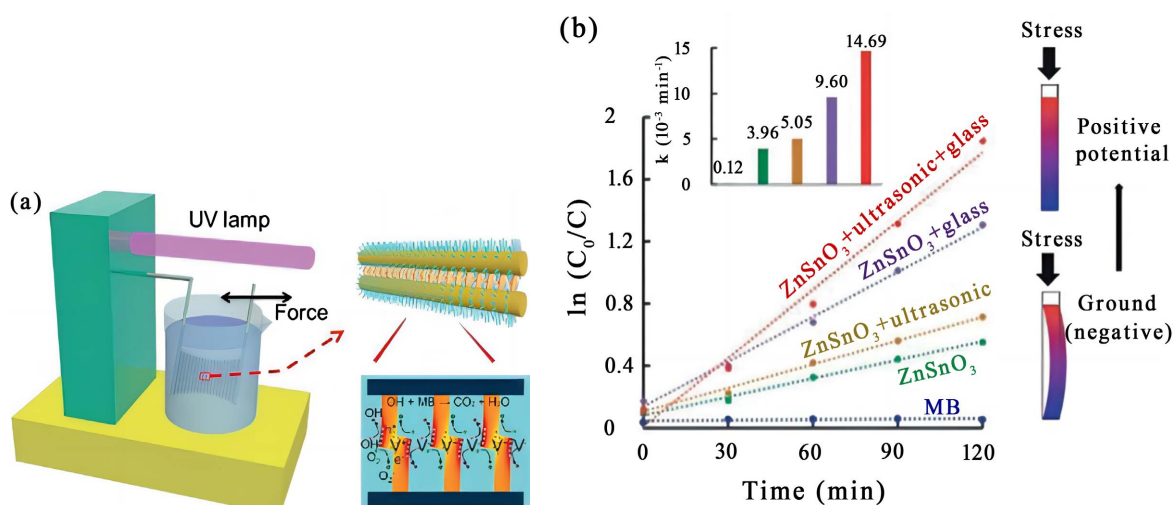


Figure 3. (a) The degradation of MB solution by the piezo-photocatalytic activity of ZnO nanowires/CFs under UV irradiation and periodically applied force; (b) Adapted with permission from [17]

图 3. 在紫外线照射和周期性施力下, ZnO 纳米线/CFs 的压电光催化活性降解 MB [17]

Chang 等人证明, 机械弯曲产生的光子激发和应力极大地增加局部电导, 并通过产生正的压电有效地降低了势垒高度, 从而增强了载流子转移[14]。

ZnSnO₃ 是一种具有较高压电系数的压电材料, 其压电系数较 ZnO 的大[15]。Lo 等人在 FTO 玻璃上制备了垂直排列的 ZnSnO₃ 纳米线。在应力作用下, 纳米线对 MB 具有更高的紫外光催化活性[16]。这种增强归因于应力作用下的压电极化引起的能带畸变使 e⁻ 和 h⁺ 的重组减少。他们进一步研究了在超声振动下, Zn_{1-x}SnO₃ 纳米线的光降解率比无应力情况下高 4 倍左右, 这主要是由于交替超声振动产生了能带弯曲和极化场。

2.3. 铁电极化促进体相电荷分离

与上述压电材料不同, 铁电材料在没有施加应力的情况下具有自发偶极矩, 从而产生自发极化电场来驱动电荷的分离和转移。近年来, 一些铁电材料被证明可以直接用作光催化剂。

BaTiO₃ 是最典型的铁电性钙钛矿氧化物之一, 具有通用分子式 ABO₃ (A, B = 阳离子元素)。Cui 等人报道, 将立方相副电 BaTiO₃ 在 120°C 下退火 10 小时, 可以得到正方相铁电 BaTiO₃。研究发现铁电 BaTiO₃ 具有较高的四方含量, 在模拟光下对罗丹明 B (RhB) 脱色比副电 BaTiO₃ 增加了 3 倍。此外, 研究还发现将银粒子通过光化学方法沉积在 BaTiO₃ 表面, 可以进一步促进光产生电荷的空间分离和转移[17]。

黄宏伟课题组首次报道了铁电层状钙钛矿 SrBi₄Ti₄O₁₅ 纳米片的制备方法及其在光催化二氧化碳还原中的应用[18]。在无辅助催化剂和牺牲剂的情况下, 退火后的 SrBi₄Ti₄O₁₅ 纳米片具有最强的铁电性, 在气固反应体系中表现出较强的 CO₂ 光催化还原活性。铁电磁滞回线和 KPFM 显示, 在 350°C 下退火的 SrBi₄Ti₄O₁₅ 纳米片具有最强的铁电极化(图 4), 并产生了最高的电荷分离效率, 从而显示出最显著的二氧化碳光还原性能。

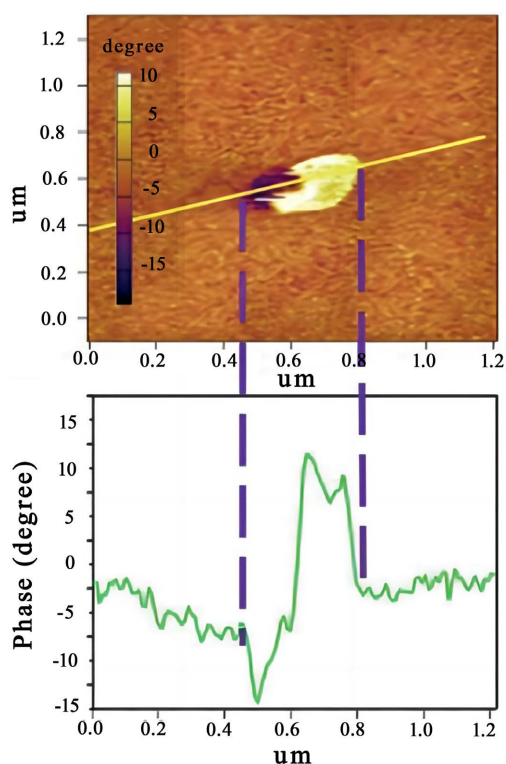


Figure 4. 2D phase maps and corresponding curve of the SrBi₄Ti₄O₁₅ piezoelectric Response [18]

图 4. SrBi₄Ti₄O₁₅ 压电响应的二维相图及相应曲线[18]

3. 极化促进光催化剂表面电荷分离

如下图 5 所述, 在光催化剂内部发生的极化可以有效分离体相中的光生电荷和空穴, 从而促进其从体相中快速迁移到表面。然而, 抑制光生电子和空穴在光催化剂表面的复合仍然具有挑战性, 它也可以通过极化来促进。通过耦合极性成分或在光催化剂表面产生局部极化区域, 可以建立极化场以促进电子和空穴沿不同方向迁移到反应位点以参与氧化还原反应。

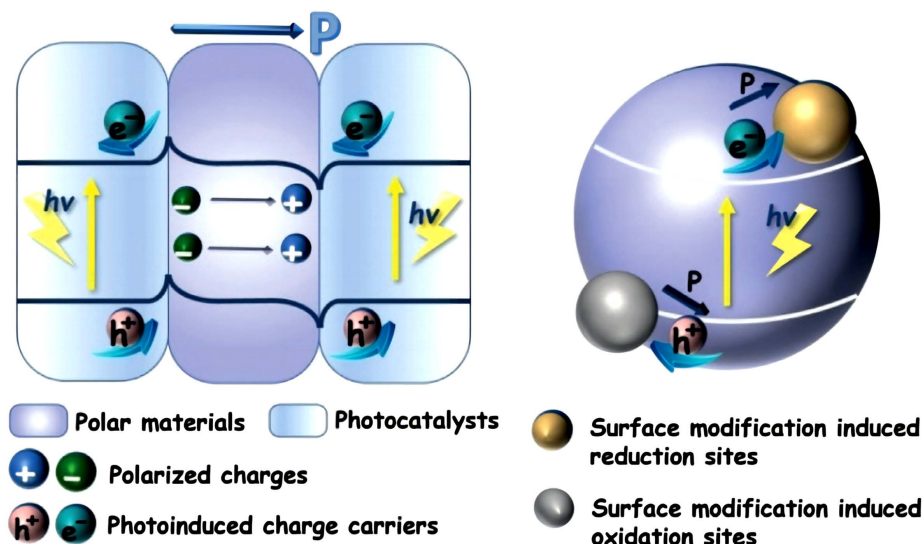


Figure 5. The scheme for polarization promoted surface charge separation

图 5. 极化促进表面电荷分离

3.1. 压电极化促进表面电荷分离

在异质结构压电光催化剂中, 压电元件在应力或应变作用下均可产生压电感应极化电场。考虑到密切的界面相互作用和费米能平衡, 能带弯曲驱动光催化组分表面幸存的光激发载流子向相反方向移动, 从而实现不同组分之间高效的界面电荷分离[19]。作为一种典型的压电材料, ZnO 在异质结中捕获机械能并提供压电极化场。

2016 年, Wang 等人发现了压电材料在光催化方面的潜力。在 ZnO 纳米片上组装 TiO_2 纳米粒子的极化诱导界面带弯曲研究[20]。同时, Hong 等人报道了用简单的两步湿化学方法制备 Cu/ZnO 异质结构纳米线阵列(图 6(a), 图 6(b))。在光和超声作用下, CuS/ZnO 纳米复合材料对 MB 的降解表现出优异的压电光催化性能(20 min 内降解率为 100%) (图 6(c)), 这归功于 ZnO 纳米线引起的界面极化场[21]。在此极化场的驱动下, CuS 的导带(CB)中的光致电子 e^- 移动到 ZnO 的导带, 而 h^+ 从 ZnO 的价带(VB)迁移到 Cu 的价带。因此, 产生的光生电子对(e^-/h^+)在 CuS/ZnO 纳米线界面处分离, 有利于光催化反应。

3.2. 铁电极化促进表面电荷分离

铁电自发极化不仅能改善体相内电荷的分离和转移, 而且还通过形成光催化剂与铁电体之间的异质结促进光催化剂的表面电荷分离。

黄宏伟研究小组通过比较 C-BaTiO₃ (立方相)/BiOI 和铁电 T-BaTiO₃ (四方相)/BiOI 异质结构, 揭示了铁电自发极化对表面电荷迁移行为和光催化性能的影响[22]。

由于 T-BaTiO₃ 的自发极化感应电场, 光生电子 e^- 和空穴 h^+ 在表面复合率比较低(图 7)。因此铁电

T-BaTiO₃ (四方相)/BiOI 异质结构具有更高的可见光催化降解 MO 活性。从而证明了铁电自发极化对提高半导体光催化剂的表面电荷分离具有重要作用。

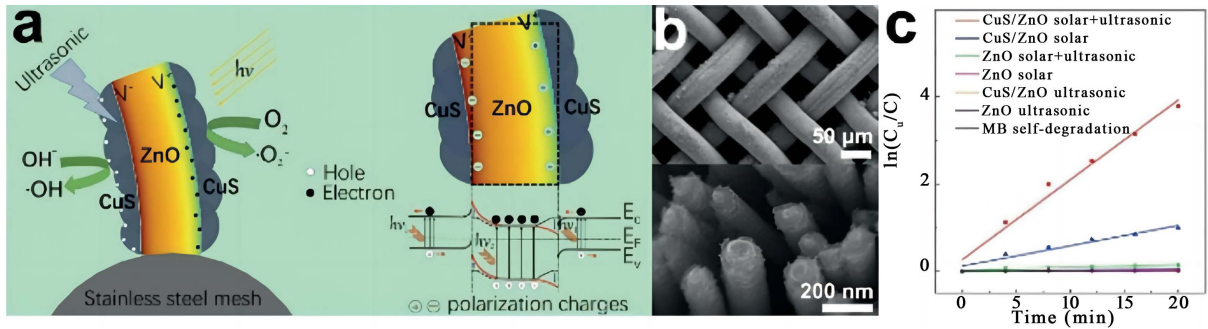


Figure 6. (a) Schematic for the piezo-photocatalytic process of CuS/ZnO nanowires on stainless steel mesh and the energy band diagram of CuS/ZnO heterostructure under both solar and ultrasonic irradiation; (b) SEM images of CuS/ZnO nanowire arrays on stainless steel mesh (400 mesh) with different magnifications; (c) Photocatalytic degradation kinetic curves of MB solution catalyzed by bare ZnO and CuS/ZnO nanowires on stainless steel mesh under different experimental conditions [20]

图 6. (a) CuS/ZnO 纳米线在不锈钢网上的压电光催化过程示意图以及太阳和超声辐照下 CuS/ZnO 异质结构的能带图; (b) 在不锈钢网下 CuS/ZnO 纳米线阵列的扫描电镜图像; (c) 不同实验条件下, 裸氧化锌和 CuS/ZnO 纳米线在不锈钢网上催化 MB 溶液的光催化降解动力学曲线[20]

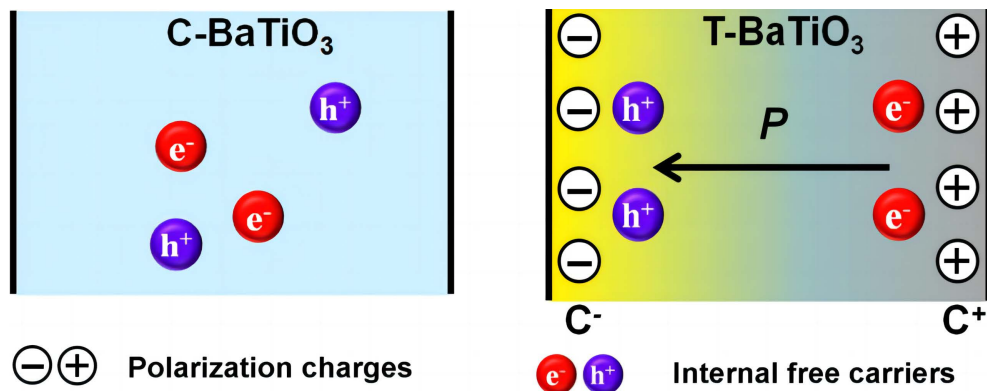


Figure 7. Schematic illustration for charge separation for C-BaTiO₃ and T-BaTiO₃ [22]

图 7. C-BaTiO₃ 和 T-BaTiO₃ 电荷分离示意图[22]

3.3. 表面极化促进表面电荷分离

半导体光催化作为一种表面催化作用,在很大程度上取决于催化剂的表面状态。表面修饰物质可以诱导表面电荷的重新分布[23],这样有利于它们的分离和转移。

2014年, Bai 等人提出了 Pt-Pd-rGO 电催化体系的表面极化,其析氢反应性能的增强归因于 Pt 和 Pd 之间功函数的差异[24]。在 TiO₂-Pd@Pt 光催化剂中也提出了类似的界面电荷极化机制。因此,表面极化是提高光催化活性的有效策略。

Yu 等人报道了用石墨碳环对氮化碳(g-C₃N₄)进行表面改性,建立了一个内置电场,使光生电子 e⁻和空穴 h⁺相向移动,使得光催化析氢速率提高了 21 倍[25](图 8)。

Li 等人证明用卤素对 g-C₃N₄ 表面修饰可以诱导极化,大大增强 g-C₃N₄ 的电荷分离,从而提高其光催化性能[26]。于世新团队揭示了表面羟基化是一种新的表面极化方式,从而极大地促进了 g-C₃N₄ 的局部电荷分离,提高了其产氢的性能[27]。其中水热法得到的表面羟基化 g-C₃N₄ (OH-CN)的产氢速率比未处理的样品提高了约 5 倍。更多基于极化促进表面电荷分离的催化剂的例子见表 2。

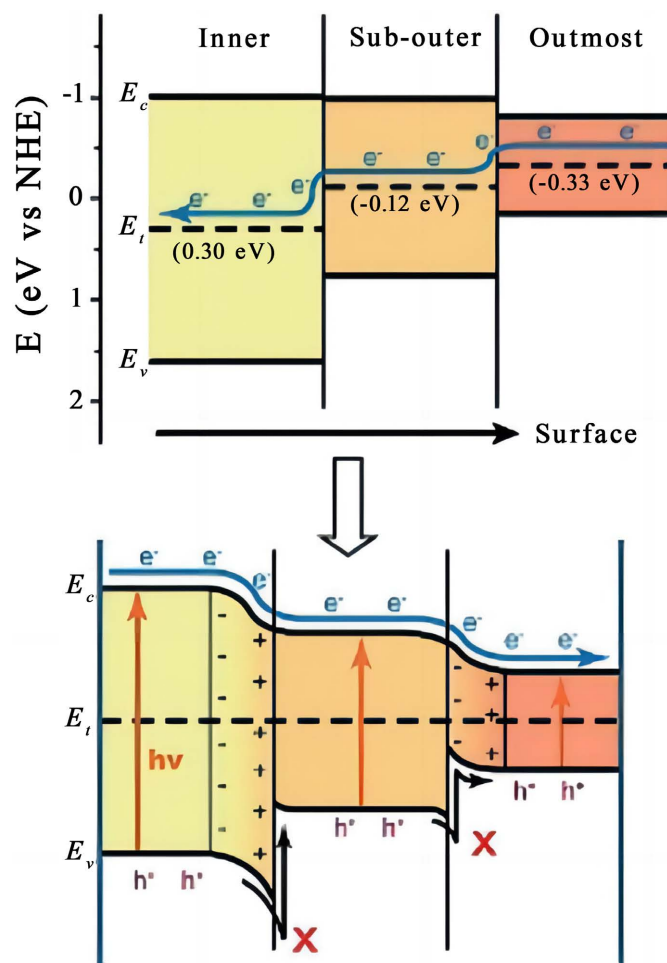


Figure 8. The band structure layouts in GD-C₃N₄ before (up) and after (down) accommodation of Fermi level
图 8. GD-C₃N₄ 费米能级调节前(上面图)后(下面图)的能带结构布局

Table 2. The examples of catalyst for surface charge separation based on polarization
表 2. 基于极化促进表面电荷分离的催化剂的实例

光催化剂	催化条件	催化应用	催化活性	文献
Ag ₂ O-BaTiO ₃	紫外光 + 超声波	降解 RhB (c = 10 mgL ⁻¹)	K = 0.031 min ⁻¹	[28]
ZnO-TiO ₂	紫外光	降解 MO (c = 20 mgL ⁻¹)	K = 0.038 min ⁻¹	[29]
CuS/ZnO	紫外光 + 超声波	降解 MO (c = 5 mgL ⁻¹)	K = 0.082 min ⁻¹	[21]
TiO ₂ /ZnO 纳米线	紫外光 + 超声波	产氢	3.052 umolg ⁻¹ L ⁻¹	[30]
BiOI-BiTiO ₃	可见光(300 W 氙灯)	降解 MO (c = 0.02 mM)	90 分钟降解率可达 95.4%	[31]
TiO ₂ -SrTiO ₃	模拟太阳光	水裂解	1.43 mAcm ⁻²	[32]
TiO ₂ -PbTiO ₃	可见光(300 W 氙灯)	降解 MO (c = 1×10 ⁻⁵ mgL ⁻¹)	K = 0.057 min ⁻¹	[33]

4. 总结与展望

极化作为抑制光生电子和空穴在体相和表面上快速重组的有效途径很值得深入探索, 极化的产生

与加强以及深入的机制仍有待于后续的研究突破。我们希望随着对电荷迁移机制的深入理解, 开发出更多高性能光催化材料, 同时也希望能够启发其他相关领域, 如电催化, 超级电容器, 锂离子电池等的研究。

基金项目

甘肃省科技厅科技计划项目(23JRRA1175), 甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2022CYZC-67)。

参考文献

- [1] Zhou, Q.X., Guo, Y. and Zhu, Y.F. (2023) Photocatalytic Sacrificial H₂ Evolution Dominated by Micropore-Confined Exciton Transfer in Hydrogen-Bonded Organic Frameworks. *Nature Catalysis*, **6**, 574-584. <https://doi.org/10.1038/s41929-023-00972-x>
- [2] Zhang, Y.N., Pan, C.S., Bian, G.M., et al. (2023) H₂O₂ Generation from O₂ and H₂O on a Near-Infrared Absorbing Porphyrin Supramolecular Photocatalyst. *Nature Energy*, **8**, 361-371. <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01218-7>
- [3] Butler, A., Schulz, J. and Argyropoulos, C. (2022) Tunable Directional Filter for Mid-Infrared Optical Transmission Switching. *Optics Express*, **22**, 39716-39724. <https://doi.org/10.1364/OE.474728>
- [4] Nguyen, S.D., Yeon, J., Kim, S.H., et al. (2011) BiO(IO₃): A New Polar Iodate That Exhibits an Aurivillius-Type (Bi₂O₂)²⁺ Layer and a Large SHG Response. *Journal of the American Chemical Society*, **133**, 12422-12425. <https://doi.org/10.1021/ja205456b>
- [5] Pan, X., Yang, X., Yu, M., et al. (2023) 2D MXenes Polar Catalysts for Multi-Renewable Energy Harvesting Applications. *Nature Communications*, **14**, Article No. 4183. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39791-w>
- [6] Chen, F., Huang, H.W., Ye, L.Q., et al. (2018) Thickness-Dependent Facet Junction Control of Layered BiOIO₃ Single Crystals for Highly Efficient CO₂ Photoreduction. *Advanced Functional Materials*, **28**, Article ID: 1804284. <https://doi.org/10.1002/adfm.201804284>
- [7] Liu, C., Zhang, G., Zhang, K., et al. (2018) Facile Dispersion of Nanosized NiFeP for Highly Effective Catalysis of Oxygen Evolution Reaction. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **6**, 7206-7211. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b00471>
- [8] Fan, X.Y., Lai, K.R., Wang, L.C., et al. (2015) Efficient Photocatalytic Dechlorination of Chlorophenols over a Nonlinear Optical Material Na₃VO₂B₆O₁₁ under UV-Visible Light Irradiation. *Journal of Materials Chemistry A*, **3**, 12179-12187. <https://doi.org/10.1039/C5TA01814E>
- [9] Sun, W., Wang, F., Hou, S.Y., et al. (2017) Zn/MnO₂ Battery Chemistry with H⁺ and Zn²⁺ Coinsertion. *Journal of the American Chemical Society*, **29**, 9775-9778. <https://doi.org/10.1021/jacs.7b04471>
- [10] He, Zhang, Y.H., Huang, H.W., et al. (2014) Direct Hydrolysis Preparation for Novel Bi-Based Oxysalts Photocatalyst Bi₆O₅(OH)₃(NO₃)₅·3H₂O with High Photocatalytic Activity. *Inorganic Chemistry Communications*, **40**, 55-58. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2013.11.030>
- [11] Lou, Z.Z., Huang, B.B., Wang, Z.Y., et al. (2014) Ag₆Si₂O₇: A Silicate Photocatalyst for the Visible Region. *Chemistry of Materials*, **26**, 3873-3875. <https://doi.org/10.1021/cm500657n>
- [12] Lou, Z.Z., Wang, P., Huang, B.B., et al. (2017) Enhancing Charge Separation in Photocatalysts with Internal Polar Electric Fields. *ChemPhotoChem*, **1**, 136-147. <https://doi.org/10.1002/cptc.201600057>
- [13] Xue, X., Zang, W., Deng, P., et al. (2015) Piezo-Potential Enhanced Photocatalytic Degradation of Organic Dye Using ZnO Nanowires. *Nano Energy*, **13**, 414-422. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.02.029>
- [14] Chang, J.H. and Lin, H.N. (2014) Exploitation of Piezoelectricity for Enhancing Photocatalytic Activity of ZnO Nanowires. *Materials Letters*, **132**, 134-137. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.06.066>
- [15] Yang, H. (2021) A Short Review on Heterojunction Photocatalysts: Carrier Transfer Behavior and Photocatalytic Mechanisms. *Materials Research Bulletin*, **142**, Article ID: 111406. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2021.111406>
- [16] Wang, Y.T. and Chang, K.S. (2016) Piezopotential-Induced Schottky Behavior of Zn_{1-x}SnO₃ Nanowire Arrays and Piezophotocatalytic Applications. *Journal of the American Ceramic Society*, **99**, 2593-2600. <https://doi.org/10.1111/jace.14264>
- [17] Cui, Y., Briscoe, J., Dunn, S., et al. (2013) Effect of Ferroelectricity on Solar-Light-Driven Photocatalytic Activity of BaTiO₃—Influence on the Carrier Separation and Stern Layer Formation. *Chemistry of Materials*, **25**, 4215-4223. <https://doi.org/10.1021/cm402092f>
- [18] Tu, S.C., Zhang, Y.H., Reshak, A.H., et al. (2019) Ferroelectric Polarization Promoted Bulk Charge Separation for

- Highly Efficient CO₂ Photoreduction of SrBi₄Ti₄O₁₅. *Nano Energy*, **56**, 840-850. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.12.016>
- [19] Lian, Q., Liu, W., Ma, D., *et al.* (2023) Precisely Orientating Atomic Array in One-Dimension Tellurium Microneedles Enhances Intrinsic Piezoelectricity for an Efficient Piezo-Catalytic Sterilization. *ACS Applied Nano Materials*, **17**, 8755-8766. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c02044>
- [20] Wu, J., Qin, N. and Bao, D.H. (2018) Effective Enhancement of Piezocatalytic Activity of BaTiO₃ Nanowires under Ultrasonic Vibration. *Nano Energy*, **45**, 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.12.034>
- [21] Hong, D., Zang, W., Guo, X., *et al.* (2016) High Piezo-Photocatalytic Efficiency of CuS/ZnO Nanowires Using both Solar and Mechanical Energy for Degrading Organic Dye. *JACS Applied Materials & Interfaces*, **8**, 21302-21314. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c02044>
- [22] Deng, J.S., Li, S.M., Zhou, Y.Y., *et al.* (2018) Enhancing the Microwave Absorption Properties of Amorphous CoO Nanosheet-Coated Co (Hexagonal and Cubic Phases) through Interfacial Polarizations. *Journal of Colloid and Interface Science*, **509**, 406-413. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.09.029>
- [23] Rafiq, A., Ikram, M., Ali, S., *et al.* (2021) Photocatalytic Degradation of Dyes Using Semiconductor Photocatalysts to Clean Industrial Water Pollution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **97**, 111-128. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.02.017>
- [24] Yang, Liu, J., Li, Z., *et al.* (2014) Engineering of P450pyr Hydroxylase for the Highly Regio- and Enantioselective Subterminal Hydroxylation of Alkanes. *Angewandte Chemie*, **12**, 3120-3124. <https://doi.org/10.1002/anie.201311091>
- [25] Yu, Y., Yan, W., Wang, X.F., *et al.* (2018) Surface Engineering for Extremely Enhanced Charge Separation and Photocatalytic Hydrogen Evolution on g-C₃N₄. *Advanced Materials*, **30**, Article ID: 1705060. <https://doi.org/10.1002/adma.201705060>
- [26] Rui, Wang, Z.Y., Sun, K.H., *et al.* (2017) CO₂ Hydrogenation to Methanol over Pd/In₂O₃: Effects of Pd and Oxygen Vacancy. *Applied Catalysis B: Environmental*, **218**, 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.06.069>
- [27] Yu, S.X., Li, J.Y., Zhang, Y.H., *et al.* (2018) Local Spatial Charge Separation and Proton Activation Induced by Surface Hydroxylation Promoting Photocatalytic Hydrogen Evolution of Polymeric Carbon Nitride. *Nano Energy*, **50**, 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.05.053>
- [28] Feng, Y.W., Li, H., Ling, L.L., *et al.* (2018) Enhanced Photocatalytic Degradation Performance by Fluid-Induced Piezoelectric Field. *Environmental Science & Technology*, **52**, 7842-7848. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00946>
- [29] Wang, L., Liu, S., Wang, Z., *et al.* (2016) Piezotronic Effect Enhanced Photocatalysis in Strained Anisotropic ZnO/TiO₂ Nanoplatelets via Thermal Stress. *ACS Nano*, **10**, 2636-2643. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b07678>
- [30] Othman, A., Dumitrescu, E., Andreescu, D., *et al.* (2018) Nanoporous Sorbents for the Removal and Recovery of Phosphorus from Eutrophic Waters: Sustainability Challenges and Solutions. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **6**, 12542-12561. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b01809>
- [31] Huang, H.W., Tu, S.C., Du, X., *et al.* (2018) Ferroelectric Spontaneous Polarization Steering Charge Carriers Migration for Promoting Photocatalysis and Molecular Oxygen Activation. *Journal of Colloid and Interface Science*, **509**, 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.09.005>
- [32] Wu, F., Yu, Y.H., Yang, H., *et al.* (2017) Simultaneous Enhancement of Charge Separation and Hole Transportation in a TiO₂-SrTiO₃ Core-Shell Nanowire Photoelectrochemical System. *Advanced Materials*, **29**, Article ID: 1701432. <https://doi.org/10.1002/adma.201701432>
- [33] Li, W., Wang, F., Li, M., *et al.* (2018) Polarization-Dependent Epitaxial Growth and Photocatalytic Performance of Ferroelectric Oxide Heterostructures. *Nano Energy*, **45**, 304-310. <https://doi.org/10.1002/adma.201701432>