



PbSe/TiO₂同轴异质结纳米管的制备及光催化性能

贾哲, 方向明, 高世勇, 范怀云, 桑丹丹, 矫淑杰

引用本文:

贾哲, 方向明, 高世勇, 等. PbSe/TiO₂同轴异质结纳米管的制备及光催化性能[J]. *发光学报*, 2020, 41(2): 181–187.

JIA Zhe, FANG Xiang-ming, GAO Shi-yong, et al. Fabrication and Photocatalytic Properties of PbSe/TiO₂ Coaxial Heterojunction Nanotubes[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(2): 181–187.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/fgxb20204102.0181>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水热法制备二氧化钛纳米管-石墨烯复合光催化剂及其光催化性能

Hydrothermal Synthesis of Graphene-TiO₂ Nanotube Composites and Study of Photocatalytic Properties

发光学报. 2019, 40(2): 177–182 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194002.0177>

In₂O₃/CuO纳米异质结的制备和光催化性质研究

Preparation and Photocatalytic Property of In₂O₃/CuO Nano-heterojunctions

发光学报. 2014, 35(6): 695–700 <https://doi.org/10.3788/fgxb20143506.0695>

Cu掺杂SnO₂/TiO₂复合薄膜的制备及性能研究

Preparation and Properties of Cu-doped SnO₂/TiO₂ Film

发光学报. 2015(9): 996–1000 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153609.0996>

Pt/TiO₂复合纳米结构形貌控制及光催化动力学

Morphological Control of TiO₂ Nanostructures and Photocatalytic Dynamics

发光学报. 2014(12): 1449–1454 <https://doi.org/10.3788/fgxb20143512.1449>

自供能TiO₂纳米管紫外探测器的制备与性能研究

Fabrication and Properties of Self-powered Ultraviolet Detector Based on TiO₂ Nanotubes

发光学报. 2018, 39(12): 1743–1748 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183912.1743>

文章编号: 1000-7032(2020)02-0181-07

PbSe/TiO₂同轴异质结纳米管的制备及光催化性能

贾 哲^{1,2}, 方向明¹, 高世勇^{2*}, 范怀云², 桑丹丹³, 矫淑杰²

(1. 太原学院 理化系, 山西 太原 030032; 2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

3. 聊城大学物理科学与信息工程学院 山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252000)

摘要: 通过溶液法合成了 PbSe/TiO₂ 复合纳米管, 并对其进行了微观形貌、晶体结构等的表征。结果表明, 制得的样品是由 PbSe 和 TiO₂ 两种材料构成的复合材料, 致密、均匀的 TiO₂ 薄膜包覆在 PbSe 纳米管表面。以氙灯为模拟光源, 通过对甲基橙的降解研究了 PbSe/TiO₂ 复合纳米管的光催化性能。结果显示, PbSe 与 TiO₂ 之间形成的异质结使 PbSe/TiO₂ 复合纳米管具有较高的光催化性能, 比纯 PbSe 纳米管的催化降解率提高了约 4.5 倍。另外, 对 PbSe/TiO₂ 复合纳米管光催化稳定性也进行了研究。

关键词: 硒化铅; 二氧化钛; 纳米管; 异质结; 光催化

中图分类号: O472 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20204102.0181

Fabrication and Photocatalytic Properties of PbSe/TiO₂ Coaxial Heterojunction Nanotubes

JIA Zhe^{1,2}, FANG Xiang-ming¹, GAO Shi-yong^{2*}, FAN Huai-yun², SANG Dan-dan³, JIAO Shu-jie²

(1. Department of Physical Chemistry, Taiyuan University, Taiyuan 030032, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. Shandong Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology,

School of Physical Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China)

* Corresponding Author, E-mail: gaoshiyong@hit.edu.cn

Abstract: PbSe/TiO₂ composite nanotubes (NTs) are successfully synthesized by solution method. The characterizations indicate the as-prepared samples are composed of PbSe and TiO₂. It is found that the surface of PbSe NTs is uniformly coated with a TiO₂ thin layer. Under illumination with xenon lamp, the photocatalytic activity is investigated by degradation of methyl orange dye. As a result, PbSe/TiO₂ NTs heterostructures display a better photocatalytic degradation rate, almost 4.5 times as high as that of PbSe NTs. Furthermore, the photocatalytic stability of PbSe/TiO₂ composite NTs is also studied.

Key words: PbSe; TiO₂; nanotube; heterojunction; photocatalysis

1 引 言

近年来,随着工业的迅速发展,污水、废气及

反应副产物等高毒性污染物大量产生,对生态环境造成极大破坏,特别是难降解有机污染物引起的水污染已经成为世界范围内的一个主要问

收稿日期: 2019-06-02; 修订日期: 2019-06-18

基金项目: 黑龙江省博士后基金(LBH-Q16104); 山东省自然科学基金(ZR2017QA013)资助项目

Supported by Postdoctoral Science Foundation of Heilongjiang Province(LBH-Q16104); Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2017QA013)

题^[1]。自 1972 年日本东京大学的 Fujishima 和 Honda 发现二氧化钛(TiO_2)单晶通过光照能分解水后,半导体光催化技术受到了广泛的关注^[2]。由于其高效、绿色环保、操作简单且对多数污染物具有降解效果,因而成为解决全球性环境恶化的一个重要途径。 TiO_2 作为一种重要的半导体材料,具有独特的光学、电学性质及良好的化学稳定性、无毒、抗腐蚀性、低成本等优点,因而在光催化材料领域得到广泛的研究^[3-4]。然而, TiO_2 是宽带隙(3.2 eV)半导体,只能吸收利用太阳光总能量中不到 5% 的紫外光^[5]。另外,光激发后生成的电子-空穴对容易发生复合导致光催化过程的低效率^[6]。这些缺陷导致它的光催化性能仍然不能达到人们的期望值,严重阻碍了其作为高效光催化剂的发展及应用。

针对 TiO_2 材料的这些缺陷,目前有多种方法来提高光催化性能,例如元素掺杂^[7]、贵金属修饰^[8]以及构建异质结复合材料^[9]。在这些方法中,将 TiO_2 与其他窄带隙半导体结合形成异质结构是一种提高光催化效率的简单有效方法^[10]。 PbSe 是一种典型的窄带隙半导体,在可见光区有良好的光学吸收性能^[11]。同时, TiO_2 和 PbSe 结合后形成的 II 型能带结构能够使光生电子-空穴对得到有效分离。例如,Kukovecz 等生长了一种 PbSe 量子点/ TiO_2 纳米线光催化剂,在可见光照射下对甲基橙(MO)降解率为 90%^[12]。Zhu 等通过超声化学法制备了一种新型的 PbSe-TiO_2 复合纳米结构,在降解罗丹明 B 的实验中,与纯 TiO_2 相比, PbSe-TiO_2 复合物显著提高了反应速率^[13]。嵇天浩等采用水热法制备了 PbSe 修饰 TiO_2 纳米带复合材料,可见光催化结果证实, PbSe 修饰后的 TiO_2 纳米带对罗丹明 B 光催化降解活性比纯 TiO_2 纳米带明显提高^[14]。虽然与 PbSe 复合可大大提高 TiO_2 的光催化性能,但 PbSe 在光降解过程中会被光生空穴氧化,而失去光催化活性,稳定性差。此外, PbSe 的光腐蚀导致有毒 Pb^{2+} 离子的产出,这加剧了环境的二次污染^[15]。如果构建内层为 PbSe 外层为 TiO_2 的复合结构光催化剂,那么将会在提高光催化性能的同时增强其稳定性,但目前几乎没有关于该结构的研究报道。

本文通过模板法制备 PbSe 纳米管,然后通过液相沉积法在其外面包覆 TiO_2 薄膜保护层,

构建 PbSe/TiO_2 复合纳米管光催化剂。对制备样品的形貌和结构进行分析。使用 MO 作为模拟污染物,对其光催化活性进行了研究。最后,对样品的光催化稳定性和光催化机理也进行了探究。

2 实 验

2.1 PbSe 纳米管制备

首先,通过模板法,利用水浴法制备 PbSe 纳米管^[16]。将 0.225 mmol 抗坏血酸和 2.25 mmol 的醋酸铅溶于 50 mL 去离子水后,滴加 1 mL 含有 Se 线的乙醇溶液,使之混合均匀。将反应液转移至丝口瓶中,在水浴锅中(98 °C)保持 10 h。最后,将离心得到的样品在氩气保护下退火(250 °C)2 h,得到 PbSe 纳米管粉体。

2.2 PbSe/TiO_2 纳米管制备

将制备的 PbSe 纳米管加入到浓度为 0.05 mol/L 氟钛酸铵和 0.15 mol/L 硼酸的混合溶液中,将其转移到丝口瓶中,在水浴锅中(50 °C)搅拌反应 5 h,然后将获得的样品离心并用去离子水清洗后在干燥箱中干燥。最后将干燥后的样品在 450 °C 的条件下退火 2 h。

2.3 样品表征

将样品超声分散在硅片上后使用扫描电子显微镜(SEM, Hitachi SU-70)对合成样品的形貌进行观察。将样品溶解在无水乙醇中,滴在铜网上,干燥后通过透射电子显微镜(FEI, Tecnai G2 F20)观察样品的透射电子图像(TEM)和高分辨率透射电子图像(HRTEM)。使用德国 Bruke D8 型 X 射线衍射仪(XRD)对产物的晶体结构进行了测试。

2.4 光催化测试

以质量浓度为 10 mg/L 的 MO 作为目标降解物,对制备样品的光催化性能进行测试。将 10 mg 样品放入石英管中,然后加入 10 mL MO 溶液,搅拌,使其分散均匀,并在避光条件下保持 15 min,使溶液中的染料分子与光催化剂达到吸附-脱附平衡。实验选用氙灯作为模拟光源,每隔 15 min 后取样,通过离心将溶液中的光催化剂去除,然后使用紫外分光光度计(UV1700)测试滤液在 465 nm 波长处的吸光度。光催化剂的催化效率使用 C/C_0 来计算,其中 C 是光照一定时间后 MO 溶液的浓度, C_0 是 MO 溶液的初始浓度。

3 结果与讨论

图 1 为模板法制备的 PbSe 纳米管的形貌图。从图 1(a) 中可以看到, 制备的 PbSe 纳米管为棒状形貌, 尺寸分布均匀, 表面较为粗糙, 对其长度进行统计后, PbSe 纳米管的长度分布范围为 1~9 μm。进一步从高放大倍数的扫描电镜图像(图 1(b))中观察到 PbSe 纳米管的平均直径主要集中在 ~110 nm 左右, 粗糙的表面是由细小的纳米颗粒构成。此外, 部分开口的纳米管(制备扫描电镜样品时破裂)在图中红色椭圆处能够明显被观察到, 这充分

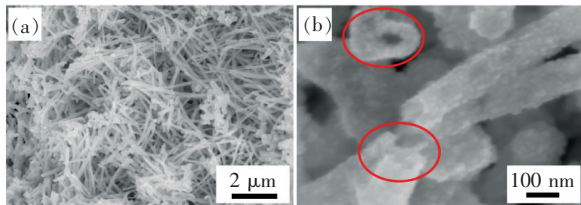


图 1 PbSe 纳米管的 SEM 图。(a) 低倍图; (b) 高倍图。
Fig. 1 SEM images of PbSe NTs. (a) Overview SEM image. (b) Magnification SEM image.

说明制备的是中空 PbSe 纳米管结构。

在液相沉积反应后, 制备样品的形貌如图 2(a) 所示。在包覆 TiO₂ 薄膜后, 直径明显比 PbSe 纳米管变粗, 大约为 300 nm。相比于 PbSe 纳米管, PbSe/TiO₂ 复合纳米管分布均匀, 整体保持原有的形貌结构, 这说明液相沉积法能够在 PbSe 纳米管表面包覆 TiO₂ 薄膜层, 同时对 PbSe 纳米管的整体结构没有影响。进一步放大形貌(图 2(b))能够观察到, 复合纳米结构的表面更加粗糙, 由许多尺寸均匀、细小致密的“毛刺”状的纳米颗粒构成。由于 TiO₂ 的致密包覆, 没有看到明显的管状结构。图 2(c) 是在 450 度退火处理后, PbSe/TiO₂ 复合纳米管的形貌图, 从图中能够看到, 其直径比退火前明显减小, 平均直径约为 130 nm。这可能是由于在退火过程中, TiO₂ 纳米粒子二次结晶后重新排布、同时纳米管向内坍塌收缩造成的。从高倍图(图 2(d))中能够看到, 退火后的 PbSe/TiO₂ 复合纳米管表面由更加细小的纳米颗粒构成, 并且仍然保持中空管状结构。

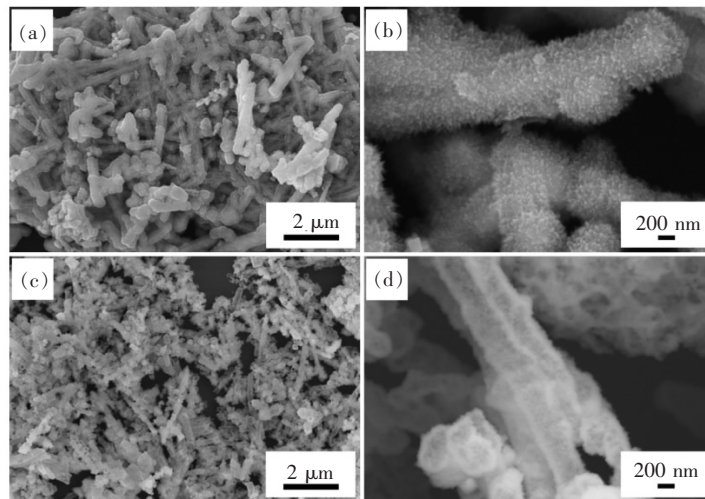


图 2 退火前 PbSe/TiO₂ 复合纳米管的低倍(a)和高倍(b)SEM 图;退火后 PbSe/TiO₂ 复合纳米管的低倍(c)和高倍(d) SEM 图。

Fig. 2 SEM images of PbSe/TiO₂ NTs. (a, b) Before annealing. (c, d) After annealing.

图 3(a) 是退火前 PbSe/TiO₂ 复合纳米管的透射电镜图, 从图中清楚地观察到复合结构的外部明显比内部暗, 清晰的对比充分说明制备的 PbSe/TiO₂ 复合材料是中空纳米管状结构。纳米管的外层是由非常短小的纳米棒构成, 因此在扫描图中看到纳米管的外层是“毛刺”状。在退火后, PbSe/TiO₂ 复合纳米管的 TEM 图如图 3(b) 所

示, 从图中看到复合结构仍为中空纳米管结构, 管外层的“纳米棒”完全转化成致密的纳米颗粒, 并且管的直径相对于退火前明显变小, 这与扫描图中观察的结果相一致。图 3(c) 是 PbSe/TiO₂ 复合纳米管的高分辨透射电镜图, 在图的左下角的晶格条纹面间距约为 0.36 nm, 这与 PbSe 的 (111) 面的间距一致^[17]。在图 3(c) 的右上角晶

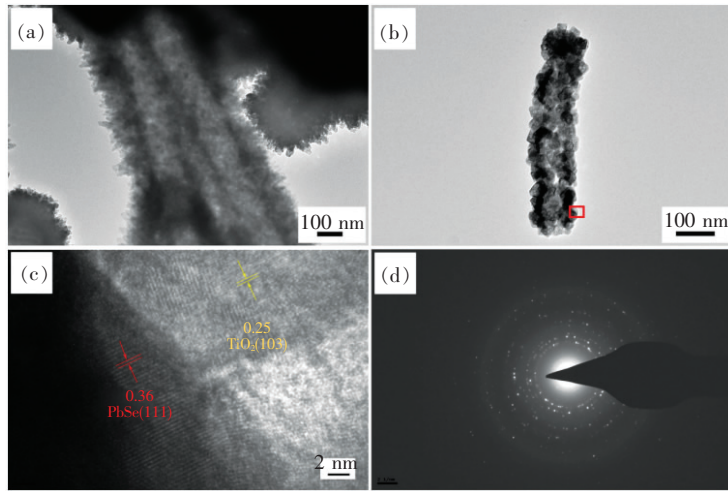


图3 退火前的 PbSe/TiO₂ 复合纳米管的 TEM 图(a) 及退火后的 PbSe/TiO₂ 复合纳米管的 TEM 图(b)、HRTEM 图(c) 和相应的 SAED 图(d)。

Fig. 3 TEM images of PbSe/TiO₂ NTs before annealing(a), and TEM(b), HRTEM(c) and SAED(d) images of PbSe/TiO₂ NTs after annealing.

格条纹的面间距约为 0.25 nm, 对应于 TiO₂ 的 (103) 晶面^[18]。图 3(d) 是 PbSe/TiO₂ 复合纳米管的 SAED 图, 图中显示了环状图案, 这表明制备的 PbSe/TiO₂ 纳米管是多晶结构。

图 4 是 TiO₂ 包覆 PbSe 纳米管复合材料的 XRD 图谱。由图 4 可见, 在 $2\theta = 25^\circ$ 处有一非常明显的衍射峰, 这与锐钛矿相 TiO₂ 的 (101) 晶面吻合 (JCPDS No. 21-1272)^[19]。此外, 在图中还有 7 个尖锐的衍射峰 (黑色圆点) 分别归属为立方相 PbSe 的 (200)、(220)、(311)、(222)、(400)、(420) 和 (422) 晶面的特征衍射峰 (JCPDS card No. 06-0354)^[20]。这表明, 制备的样品为 PbSe 和 TiO₂ 的复合材料, 此外, TiO₂ 包覆 PbSe 纳米管后, 对 PbSe 的晶体结构没有影响。

以甲基橙作为目标降解物, 对制备的样品进行光催化性能测试, 结果如图 5 所示。在无任

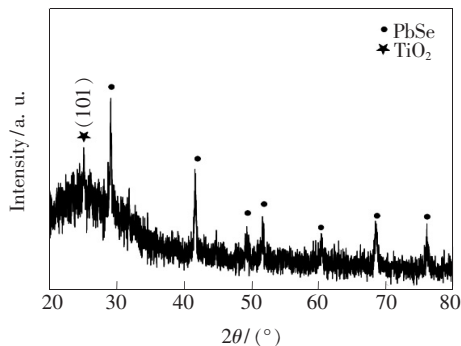


图 4 PbSe/TiO₂ 复合纳米管的 XRD 图谱

Fig. 4 XRD pattern of PbSe/TiO₂ NTs

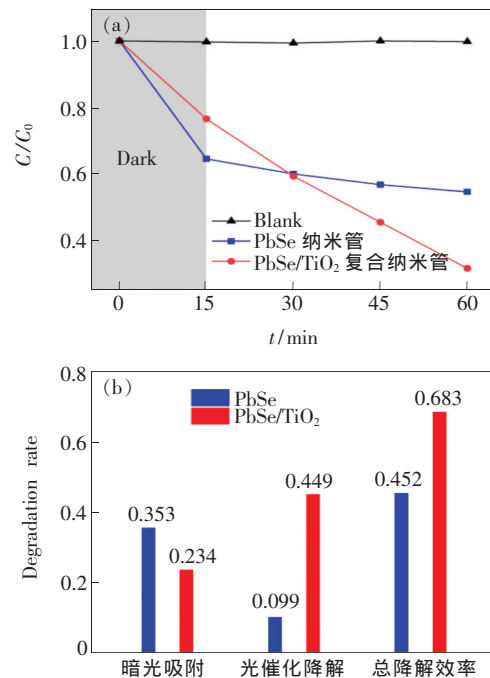


图 5 (a) PbSe 纳米管和 PbSe/TiO₂ 复合纳米管的光催化降解 MO 溶液的浓度随时间变化曲线; (b) PbSe 纳米管和 PbSe/TiO₂ 复合纳米管对 MO 吸附和降解图。

Fig. 5 (a) Photocatalytic activities of PbSe, PbSe/TiO₂ NTs, and the reaction without photocatalyst for reference. (b) Adsorption and photocatalytic degradation of PbSe and PbSe/TiO₂ NTs.

何光催化剂的条件下, 无论是在黑暗还是光照条件下, MO 的浓度都几乎没有变化 (图 5(a) 中黑

色曲线),这说明 MO 非常稳定,不会发生自降解。当加入 PbSe 纳米管后,如图 5(a)中蓝色曲线所示,在避光状态下搅拌 15 min 后,能够看到 MO 的浓度明显降低,说明 PbSe 纳米管对于 MO 有较强的吸附作用。然后在氙灯照射下,光催化反应开始,MO 浓度继续降低,但降低速度明显变慢,即单一的 PbSe 纳米管的光催化效率较差。当加入 PbSe/TiO₂ 复合光催化剂后,在暗光和光照条件下,MO 的浓度持续降低,并且效率比 PbSe 纳米管的明显增强。为进一步研究对比 TiO₂ 包覆后 PbSe 纳米管光催化性能的变化,对其暗光吸附、光催化降解及总降解效率进行了详细分析,结果如图 5(b)所示。对于暗光吸附,PbSe 在包覆 TiO₂ 后,其吸附率有所降低。然而,PbSe/TiO₂ 复合纳米管的光催化降解率为 44.9%,比 PbSe 的光催化降解率(9.9%)提高了约 4.5 倍,这表明 TiO₂ 包覆 PbSe 纳米管能够有效地提高 PbSe 的光催化效率。尽管 TiO₂ 包覆 PbSe 纳米管后其吸附能力降低,但最终 MO 的去除率为 68.3%,相比 PbSe 纳米管效率提高了 50%,具有更高的光催化性能。

光催化性能稳定是评价光催化剂能否实现应用的重要因素之一。为了研究 PbSe/TiO₂ 复合纳米管的循环稳定性,在相同条件下,对 PbSe/TiO₂ 光催化剂进行了 4 次重复测试,结果如图 6 所示。可以看到,每次测试后,光催化降解效果都略有降低,PbSe/TiO₂ 复合纳米管对 MO 的降解率分别为 68.3%、67.5%、65.8% 和 63.8%,这表明样品具备较好的光催化稳定性,能够重复多次使用。

一般来说,光催化性能与光催化剂的结构、吸附能力和光吸收有关。在本实验中,光催化性能

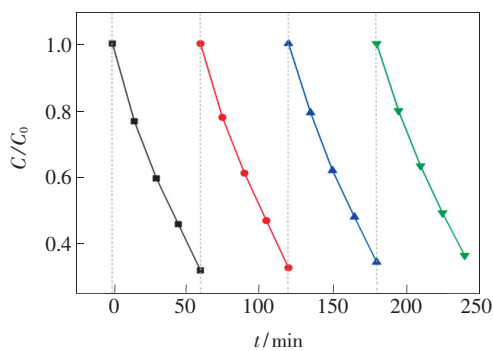


图 6 PbSe/TiO₂ 复合纳米管对 MO 的 4 次循环降解图
Fig. 6 Recyclability test of photocatalytic decomposition for PbSe/TiO₂ NTs

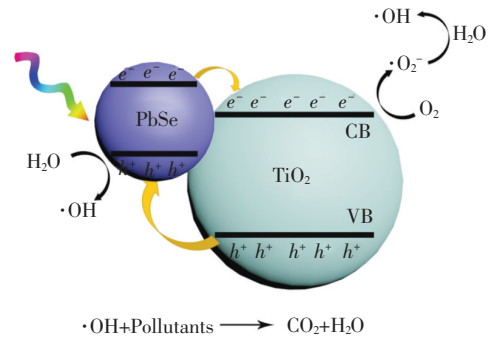
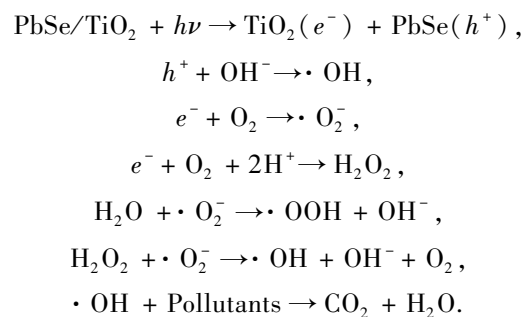


图 7 PbSe/TiO₂ 复合纳米管的光催化机理图
Fig. 7 Scheme for the photocatalytic mechanism of PbSe/TiO₂ NTs heterojunction

的增强主要是由于 PbSe 和 TiO₂ 构成的异质结,PbSe/TiO₂ 复合纳米管的光催化机理如图 7 所示。在模拟太阳光照射下,当光照射到 PbSe/TiO₂ 复合纳米管时,最外面的 TiO₂ 保护层吸收能量大于其带隙的紫外光后,电子(e⁻)从其价带(VB)激发到导带(CB),并在价带留下相同数目空穴(h⁺)。可见光部分被 PbSe 吸收生成光生电子-空穴对。由于 PbSe 与 TiO₂ 结合后形成的异质结具有典型的 II 型能带结构,在内建电场的作用下,光生电子转移到 TiO₂ 的导带,而光生空穴转移到 PbSe 的价带^[21],因此,光生载流子的分离有效减缓了电子-空穴对的复合,提高了电子-空穴对的寿命。光生电子可以与溶解的 O₂ 反应生成超氧自由基(·O₂⁻),超氧自由基将进一步与 H₂O 和 H₂O₂ 反应生成具有强氧化能力的羟基自由基(·OH)。而光生空穴通过与 OH⁻ 作用也会生成·OH。同时纳米管状结构具有较强的吸附能力,PbSe/TiO₂ 复合材料表面能够吸附大量的 MO 分子,进而增加了 MO 分子在光催化剂表面的浓度,因此染料分子能够快速被·OH 分解为 CO₂ 和 H₂O 等无机小分子^[8,13,22]。涉及的主要反应如下:



4 结 论

采用模板法制备了中空 PbSe 纳米管,然后使用简单易控的液相沉积法在其表面包覆 TiO₂ 保护层获得 PbSe/TiO₂ 同轴异质结纳米管。通过 SEM、TEM 和 XRD 对样品进行了表征,结果表明 TiO₂ 薄膜包覆后,复合纳米管的平均直径约为 130 nm,且没有改变 PbSe 的晶体结构。光

催化结果表明,相比于纯 PbSe 纳米管,PbSe/TiO₂ 异质结光催化剂表现出更高的光催化降解活性,对 MO 的去除率达到了 68.3%。此外,循环测试显示了其良好的稳定性和循环性能。光催化机理的研究表明,PbSe/TiO₂ 复合纳米管高效的光催化性能主要是由于异质结有利于光生电子和空穴对的分离,从而实现了光催化效率的提高。

参 考 文 献:

- [1] 刘丽,彭茂民,夏虹. Mn 掺杂 ZnS 量子点与孔雀石绿和隐性孔雀石绿的相互作用 [J]. 发光学报, 2019,40(3): 304-310.
LIU L, PENG M M, XIA H. Interaction of Mn doped ZnS quantum dots with malachite green and leucomalachite green [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019,40(3):304-310. (in Chinese)
- [2] 魏利娟,张海明,曹静,等. 静电纺 Ag/WO₃ 复合纳米纤维及其光催化性能 [J]. 发光学报, 2019,40(1):39-44.
WEI L J, ZHANG H M, CAO J, *et al.*. Electrospinning fabrication of Ag/WO₃ nanofibers and photocatalytic performance [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019,40(1):39-44. (in Chinese)
- [3] YU H B, CHEN S, QUAN X, *et al.*. Fabrication of a TiO₂-BDD heterojunction and its application as a photocatalyst for the simultaneous oxidation of an azo dye and reduction of Cr(VI) [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2008,42(10):3791-3796.
- [4] SARKAR D, CHATTOPADHYAY K K. Branch density-controlled synthesis of hierarchical TiO₂ nanobelt and tunable three-step electron transfer for enhanced photocatalytic property [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2014,6(13): 10044-10059.
- [5] 陈越,何大伟,王永生,等. 水热法制备二氧化钛纳米管-石墨烯复合光催化剂及其光催化性能 [J]. 发光学报, 2019,40(2):177-182.
CHEN Y, HE D W, WANG Y S, *et al.*. Hydrothermal synthesis of graphene-TiO₂ nanotube composites and study of photocatalytic properties [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019,40(2):177-182. (in Chinese)
- [6] PAN J Q, DONG Z J, WANG B B, *et al.*. The enhancement of photocatalytic hydrogen production *via* Ti³⁺ self-doping black TiO₂/g-C₃N₄ hollow core-shell nano-heterojunction [J]. *Appl. Catal. B: Environ.*, 2019,242:92-99.
- [7] 袁云松,吴从越,李雨芬,等. 铈、镱共掺可见光响应型纳米 TiO₂ 光催化剂的制备及性能表征 [J]. 发光学报, 2016,37(11):1310-1315.
YUAN Y S, WU C Y, LI Y F, *et al.*. Preparation and characterization of TiO₂:Tm, Yb visible light responsive nano-photocatalyst [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016,37(11):1310-1315. (in Chinese)
- [8] SU C Y, LIU L, ZHANG M Y, *et al.*. Fabrication of Ag/TiO₂ nanoheterostructures with visible light photocatalytic function *via* a solvothermal approach [J]. *Cryst Eng. Comm.*, 2012,14(11):3989-3999.
- [9] PENG L L, XIE T F, LU Y C, *et al.*. Synthesis, photoelectric properties and photocatalytic activity of the Fe₂O₃/TiO₂ heterogeneous photocatalysts [J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2010,12(28):8033-8041.
- [10] ZHANG J Y, XIAO F X, XIAO G C, *et al.*. Assembly of a CdS quantum dot—TiO₂ nanobelt heterostructure for photocatalytic application; towards an efficient visible light photocatalyst *via* facile surface charge tuning [J]. *New J. Chem.*, 2015, 39(1):279-286.
- [11] SHI X R, CHEN G, CHEN D H, *et al.*. PbSe hierarchical nanostructures: solvothermal synthesis, growth mechanism and their thermoelectric transportation properties [J]. *Cryst Eng. Comm.*, 2014,16(41):9704-9710.
- [12] GYÖRI Z, KÓNYA Z, KUKOVECZ Á. Visible light activation photocatalytic performance of PbSe quantum dot sensitized TiO₂ Nanowires [J]. *Appl. Catal. B: Environ.*, 2015,179:583-588.
- [13] ZHU L, ALI A, SHU Y, *et al.*. Detection of reactive oxygen species (ROS) and investigation of efficient visible-light-responsive photocatalysis *via* nanoscale PbSe sensitized TiO₂ [J]. *Sep. Purif. Technol.*, 2015,151:184-192.

- [14] 雷静果,滑永永,周吉,等. PbSe 修饰 TiO₂ 纳米带复合材料的水热制备及其可见光催化活性 [J]. 人工晶体学报, 2012,41(S1):376-381.
LEI J G, HUA Y Y, ZHOU J, *et al.*. Preparation and visible-light photocatalysis of PbSe-deposited TiO₂ nanobelt composites by hydrothermal method [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2012,41(S1):376-381. (in Chinese)
- [15] NAUSHAD M. Surfactant assisted nano-composite cation exchanger; development, characterization and applications for the removal of toxic Pb²⁺ from aqueous medium [J]. *Chem. Eng. J.*, 2014,235:100-108.
- [16] FAN H Y, GAO S Y, XU Z K, *et al.*. A facile and green template-engaged synthesis of PbSe nanotubes with the assistance of Vc [J]. *CrystEngComm*, 2018,20(37):5570-5575.
- [17] LI M, LUO J T, FU C, *et al.*. PbSe quantum dots-based chemiresistors for room-temperature NO₂ detection [J]. *Sens. Actuators B Chem.*, 2018,256:1045-1056.
- [18] YANG L, WANG W H, ZHANG H, *et al.*. Electrodeposited Cu₂O on the {101} facets of TiO₂ nanosheet arrays and their enhanced photoelectrochemical performance [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2017,165:27-35.
- [19] LI Y K, YUAN J J, GAO S Y, *et al.*. A facile route to synthesis of double-sided TiO₂ nanotube arrays for photocatalytic activity [J]. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2017,28(1):468-473.
- [20] KHATAEE A, AREFI-OSKOUI S, FATHINIA M, *et al.*. Synthesis, characterization and photocatalytic properties of Er-doped PbSe nanoparticles as a visible light-activated photocatalyst [J]. *J. Mol. Catal. A: Chem.*, 2015,398:255-267.
- [21] ZHU L, CHUNG J D, OH W C. Rapid sonochemical synthesis of novel PbSe-graphene-TiO₂ composite sonocatalysts with enhanced on decolorization performance and generation of ROS [J]. *Ultrason. Sonochem.*, 2015,27:252-261.
- [22] 何祖明,夏咏梅,唐斌,等. ZnO/Cu₂O 异质结纳米阵列制备及光催化性能 [J]. 发光学报, 2017,38(7):936-943.
HE Z M, XIA Y M, TANG B, *et al.*. Preparation and photocatalytic property of ZnO/Cu₂O heterostructured nanorod arrays [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017,38(7):936-943. (in Chinese)



贾哲(1981-),女,山西万荣人,硕士,讲师,2008年于太原科技大学获得硕士学位,主要从事光电材料制备与性能方面的研究。
E-mail: jiazhe0802@163.com



高世勇(1980-),男,山西大同人,博士,副教授,硕士研究生导师,2010年于吉林大学获得博士学位,主要从事宽带隙半导体材料与器件方面的研究。
E-mail: gaoshiyong@hit.edu.cn