

原位电化学-光还原法制备 Pd/BiF₃ 薄膜及其光催化性能

郝瑞刚^{1*}, 孔祥鹏², 赵祖³, 张小超^{3**}

¹太原工业学院环境与安全工程系, 山西 太原 030008;

²太原工业学院化学与化工系, 山西 太原 030008;

³太原理工大学化学与化工学院, 山西 太原 030024

摘要 通过电化学-光还原法基于 Bi 板合成了 Pd/BiF₃ 薄膜, 探究了不同质量分数的 Pd 对 BiF₃ 薄膜光催化性能的影响。利用 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜、X 射线光电子能谱、紫外-可见漫反射光谱对 Pd/BiF₃ 薄膜进行了表征分析。以模型污染物即罗丹明 B(RhB) 为光催化降解对象, 考察了 Pd/BiF₃ 薄膜的光催化性能。表征结果显示, 贵金属 Pd 均匀分布于 BiF₃ 薄膜表面上, 当 Pd 的质量分数为 2.0% 时, Pd/BiF₃ 薄膜表现出最佳的光催化降解 RhB 的性能, 且光吸收带边发生明显的红移, 带隙值由 3.70 eV 减小为 3.03 eV。活性物种捕获实验表明, 当 Pd 的质量分数为 2.0% 时, 在 Pd/BiF₃ 薄膜光催化降解 RhB 的过程中, 活性物种发挥的作用由大到小的顺序为羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、超氧自由基($\cdot\text{O}_2^-$)、空穴(h^+), 并提出了 Pd/BiF₃ 薄膜光催化性能的增强机制。

关键词 薄膜; 原位电化学-光还原法; Pd/BiF₃ 薄膜; 光催化性能; 罗丹明 B; 增强机制

中图分类号 O472

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1831001

In-Situ Electrochemical-Photoreduction Synthesis and Photocatalytic Performance of Pd/BiF₃ Thin Films

Hao Ruigang^{1*}, Kong Xiangpeng², Zhao Zu³, Zhang Xiaochao^{3**}

¹Department of Environmental and Safety Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan, Shanxi 030008, China;

²Department of Chemistry and Chemical Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan, Shanxi 030008, China;

³College of Chemistry and Chemical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract In this study, the Pd/BiF₃ thin films are successfully prepared by the facile *in-situ* electrochemical-photoreduction method from the Bi plates, and the photocatalytic performances of the BiF₃ thin films with different mass fractions of Pd are investigated for comparison. The Pd/BiF₃ thin films are characterized by the XRD, SEM, XPS and UV-Vis DRS methods. The photocatalytic performance of Pd/BiF₃ thin films is investigated with rhodamine B (RhB) as the photocatalytic degradation object. Our characterization results indicate that when the noble metal Pd is loaded uniformly on the surface of BiF₃ thin films and the mass fraction of Pd is 2.0%, the Pd/BiF₃ thin films exhibit the optimal photocatalytic activity and stability for the degradation of RhB. In addition, there exist an obvious redshift of optical absorption bands and a decrease of bandgap from 3.70 eV to 3.03 eV. The capture experiment of active species confirms that when the mass fraction of Pd is 2.0%, the roles of the $\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{O}_2^-$ and h^+ are from large to small during the photocatalytic degradation of RhB by Pd/BiF₃ films. Finally, an enhancement mechanism of photocatalytic performance of Pd/BiF₃ thin films is proposed.

Key words thin films; *in-situ* electrochemical-photoreduction; Pd/BiF₃ thin film; photocatalytic performance; rhodamine B; enhancement mechanism

OCIS codes 310.6870; 130.5990; 260.5130

收稿日期: 2020-03-25; 修回日期: 2020-05-17; 录用日期: 2020-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(21978196)、山西省优秀青年自然科学基金(201801D211008)

* E-mail: tyhaorg@163.com; ** E-mail: zhangxiaochao@tyut.edu.cn

1 引 言

20 世纪以来,太阳能半导体光催化技术被广泛应用于环境治理和能源再生等领域。与传统的生物降解或活性炭吸附方法相比,太阳能光催化技术可使染料、农药和表面活性剂等非生物降解污染物发生强氧化过程,有机污染物被转化为无机物,无二次污染,其核心是构建太阳光全面响应的高效光催化剂体系^[1]。

2006 年,Zhang 等^[2]发现 BiOCl 的光催化性能优于商品化 TiO₂ 且重复性较好,Bi 系半导体材料成为高效光催化剂的研究热点。其中,BiF₃ 在光催化反应过程中表现出很强的氧化能力^[3],但其带隙值较大($E_g = 3.94 \text{ eV}$),光响应范围仅局限于紫外光区域。贵金属(Pd、Pt 等)修饰改性半导体材料表现出独特的光电特性和稳定性,通过构建贵金属/半导体纳米系统,产生了肖特基势垒,在半导体之间形成了有效的电子转移,拓展了半导体材料的光响应范围,同时提高了光生电子-空穴对的分离效率和光生载流子的迁移效率,进而增强了半导体材料的光催化活性和光响应范围^[4-6]。Chen 等^[4]利用 Pd 修饰花球状 BiOCl,使其光吸收带边拓展至可见光范围,增强了光催化降解 RhB 的活性,降解速率也得到提高。Meng 等^[5]采用水热-光还原法制得 Pd/BiOBr 光催化剂,在可见光照射下其降解苯酚的效率高达 100%。Yu 等^[6]采用光还原法将贵金属(Rh、Pd、Pt 等)沉积于 BiOX(X 为 Cl, Br, I)催化剂表面上,其在紫外光区域催化降解酸性橙的能力由强到弱的顺序依次为 Pd(0.5%)/BiOBr、Pt(1.0%)/BiOCl、Pd(2.0%)/BiOCl,其在可见光区域催化降解酸性橙的能力由强到弱的顺序依次为 Pd(4.0%)/BiOBr、Pd(0.5%)/BiOI、Rh(1.0%)/BiOCl,其中括号内的数字为前面贵金属的质量分数,全文同。可以看出,贵金属 Pd 修饰改性 Bi 基复合材料具有优秀的光催化性能。

本文采用电化学-光还原法从 Bi 板上原位合成出 BiF₃ 薄膜,克服了粉体催化剂难以回收利用缺点,同时将 Pd 均匀沉积于 BiF₃ 薄膜上,制备了一系列具有不同 Pd 质量分数的 Pd/BiF₃ 薄膜,考察了 Pd 的质量分数对 Pd/BiF₃ 薄膜光降解 RhB 活性的影响规律,对活性最佳的 Pd(2%)/BiF₃ 薄膜进行了光谱表征与分析,提出了 Pd/BiF₃ 薄膜光催化性能的增强机制和作用机理。

2 实 验

2.1 BiF₃ 薄膜的制备

首先,利用砂纸打磨尺寸为 6.5 cm×1.5 cm×0.5 cm 的 Bi 板,采用乙醇和蒸馏水对其进行冲洗并将其放置到 60 °C 烘箱内待用;其次,将 2.224 g 的 NH₄F 溶于盛有 10 mL 蒸馏水和 190 mL 乙二醇的 250 mL 烧杯中,将其作为电解液;最后,以 Bi 板和石墨作为阳极和阴极,在 60 V 直流稳压电源下沉积 1 h,即在 Bi 板上原位制备了 BiF₃ 薄膜。

2.2 Pd/BiF₃ 薄膜的制备

将制备好的 BiF₃ 薄膜放置于盛有 100 mL 蒸馏水的烧杯中,并加入一定量的 10 g/L 的 PdCl₂ 溶液;通过不断加入 1 mol/L 的 NaOH,将 pH 值调至 8,同时开启小型鼓气泵 1.5 h;开灯全光照射 1 h 后取出薄膜,制得的一系列 Pd/BiF₃ 薄膜经乙醇和水清洗后被置于 60 °C 干燥箱内 3 h。

2.3 样品表征

使用 D/max-2500 型 X 射线衍射仪(XRD)对样品的晶体结构进行表征[Cu-K α 靶射线为辐射源,管电压为 40 kV,管电流为 100 mA,扫描范围为 10°~80°,速度为 8(°)/min]。采用 Nanosem 430 场发射扫描电镜(SEM)观察样品的结构形貌和尺寸大小。在 UV-3600 型紫外-可见分光光度计上测定样品的光吸收谱。通过上海 CHI660D 电化学工作站测试样品的光电流。利用美国 ESCALAB 250 型 X 射线光电子能谱(XPS)对样品进行元素化学态的分析。

2.4 光催化性能测试

以质量浓度为 10 mg/L 的 RhB 溶液为目标降解物,对样品进行光催化性能测试分析。将 Pd/BiF₃ 薄膜放入反应器中,加入 100 mL 的 RhB 溶液,开启小型鼓气泵(气速为 4.2 L/min)。采用模拟太阳光的 300 W 氙灯,光强为 200 mW/cm²,调节光源位置与反应液面距离,使其保持 10 cm。避光暗反应 1 h,打开氙灯且恒温水浴锅保持 30 °C 温度,每隔 0.5 h 取一次反应液,采用 Varian Cary 50 Probe 型紫外-可见分光光度计测定 RhB 的浓度。RhB 溶液的降解率(D)可表示为 $D = (1 - c_t/c_0) \times 100\%$,其中 c_0 和 c_t 分别为 RhB 的初始浓度和反应时间为 t 时的 RhB 浓度。

3 分析与讨论

图 1 是 BiF₃ 和 Pd 质量分数分别为 1.0%,

2.0%, 4.0%的 Pd/BiF₃ 薄膜的 XRD 图。与四方晶系 BiF₃ 标准卡片(JCPDS No. 51-944)对比可知,所制得的薄膜与 BiF₃ 的 (111)、(200)、(220)、(311)、(331)、(420)、(222)和(422)晶面的衍射峰在衍射角 $2\theta = 26.4^\circ, 30.5^\circ, 43.7^\circ, 51.7^\circ, 54.2^\circ, 63.5^\circ, 69.9^\circ, 72.0^\circ$ 处完全吻合,且 Pd/BiF₃ 薄膜未出现其他杂质衍射峰,表明贵金属 Pd 修饰并未改变 BiF₃ 的晶型结构,且 Pd 均匀地分散于 BiF₃ 薄膜上^[7]。

Pd/BiF₃ 薄膜光催化 100 mL 的 10 mg/L RhB 溶液的活性测试结果如图 2(a)所示。在模拟太阳光下照射 2 h 后, Pd(1.0%)/BiF₃, Pd(2.0%)/BiF₃, Pd(4.0%)/BiF₃ 薄膜光催化 RhB 的降解率分别为 76.7%、98.9%和 85.1%,均高于 BiF₃ 薄膜光催化降解 RhB 的效率(72.9%),可见,贵金属 Pd 的担载可提高 BiF₃ 薄膜的光催化活性,其中 Pd 的担载量(质量分数,全文同)为 2.0%时能达到最佳效果。薄膜光催化降解 RhB 溶液的速率常数为 $K_{app} = -(c_t/c_0)/t$,由图 2(b)可知, Pd(2.0%)/

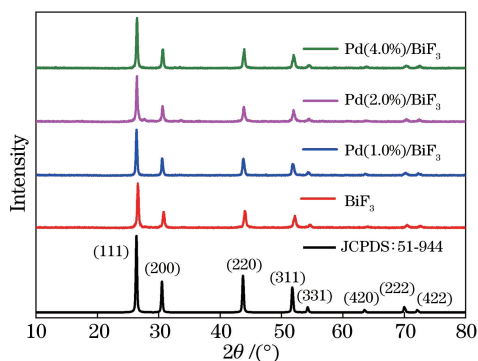


图 1 BiF₃ 和 Pd/BiF₃ 薄膜的 XRD 图

Fig. 1 XRD patterns of BiF₃ and Pd/BiF₃ thin films

BiF₃ 薄膜的反应速率常数为 $6.04 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$, 高于其他薄膜。图 2(c)给出了 Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜光催化性能的稳定性数据,结果表明,所制备的 Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜经过三次循环使用后,光催化活性降低较小, RhB 的降解率仍可达 82.8%。因此, Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜表现出较高的光催化活性和稳定性。

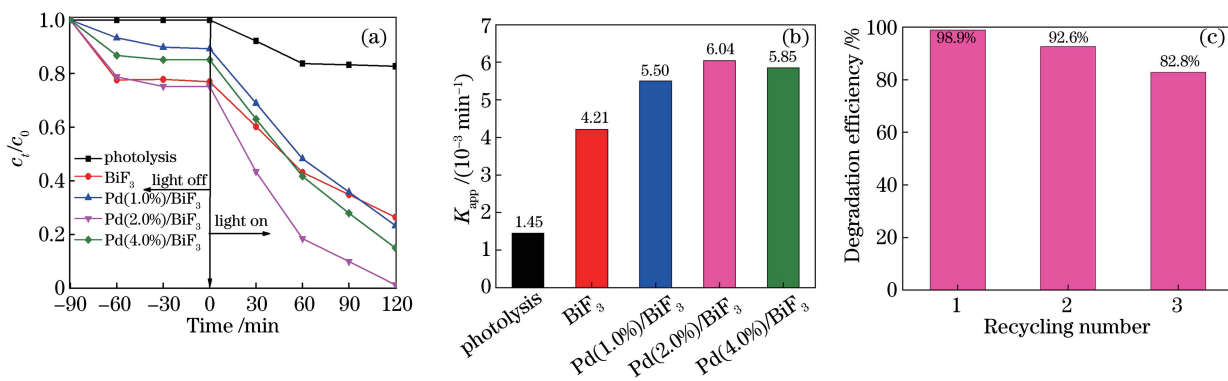


图 2 担载 Pd 前后 BiF₃ 薄膜的光催化活性。(a)光催化降解 RhB 的过程;(b)反应速率常数;(c) Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜的活性循环实验

Fig. 2 Photocatalytic activities of BiF₃ thin films before and after loading Pd. (a) Photocatalytic degradation of RhB; (b) kinetic rate constants; (c) photocatalytic recycling experiments of Pd(2.0%)/BiF₃ thin film

图 3 显示了 Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜的 XPS 图。由图 3(a)可知,样品中存在 C 1s、Bi 4f、F 1s 和 Pd 3d 的 XPS 特征峰,其中, C 1s 为吸附碳,其结合能是其他元素结合能的校准参考。在图 3(b)中, Bi 4f 的 XPS 图有 159.5 eV 和 164.7 eV 两个特征峰,这两个峰对应于 Bi 4f_{7/2} 和 Bi 4f_{5/2},说明 Bi 以 Bi³⁺ 价态存在^[8]。图 3(c)显示, F 1s 的 XPS 图在 683.5 eV 处存在唯一特征峰,表明薄膜样品中 F 元素以 F⁻ 形式存在^[9]。如图 3(d)所示, Pd 3d 的 XPS 图有 336.3 eV 和 341.8 eV 两个特征峰,说明在 Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜中, Pd 以单质形式分布于

BiF₃ 薄膜表面上^[10]。

催化剂的催化性能与其颗粒的结构形貌、尺寸大小和表面特征有关^[11]。图 4(a)~(d)是 BiF₃ 和 Pd/BiF₃ 薄膜的 SEM 图。对比发现, BiF₃ 薄膜的粒径大小均匀,纳米片交错分布,如图 4(a)所示;随着 Pd 质量分数的增加,其结构特征发生明显变化,如图 4(b)~(d)所示, Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜具有比较均匀的纳米片状结构,这与其具有最佳的光催化活性相吻合。与此同时, Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜的能量色散谱(EDS)显示薄膜表面均匀分布着 Pd、Bi 和 F 元素,如图 4(e)所示。

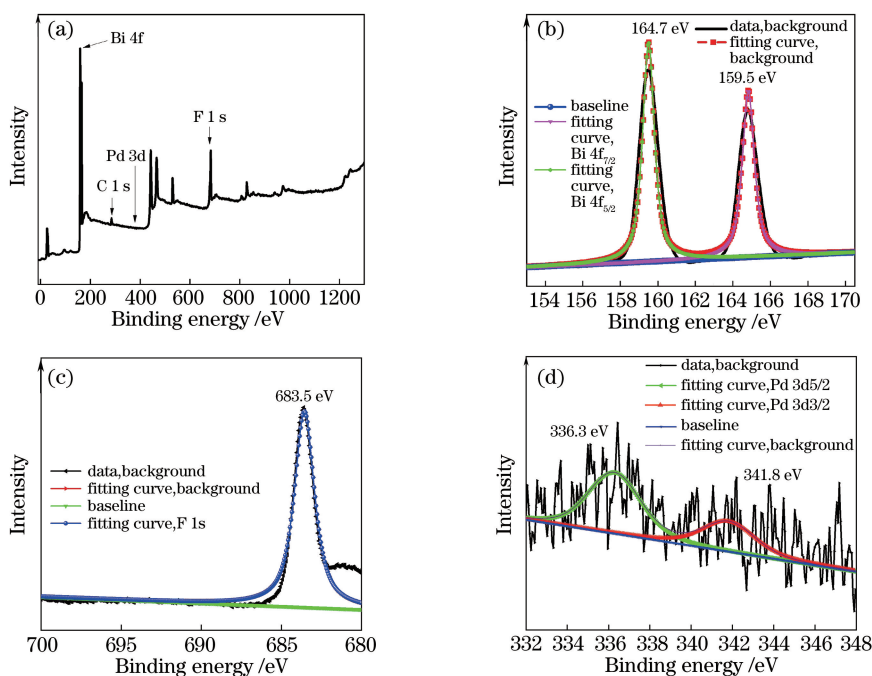


图 3 Pd(2.0%)/BiF₃ 的 XPS 图。(a)全谱图;(b) Bi 4f;(c)F 1s;(d) Pd 4f
Fig. 3 XPS spectra of Pd(2.0%)/BiF₃ thin film. (a) Survey; (b) Bi 4f; (c) F 1s; (d) Pd 4f

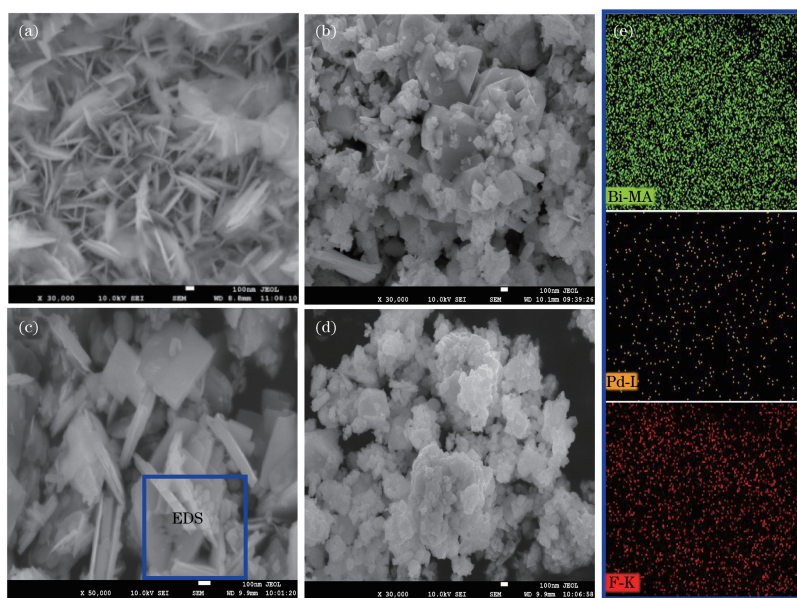


图 4 Pd/BiF₃ 薄膜 SEM 图和 EDS 分析。(a) BiF₃;(b) Pd(1.0%)/BiF₃;
(c) Pd(2.0%)/BiF₃;(d) Pd(4.0%)/BiF₃;(e) Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜的 EDS 分析
Fig. 4 SEM images and EDS analysis of Pd/BiF₃ thin film. (a) BiF₃; (b) Pd(1.0%)/BiF₃;
(c) Pd(2.0%)/BiF₃; (d) Pd(4.0%)/BiF₃; (e) EDS analysis of Pd(2.0%)/BiF₃ thin film

半导体光生电子与空穴对的分离效率对改善半导体的光催化性能非常关键,较高的瞬态光电流通常表征良好的光生电子与空穴的分离效果,即半导体的光催化性能较好^[12]。图 5(a)是 BiF₃ 和 Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜的瞬态光电流曲线。对比 BiF₃ 和 Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜的瞬态光电流数据,

不难发现,后者光电流强度明显高于前者,说明贵金属 Pd 负载于 BiF₃ 薄膜可提高 BiF₃ 薄膜的光生电子与空穴对的分离效率。Pd 产生的肖特基势垒以及 BiF₃ 薄膜导带上的电子转移到 Pd 纳米粒子上的双重作用促使光生电子和空穴发生有效分离,增强了有效载流子的迁移能力,进而提高了 BiF₃

薄膜的光催化性能,这也是 Pd 负载于 BiF₃ 薄膜后增强 BiF₃ 薄膜的光催化性能的主要原因^[13]。紫外-可见漫反射光谱(UV-Vis DRS)可以用于研究光催化剂的光响应能力^[14]。图 5(b)为 BiF₃ 和 Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜的紫外-可见漫反射光谱图。由图 5(b)可知,Pd 负载于 BiF₃ 薄膜后,光吸收带边由原来的 338 nm 增加到 408 nm,产生红移现象,

BiF₃ 薄膜的氧化性得到增强,且紫外光和可见光区域的吸收强度均有所提高,这与贵金属的表面等离子共振效应以及 Pd 和 BiF₃ 薄膜之间的肖特基势垒有关^[15-17]。可见,Pd 修饰 BiF₃ 薄膜不仅能实现 BiF₃ 薄膜的光生电子-空穴对的有效分离,还会增强其光吸收能力,进而有效改善其光催化性能。

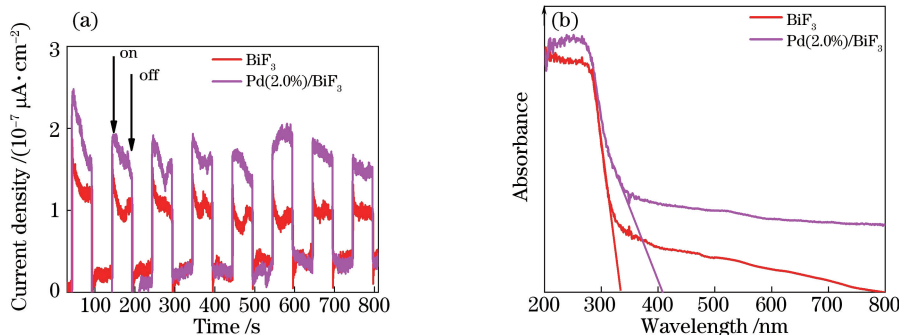


图 5 BiF₃ 和 Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜的光电性质。(a)瞬态光电流曲线;(b) UV-Vis DRS 图

Fig. 5 Optical and electrical performances of BiF₃ and Pd(2.0%)/BiF₃ thin films.

(a) Transient photocurrent curves; (b) UV-Vis DRS patterns

为了探索 Pd/BiF₃ 薄膜的活性物种,在光催化反应过程中,分别添加乙二胺四乙酸二钠(EDTA)、叔丁醇(TBA)和 N₂ 作为空穴(h⁺)、羟基自由基(·OH)和超氧自由基(·O₂⁻)的捕获剂^[18],结果如图 6(a)所示。可以看出,加入 EDTA 和 TBA 或

通入 N₂ 后,Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜光催化降解 RhB 的效率发生不同程度的降低,2 h 后 RhB 的降解效率分别为 90.44%、53.43%和 82.35%,表明在 Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜降解 RhB 过程中,活性物种发挥的作用由大到小的顺序为·OH、·O₂⁻、h⁺。

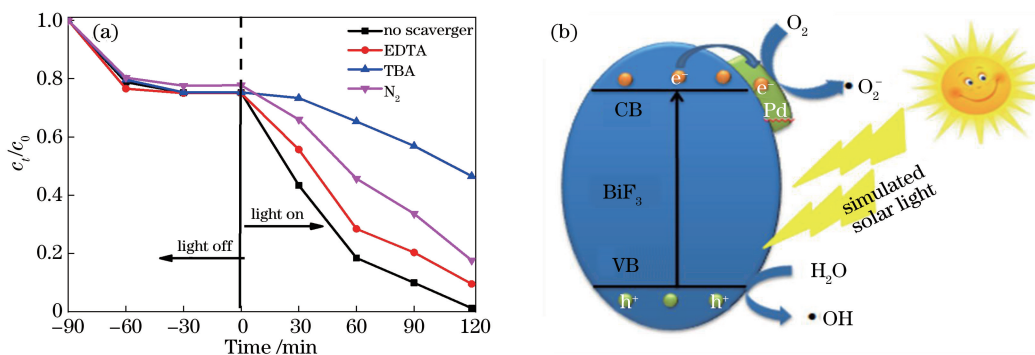


图 6 Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜的光催化机理。(a)活性物种捕获实验;(b)光催化反应机理

Fig. 6 Photocatalytic mechanism of Pd(2.0%)/BiF₃ thin film. (a) Capture experiment of active species;

(b) photocatalytic reaction mechanism

基于上述研究结果,我们提出了 Pd/BiF₃ 光催化薄膜降解 RhB 的反应机理,如图 6(b)所示,其中 CB 为导带,VB 为价带,e⁻ 为自由电子, O₂ 为氧气分子,H₂O 为水分子。在模拟太阳光照射 Pd/BiF₃ 时,BiF₃ 薄膜的价带电子会被激发到导带上,此时单质 Pd 充当电子陷阱捕获住 BiF₃ 薄膜导带上的电子,形成了有效电子,该电子与 Pd/BiF₃ 薄膜表面吸附的氧气 O₂ 反应生成氧化能力较强的·O₂⁻,进

而促使 BiF₃ 薄膜的光生电子-空穴对发生有效的分离^[19]。与此同时,BiF₃ 薄膜含有强氧化性的 h⁺,既可以氧化 RhB 又可以与 H₂O 发生相互作用形成氧化性物种·OH,这与捕获剂的实验结果吻合较好。另外,随着贵金属 Pd 粒子负载量的增加,由图 3(d)可知,Pd 纳米粒子会聚集成团,这不利于 Pd 单质的均匀分布,且易形成光生电子-空穴对的复合中心^[4],进而光催化效率降低。这也解释了

Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜具有最优光催化性能的原因。

4 结 论

基于 Bi 板采用原位电化学-光还原法合成了具有不同 Pd 负载量的 Pd/BiF₃ 薄膜,利用 XRD、XPS、SEM-EDS、UV-Vis DRS 等表征技术对 Pd/BiF₃ 薄膜进行了分析讨论。结果表明,BiF₃ 和 Pd/BiF₃ 薄膜具有良好的结晶相,且 Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜具有均匀的纳米片状结构;贵金属 Pd 均匀沉积于 BiF₃ 薄膜表面上,其负载量对薄膜的结构形貌和光吸收性能产生重要影响。Pd 粒子不仅增大了 BiF₃ 薄膜的光电流强度,促使光生电子-空穴对发生有效的分离,还引起 BiF₃ 薄膜的吸收带边发生红移,增强了 BiF₃ 薄膜的光吸收能力,有效改善了 BiF₃ 薄膜的光催化性能。当 Pd 的质量分数为 2.0%时,Pd/BiF₃ 薄膜经模拟太阳光照射 2 h 后,光催化降解 100 mL 的 10 mg/L RhB 溶液的效率达 98.9%,Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜具有最优的光催化性能。活性物种捕获实验表明,Pd(2.0%)/BiF₃ 薄膜光催化降解 RhB 的活性物种顺序为 ·OH, ·O₂⁻, h⁺, 并提出了其光催化性能增强机制。

参 考 文 献

- [1] Shi W L, Ren H J, Huang X L, et al. Low cost red mud modified graphitic carbon nitride for the removal of organic pollutants in wastewater by the synergistic effect of adsorption and photocatalysis[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 237: 116477.
- [2] Zhang K, Liu C, Huang F, et al. Study of the electronic structure and photocatalytic activity of the BiOCl photocatalyst [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2006, 68(3/4): 125-129.
- [3] Zhao Z, Li R, Zhang X C, et al. Electrochemical *in situ* synthesis and photocatalytic properties of BiF₃ thin films [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2018, 39(8): 1775-1781.
赵祖, 李瑞, 张小超, 等. 氟化铋薄膜的电化学原位合成及光催化活性[J]. 高等学校化学学报, 2018, 39(8): 1775-1781.
- [4] Chen Z G, Zhu L, Xia J X, et al. Synthesis of flower-like Pd/BiOCl composites via reactable ionic liquid and their enhanced photocatalytic properties [J]. Materials Technology, 2014, 29(4): 245-251.
- [5] Meng X C, Li Z Z, Chen J, et al. Enhanced visible light-induced photocatalytic activity of surface-modified BiOBr with Pd nanoparticles [J]. Applied Surface Science, 2018, 433: 76-87.
- [6] Yu C L, Cao F F, Li G, et al. Novel noble metal (Rh, Pd, Pt)/BiOX (Cl, Br, I) composite photocatalysts with enhanced photocatalytic performance in dye degradation [J]. Separation and Purification Technology, 2013, 120: 110-122.
- [7] Fardindoost S, Irajizad A, Rahimi F, et al. Pd doped WO₃ films prepared by sol-gel process for hydrogen sensing [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(2): 854-860.
- [8] Zhang S J, Chen X X, Song L M. Preparation of BiF₃/BiOBr heterojunctions from microwave-assisted method and photocatalytic performances [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 367: 304-315.
- [9] Yang Y, Teng F, Kan Y D, et al. Investigation of the charges separation and transfer behavior of BiOCl/BiF₃ heterojunction [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2017, 205: 412-420.
- [10] Di J, Xia J X, Yin S, et al. Reactable ionic liquid assisted synthesis of Pd modified BiOBr flower-like microsphere with high dispersion and their enhanced photocatalytic performances [J]. Materials Technology, 2015, 30(2): 113-121.
- [11] Sun X L, Chen P H, Zhou L, et al. Effect of polyethylene glycol on microstructure and self-cleaning properties of titanium dioxide films [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0116001.
孙喜莲, 陈鹏辉, 周浪, 等. 聚乙二醇对二氧化钛薄膜结构及其自清洁性能的影响 [J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0116001.
- [12] Wang P, Huang B B, Dai Y, et al. Plasmonic photocatalysts: harvesting visible light with noble metal nanoparticles [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2012, 14(28): 9813-9825.
- [13] Meng X C, Li Z Z, Zhang Z S. Highly efficient degradation of phenol over a Pd-BiOBr Mott-Schottky plasmonic photocatalyst [J]. Materials Research Bulletin, 2018, 99: 471-478.
- [14] Guo S, Wu Y, Gu T, et al. Preparation and characterization of solar-selective absorbers based on multilayered W/SiO₂ thin films [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0531001.
郭帅, 吴莹, 古同, 等. W/SiO₂ 基太阳光谱选择性吸收薄膜的制备和表征 [J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0531001.
- [15] Langhammer C, Yuan Z, Zoric I, et al. Plasmonic properties of supported Pt and Pd nanostructures [J]. Nano Letters, 2006, 6(4): 833-838.
- [16] Wei L J, Zhang H M, Cao J, et al. Electrospinning fabrication of Ag/WO₃ nanofibers and photocatalytic performance [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2019, 40(1): 39-44.

- 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.
- [17] Wang J L, Liu X Z, Deng Y X, et al. Fabrication and optical properties of tin oxide thin films by solution process [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (10): 1031001.
王佳良, 刘贤哲, 邓宇熹, 等. 溶液法制备氧化锡薄膜及光学特性研究 [J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1031001.
- [18] Guo W, Qin Q, Geng L, et al. Morphology-controlled preparation and plasmon-enhanced photocatalytic activity of Pt-BiOBr heterostructures [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 308: 374-385.
- [19] Wei Y H, Han S B, Walker D A, et al. Enhanced photocatalytic activity of hybrid Fe₂O₃-Pd nanoparticulate catalysts [J]. Chemical Science, 2012, 3(4): 1090-1094.