

文章编号 1004-924X(2024)05-0653-08

Ag/Bi₂O₃ 纳米块自供能紫外探测器的制备及性能

方向明¹, 周起成², 孙宇², 乔志铭², 耿秋丹², 高世勇^{2*}

(1. 太原学院 材料与化学工程系, 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)

摘要:为了实现在无外部供能下对紫外光的有效探测, 基于 Ag 修饰的 Bi₂O₃ 纳米块 (Ag/Bi₂O₃) 纳米块制备了自供能紫外探测器。通过煅烧法制备 Bi₂O₃ 纳米块, 随后采用室温溶液法在其表面沉积 Ag 纳米粒子, 进而成功制备了 Ag/Bi₂O₃ 纳米块, 且对所制备样品的晶体结构和微观形貌等进行了表征。结果表明, Ag/Bi₂O₃ 纳米块的平均尺寸约为 1 μm, 且 Ag 纳米粒子随机分布在 Bi₂O₃ 纳米块表面。将涂覆 Ag/Bi₂O₃ 纳米块的 FTO 作为工作电极, 并进一步构建了自供能紫外探测器。在 365 nm 的紫外光照射下, Ag/Bi₂O₃ 纳米块紫外探测器能在零偏压下实现对紫外光的快速检测, 这证实其具有自供能特性。相比于 Bi₂O₃ 纳米块紫外探测器, Ag/Bi₂O₃ 纳米块紫外探测器的光电流得到明显提升, 上升和下降时间分别缩短至 29.1 ms 和 40.2 ms, 并具有良好的循环稳定性。

关键词: 紫外探测器; Bi₂O₃ 纳米块; Ag 纳米粒子; 自供能探测

中图分类号: TN36 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243205.0653

Preparation and performance of self-powered Ag/Bi₂O₃ nanoblocks ultraviolet photodetector

FANG Xiangming¹, ZHOU Qicheng², SUN Yu², QIAO Zhiming², GENG Qiudan², GAO Shiyong^{2*}

(1. Department of Materials and Chemical Engineering, Taiyuan University, Taiyuan 030032, China;

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

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

Abstract: To effectively detect ultraviolet (UV) light without an external power source, a self-powered UV photodetector (UVPD) was developed using Ag/Bi₂O₃ nanoblocks. Initially, Bi₂O₃ nanoblocks were prepared through a calcination process, followed by the successful synthesis of Ag/Bi₂O₃ nanoblocks by depositing Ag nanoparticles on their surface via a solution reaction method at room temperature. The crystal structure and microstructures of the samples were analyzed, revealing that the Ag/Bi₂O₃ nanoblocks had an average diameter of approximately 1 μm, with Ag nanoparticles randomly distributed on the surface of the Bi₂O₃ nanoblocks. The Ag/Bi₂O₃ nanoblocks were then coated on FTO as the working electrode, leading to the construction of the self-powered UVPD. Upon exposure to UV light (365 nm), the Ag/Bi₂O₃ nanoblocks UVPD quickly detected UV light at zero bias voltage, showcasing its self-powered capability. Compared to the Bi₂O₃ nanoblocks UVPD, the Ag/Bi₂O₃ nanoblocks UVPD displayed significantly im-

收稿日期: 2023-10-11; 修订日期: 2023-11-19.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2019YFA0705201); 山西省高等学校科技创新项目 (No. 2022L590); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. HIT. DZJJ. 2023002); 太原学院一般科研项目 (No. 23TYBYB09)

proved photocurrents, with rise and decay times reduced to 29.1 ms and 40.2 ms, respectively, and demonstrated excellent cycling stability.

Key words: ultraviolet photodetector; Bi_2O_3 nanoblocks; Ag nanoparticles; self-powered detection

1 引言

近年来,随着光电技术的快速发展,紫外探测器广泛应用于导弹制导、雷达监测、无线通讯、火灾预警和医学检测等领域^[1-3]。特别是基于宽带隙半导体的紫外探测器,由于响应速度快、结构简单和成本低,成为当前的研究热点。目前, ZnO ^[4], TiO_2 ^[5], Ga_2O_3 ^[6]和 WO_3 ^[7]等宽带隙半导体材料已应用于制备紫外探测器。作为一种典型的宽带隙半导体材料, Bi_2O_3 具有折射率高,光学性质优异,光电导性良好,化学稳定性高和成本低等特点,是一种制备高性能紫外探测器的理想材料。Praveen等通过水热方式合成了 Bi_2O_3 纳米纤维,并在紫外光范围内实现了有效的探测,探测率达到 10^9 Jones^[8]。Wu等报道的 Bi_2O_3 纳米片紫外探测器^[9],对365 nm紫外光的探测速度快至870 μs 。然而,光生载流子的快速复合严重影响了基于 Bi_2O_3 材料的紫外探测器的光电探测性能。

目前,提升光电探测性能的方法主要包括构筑异质结^[10],元素掺杂^[11]和贵金属纳米粒子修饰^[12]。其中,贵金属纳米粒子可以和半导体材料在界面处形成肖特基势垒,不仅能够促进电子-空穴对的有效分离,而且可以加快界面处载流子的输运效率,因此,贵金属纳米粒子修饰被认为是提升半导体光电探测效率的有效途径^[13-14]。当前,Ag,Au,Pt和Pd已经用于半导体修饰以改善光电探测效率^[15]。在这些贵金属中,Ag纳米粒子作为一种重要的纳米材料,因其分散性好、稳定性强、成本低,并且在室温下即可实现制备,引起了人们的研究兴趣^[16-17]。Li等通过共沉积的方式在 Bi_2O_3 纳米片表面沉积了Ag纳米粒子,发现Ag纳米粒子的修饰显著提升了 Bi_2O_3 纳米片的载流子分离效率^[14]。Zhong等报道了Ag修饰的 Bi_2O_3 纳米球,与纯 Bi_2O_3 相比,Ag纳米粒子的存在减少了电子-空穴对的复合并显著提升了光吸收^[18]。Zhao等采用光还原技术得到了Ag修饰的

Bi_2O_3 颗粒,测试表明,Ag纳米粒子不仅加速了电子-空穴对的分离,也提升了光的利用效率^[19]。因此,通过Ag纳米粒子修饰可以抑制 Bi_2O_3 中电子-空穴对的快速复合,从而获得高性能的 Bi_2O_3 紫外探测器。然而,目前通过室温溶液法在 Bi_2O_3 纳米块表面修饰Ag纳米粒子并进一步应用于紫外探测的研究却很少。

本文通过煅烧法结合溶液法在 Bi_2O_3 纳米块表面修饰Ag纳米粒子,获得Ag/ Bi_2O_3 纳米块材料,并对其形貌、组分、结构以及光学性质进行表征。然后,以FTO玻璃为对电极组装了Ag/ Bi_2O_3 纳米块紫外探测器。在不同光强的紫外光照射下,详细研究了Ag/ Bi_2O_3 纳米块紫外探测器的光电探测性能,并对其光电探测机理进行了讨论。

2 实验

2.1 Ag/ Bi_2O_3 纳米块的制备

首先,采用煅烧法制备 Bi_2O_3 纳米块。将5水合硝酸铋置于坩埚中,将载有原料的坩埚放置在管式炉中,以5 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至520 $^\circ\text{C}$,持续反应2.5 h后自然降至室温并得到黄色固体,研磨成粉末后获得 Bi_2O_3 纳米块粉末。然后,使用溶液法制备Ag/ Bi_2O_3 纳米块。分别配置0.03 mol/L的硝酸银溶液和0.01 mol/L的抗坏血酸溶液,将二者均匀混合后在室温下通过持续磁力搅拌实现Ag纳米粒子的生长。随后,将所制备的 Bi_2O_3 粉末(1 g)加入含有Ag纳米粒子的混合溶液,继续低速磁力搅拌1 h后进行离心洗涤,自然干燥后得到Ag/ Bi_2O_3 纳米块粉末。

2.2 Ag/ Bi_2O_3 纳米块紫外探测器的组装

将所制备的Ag/ Bi_2O_3 纳米块粉末均匀地分散在去离子水中,然后均匀旋涂在FTO玻璃导电面上进一步烘干成膜作为工作电极。以清洗干净的另一块FTO玻璃为对电极,通过热封膜将工作电极和对电极进行热压封装,从而组装成

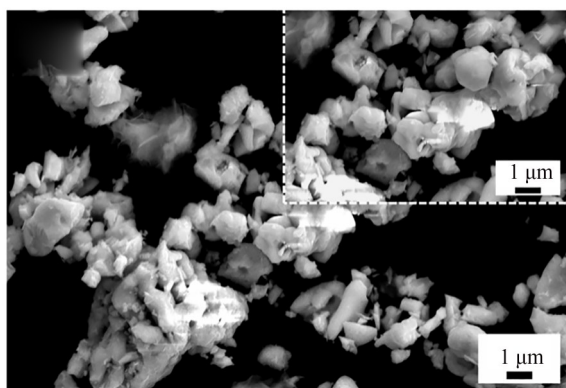
Ag/Bi₂O₃纳米块紫外探测器件,器件内部注入聚硫电解质后进行密封。为了比较性能,使用相同工艺制备了Bi₂O₃纳米块紫外探测器。

2.3 样品表征

利用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM, ZEISS Merlin Compact)以及X射线能谱仪(Energy Density Spectrometer, EDS)表征样品的表面形貌和元素组成。样品的晶体结构通过X射线衍射仪(XRD, Panalytical X'pert PRO)进行分析。使用拉曼光谱仪(HORIBA HR Evolution)测试了Bi₂O₃纳米块和Ag/Bi₂O₃纳米块的光学性质。将Ag/Bi₂O₃纳米块紫外探测器连接至Keithley 2400数字源表,使用365 nm的光作为模拟紫外光源,在零偏压下对器件的紫外探测性能进行测试。

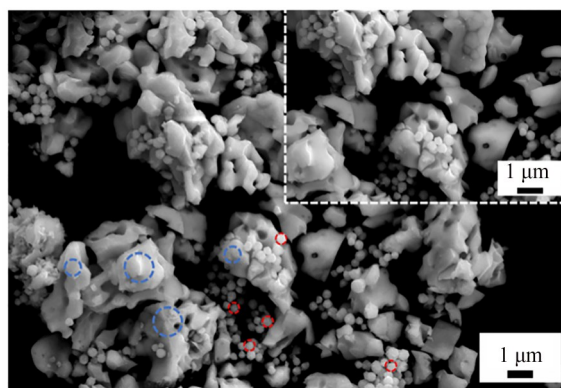
3 结果与讨论

通过SEM对Bi₂O₃纳米块和Ag/Bi₂O₃纳米块的表面形貌进行观察,结果如图1所示。由图1(a)能明显观察到分布均匀的Bi₂O₃为典型的块状结构,并且纳米块的尺寸相对均一。插图是对应的高倍SEM图,Bi₂O₃纳米块表面比较粗糙,平均尺寸约为1 μm。在Ag纳米粒子(红圈)修饰后,Bi₂O₃纳米块(蓝圈)形貌没有受到影响,基本保持原来的纳米块特征,并且在纳米块表面观察到随机分布的Ag纳米粒子(图1(b))。插图是Ag/Bi₂O₃的放大图,从图中清晰地看到尺寸均匀的Ag纳米粒子附着在Bi₂O₃纳米块上,形成了Ag/Bi₂O₃复合结构,其中Ag纳米粒子的直径约为200~300 nm。



(a) Bi₂O₃纳米块(插图为放大10000倍的SEM图)

(a) Bi₂O₃ nanoblocks (5000×), the inset displays the magnified SEM image(10000×)



(b) Ag/Bi₂O₃纳米块(插图为放大10000倍的SEM图)

(b) Ag/Bi₂O₃ nanoblocks(5000×), the inset displays the magnified SEM image (10000×)

图1 Bi₂O₃纳米块和Ag/Bi₂O₃纳米块的SEM图

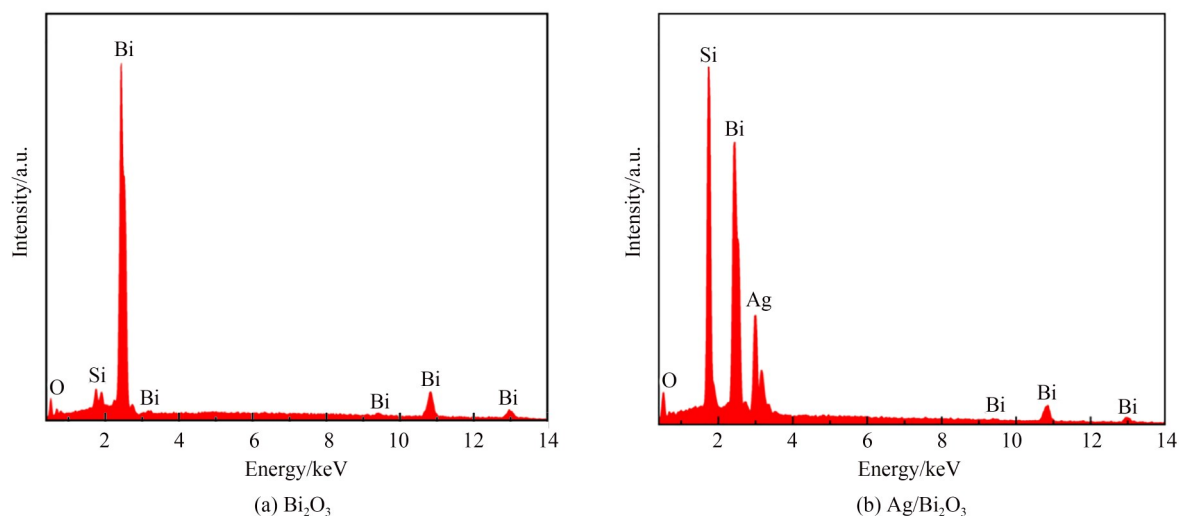
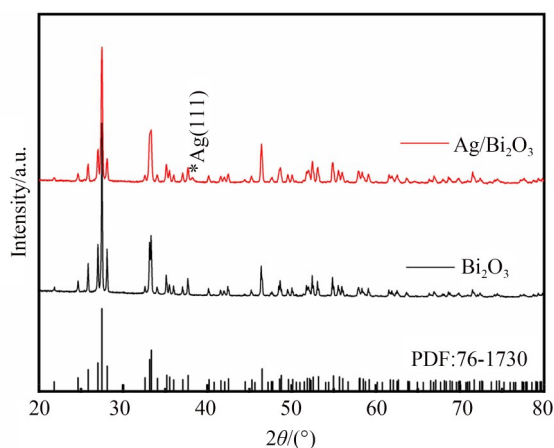
Fig. 1 SEM images of the Bi₂O₃ nanoblocks and Ag/Bi₂O₃ nanoblocks

为了进一步分析Bi₂O₃纳米块和Ag/Bi₂O₃纳米块的成分,所制备的样品通过EDS进行表征。如图2(a)所示,可以观察到占主导地位的Bi元素和O元素的特征峰,这对应于Bi₂O₃纳米块。当修饰Ag纳米粒子后,从图2(b)的能谱图中不仅能观察到Bi和O元素的特征峰,特别是在2.98 keV处观察到了Ag的尖锐特征峰,这表明Ag/Bi₂O₃纳米复合材料成功制备。此外,除了来自支撑衬底(用于形貌观察)Si元素的特征峰外,没有观察到其他的元素峰,表明所制备的Ag/Bi₂O₃纳米块的纯度较高。

使用XRD对样品的晶体结构进行测试,其

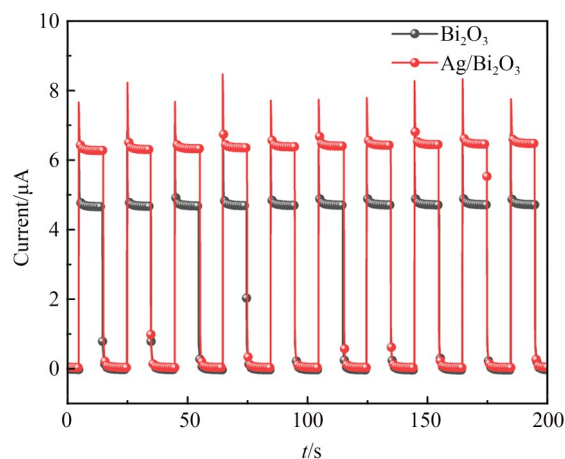
结果如图3所示。对于Bi₂O₃纳米块,位于2θ为27.5°的最强衍射峰被观察到,这对应于Bi₂O₃(JCPDS No. 76-1730)的(120)晶面^[20]。此外,其他剩余的衍射峰也能很好地匹配至Bi₂O₃的单斜晶相。而对于Ag/Bi₂O₃纳米块,除了观察到Bi₂O₃的所有特征峰外,还在38.2°位置观察到相对较弱的一个新的特征峰,对应于立方晶相结构Ag的(111)晶面(JCPDS No. 2-1098)^[21],这进一步证实了Ag/Bi₂O₃纳米复合材料的成功制备。

为了探究所制备探测器的探测性能,在无外加偏压下采用紫外光为模拟光源(365 nm, 15 mW/cm²),以开启光照10 s,关闭光照10 s为一

图2 Bi_2O_3 纳米块和 $\text{Ag}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ 纳米块的EDS能谱Fig. 2 EDS spectra of Bi_2O_3 nanoblocks and $\text{Ag}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ nanoblocks图3 Bi_2O_3 纳米块和 $\text{Ag}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ 纳米块的XRD图谱Fig. 3 XRD patterns of Bi_2O_3 nanoblocks and $\text{Ag}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ nanoblocks

个周期,记录了 $\text{Ag}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ 纳米块紫外探测器的电流响应曲线,如图4所示。当无紫外光照时, $\text{Ag}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ 纳米块紫外探测器并没有产生电流;当开启紫外光时,器件迅速产生 $6.4 \mu\text{A}$ 的光电流并保持稳定状态,关闭紫外光后器件快速恢复至初始状态。在重复开/光紫外光 10 个周期后, $\text{Ag}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ 纳米块紫外探测器表现出几乎相同的规律,并且光电流并没有出现明显的衰减,表明器件具有良好的循环稳定性。此外在相同条件下,对 Bi_2O_3 纳米块紫外探测器的光电探测性能也进行了测试。从图中明显观察到, Bi_2O_3 纳米块紫外探测器在紫外光照下同样产生快速的光响

应并表现出稳定的可循环性。然而,相较于 $\text{Ag}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ 紫外探测器, Bi_2O_3 紫外探测器的光电流仅为 $\text{Ag}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ 紫外探测器的 73% ($4.7 \mu\text{A}$),这也表明 Ag 纳米粒子的修饰能够有效提升 Bi_2O_3 纳米块紫外探测器的光电探测性能。

图4 Bi_2O_3 纳米块和 $\text{Ag}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ 纳米块紫外探测器的电流响应曲线Fig. 4 Current response of ultraviolet photodetectors (UVPDs) based on Bi_2O_3 nanoblocks and $\text{Ag}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ nanoblocks

响应时间通常表示器件对入射光的反应速度,是评价光电探测器的关键参数之一。通常而言,上升时间被定义为从初始值上升至最大光电流值的 63% 所消耗的时间,从光电流最大值下降至最大值的 37% 所用时间为下降时间^[22]。为了

获得 Bi₂O₃ 和 Ag/Bi₂O₃ 纳米块紫外探测器的响应时间,对其单个光电流周期的上升和下降边进行放大,其结果如图 5 所示。明显看出,Bi₂O₃ 纳米块紫外探测器的上升和下降时间被计算为 32.6 ms 和 79.2 ms(图 5(a))。在复合 Ag 纳米粒子后,上升和下降时间明显加快,分别达到 29.1 ms 和 40.2 ms,表明 Ag 纳米粒子的修饰对 Bi₂O₃ 纳米块紫外探测器的响应速度有较大提升(图 5(b))。

为了探究光强对 Ag/Bi₂O₃ 纳米块紫外探测器探测性能的影响,在零偏压下使用不同强度的紫外光测试了随时间变化的电流曲线。从图 6(a) 能发现,在 2~30 mW/cm² 的紫外光强下,

Ag/Bi₂O₃ 纳米块紫外探测器均能实现快速的紫外光探测,并展示出良好的循环稳定性。此外,明显观察到光电流随着紫外光强的增加而逐渐增大。为了进一步探究光电流和入射光强之间的关系,将光电流随紫外光强的变化关系进行拟合,如图 6(b) 所示。光电流几乎随着紫外光强的提升而线性增加,这与光生载流子效率和入射光通量的正比关系相一致^[23]。这些结果表明,Ag/Bi₂O₃ 纳米块紫外探测器拥有对入射紫外光实现精准探测的潜力。值得注意的是,Ag/Bi₂O₃ 纳米块紫外探测器的性能是在零偏压下进行测试的,这说明所制备的光电探测器具有自供能特性。

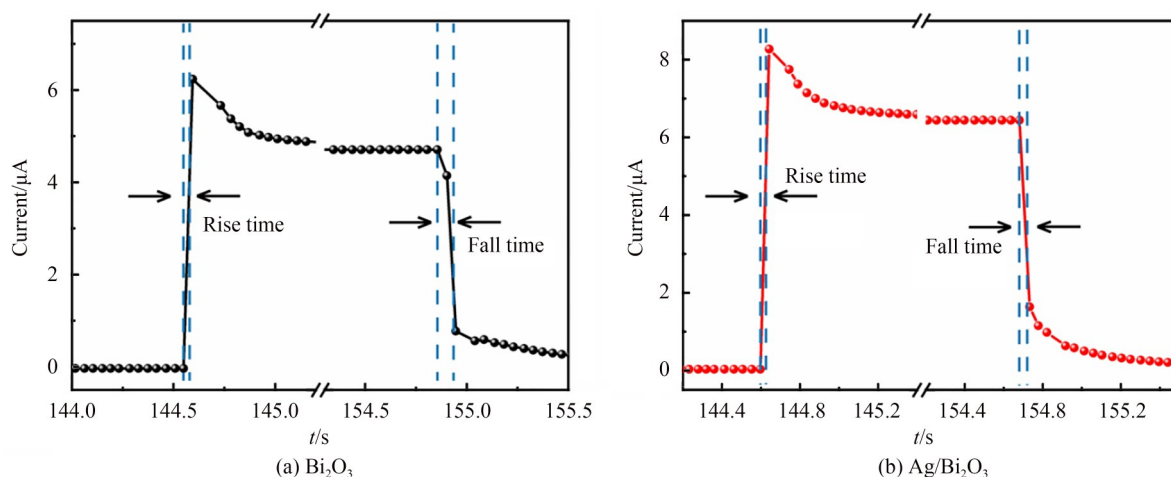


图5 Bi₂O₃ 纳米块和 Ag/Bi₂O₃ 纳米块紫外探测器单个周期的电流曲线

Fig. 5 Single-cycle current curves of UVPDs based on Bi₂O₃ nanoblocks and Ag/Bi₂O₃ nanoblocks respectively

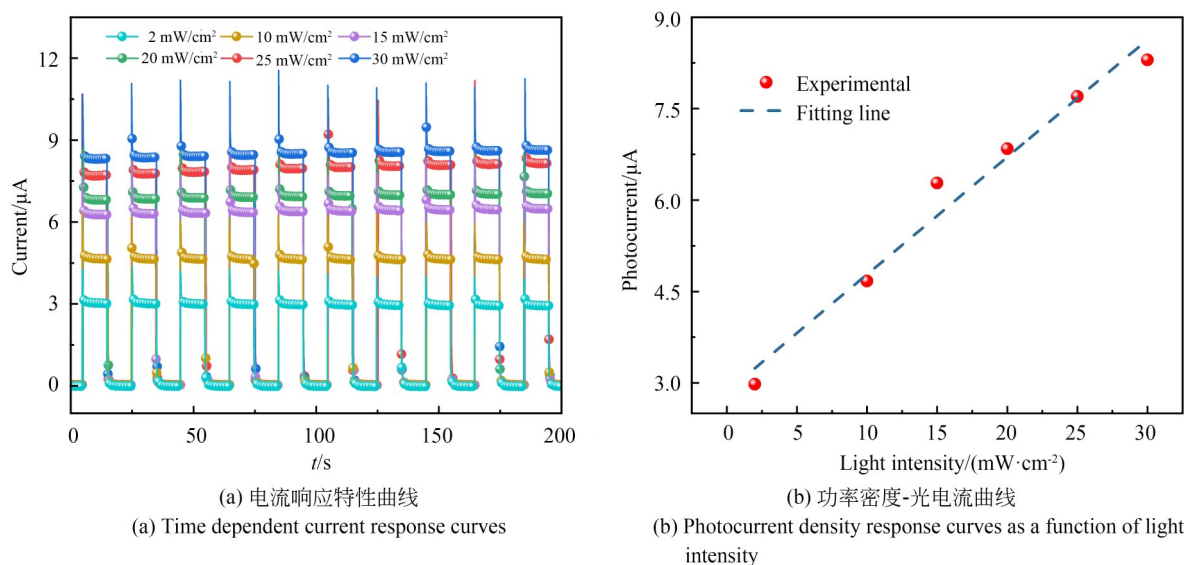


图6 Ag/Bi₂O₃ 纳米块紫外探测器在不同功率密度的紫外光照射下的电流响应特性曲线以及功率密度-光电流曲线

Fig. 6 UV photoresponse transients measured under different UV light intensities and corresponding photocurrent density as function of light intensity for Ag/Bi₂O₃ nanoblocks photodetector

为了分析所合成样品在 Ag 修饰前后的电子-空穴对的分离情况,对 Bi_2O_3 纳米块和 Ag/ Bi_2O_3 纳米块进行 PL 光谱测试。从图 7 能看出,纯 Bi_2O_3 纳米块在 400 nm 附近展示出一个宽发射峰,该发射峰的产生可能归结于 Bi_2O_3 材料中光生电子-空穴对的直接带隙复合^[24]。特别是,当 Ag 纳米粒子沉积在 Bi_2O_3 纳米块表面后,PL 发射峰的峰形并没有产生较大变化,但是发射峰的强度有所降低,这表明 Ag 纳米粒子和 Bi_2O_3 纳米块之间的相互作用明显减少了激子复合,提升了电子-空穴对的分离效率^[13]。

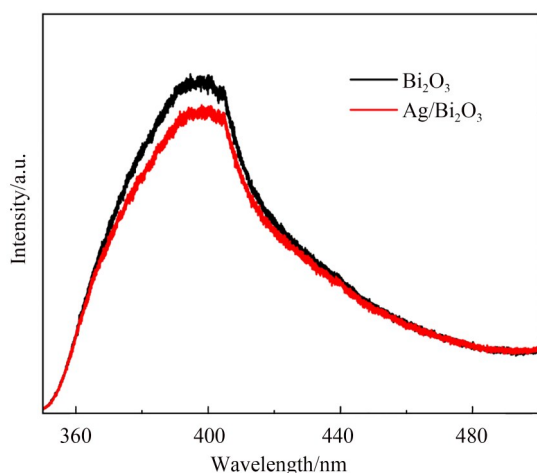


图 7 Bi_2O_3 纳米块和 Ag/ Bi_2O_3 纳米块的 PL 光谱

Fig. 7 PL spectra of Bi_2O_3 nanoblocks and Ag/ Bi_2O_3 nanoblocks

基于上述实验结果,分析了 Ag/ Bi_2O_3 纳米块紫外探测器的探测机理。当紫外光照射 Bi_2O_3 纳米块时,由于所吸收的光子能量高于其带隙,电子受到激发从价带跃迁至导带,在价带留下相同

数量的空穴,从而会产生光生电子-空穴对。当 Ag 纳米粒子负载在 Bi_2O_3 纳米块表面时,由于 Ag 的功函数高于 Bi_2O_3 ,Ag 负载 Bi_2O_3 后会发生肖特基接触进而形成肖特基势垒。因此,肖特基接触的存在会有效抑制 Bi_2O_3 纳米块中光生电子-空穴对的复合。同时,随着 Bi_2O_3 纳米块和电解液界面处的电子-空穴对的分离,电子会沿着外电路快速迁移至对电极附近。随后,电子会与来自对电极附近电解液中的 S_x^{2-} 反应得到 S^{2-} 和 S_{x-1}^{2-} 。迁移至 Bi_2O_3 纳米块表面的空穴被电解液中的 S^{2-} 捕获产生 S 单质, S 单质进而与 S_{x-1}^{2-} 反应得到 S_x^{2-} ^[25]。由于 S^{2-} 和 S_x^{2-} 的不断循环,Ag/ Bi_2O_3 纳米块紫外探测器实现了稳定、高效的紫外光探测。当紫外光关闭后,由于没有持续的光生电子-空穴对的产生,器件会迅速恢复至初始状态。

4 结 论

本文在室温条件下,利用溶液法在 Bi_2O_3 纳米块表面成功沉积了 Ag 纳米粒子,获得了 Ag 修饰的 Bi_2O_3 纳米块。研究发现,Ag 纳米粒子随机分布在 Bi_2O_3 纳米块表面,直径约在 200~300 nm。在紫外光照下,Ag/ Bi_2O_3 纳米块紫外探测器能在零偏压下迅速产生光响应,表明它具有自供能特性。相较于 Bi_2O_3 纳米块紫外探测器,Ag/ Bi_2O_3 纳米块紫外探测器的光电流明显提高至 6.4 μA ,并且在循环多次后依然保持高度稳定性。此外,Ag/ Bi_2O_3 纳米块紫外探测器的响应速度也得到了明显提升,上升和下降时间分别缩短至 29.1 ms 和 40.2 ms。Ag/ Bi_2O_3 纳米块紫外探测器在宽范围的紫外光强下依旧具有稳定探测的能力。

参考文献:

- [1] 陈星,程祯,刘可为,等. 镓基氧化物薄膜日盲紫外探测器研究进展[J]. 发光学报, 2023, 44(7): 1167-1185.
CHEN X, CHENG ZH, LIU K W, *et al.* Research progress in gallium based oxide thin film solar-blind ultraviolet photodetectors[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2023, 44(7): 1167-1185. (in Chinese)
- [2] 殷长帅,周剑,刘翊,等. 声表面波紫外光探测器的研究进展[J]. 光学精密工程, 2020, 28(7): 1433-1445.
YIN C SH, ZHOU J, LIU Y, *et al.* Research progress of surface acoustic wave ultraviolet detectors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(7): 1433-1445. (in Chinese)
- [3] MOON T H, JEONG M C, LEE W, *et al.* The fabrication and characterization of ZnO UV detector [J]. *Applied Surface Science*, 2005, 240 (1/2/3/4): 280-285.
- [4] BAI Z M, YAN X Q, CHEN X, *et al.* ZnO

- nanowire array ultraviolet photodetectors with self-powered properties [J]. *Current Applied Physics*, 2013, 13(1): 165-169.
- [5] ZHENG L X, YU P P, HU K, *et al.* Scalable-production, self-powered TiO₂ nanowell-organic hybrid UV photodetectors with tunable performances [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(49): 33924-33932.
- [6] KONG W Y, WU G A, WANG K Y, *et al.* Graphene- β -Ga₂O₃ heterojunction for highly sensitive deep UV photodetector application [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(48): 10725-10731.
- [7] KARTHIK YADAV P V, REDDY Y A K, AJITHA B, *et al.* Oxygen partial pressure dependent UV photodetector performance of WO₃ sputtered thin films [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 816: 152565.
- [8] PRAVEEN S, VEERALINGAM S, BADHULIKA S. A flexible self-powered UV photodetector and optical UV filter based on β -Bi₂O₃/SnO₂ quantum dots Schottky heterojunction [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2021, 8(15): 2100373.
- [9] WU J, WANG F K, LI H B, *et al.* Epitaxial growth of 2D ultrathin metastable γ -Bi₂O₃ flakes for high performance ultraviolet photodetection [J]. *Small*, 2022, 18(3): e2104244.
- [10] FU Z C, GAO S Y, YUAN Y, *et al.* A high-performance self-powered UV-visible-infrared broadband photodetector based on a solution-processed Bi₂Se₃/Se nanorods heterojunction [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2022, 9(16): 2200165.
- [11] MOHITE S V, RAJPURE K Y. Synthesis and characterization of Sb doped ZnO thin films for photodetector application [J]. *Optical Materials*, 2014, 36(4): 833-838.
- [12] 方向明,任帅,容萍,等. 自供能Ag/SnSe纳米管红外探测器的制备和性能研究[J]. *材料研究学报*, 2022, 36(8): 591-596.
- FANG X M, REN SH, RONG P, *et al.* Fabrication and infrared detection performance of Ag-modified SnSe nanotubes [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2022, 36(8): 591-596. (in Chinese)
- [13] ZHU G Q, QUE W X, ZHANG J. Synthesis and photocatalytic performance of Ag-loaded β -Bi₂O₃ microspheres under visible light irradiation [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(39): 9479-9486.
- [14] LI Y T, ZHANG Z F, ZHANG Y Y, *et al.* Preparation of Ag doped Bi₂O₃ nanosheets with highly enhanced visible light photocatalytic performances [J]. *Ceramics International*, 2014, 40(8): 13275-13280.
- [15] SELAMNENI V, RAGHAVAN H, HAZRA A, *et al.* MoS₂/paper decorated with metal nanoparticles (Au, Pt, and Pd) based plasmonic-enhanced broadband (visible-NIR) flexible photodetectors [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2021, 8(6): 2001988.
- [16] ZENG Y Y, PAN X H, DAI W, *et al.* The enhancement of a self-powered UV photodetector based on vertically aligned Ag-modified ZnO nanowires [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(82): 66738-66741.
- [17] MEITEI S R, NGANGBAM C, SINGH N K. Microstructural and optical properties of Ag assisted β -Ga₂O₃ nanowires on silicon substrate [J]. *Optical Materials*, 2021, 117: 111190.
- [18] ZHONG X, DAI Z, QIN F, *et al.* Ag-decorated Bi₂O₃ nanospheres with enhanced visible-light-driven photocatalytic activities for water treatment [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(85): 69312-69318.
- [19] ZHAO S Z, YANG Y, LU R, *et al.* Enhanced selective adsorption and photocatalytic of Ag/Bi₂O₃ heterostructures modified up-conversion nanoparticles [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(1): 107107.
- [20] ZHU L, WEI B, XU L L, *et al.* Ag₂O-Bi₂O₃ composites: synthesis, characterization and high efficient photocatalytic activities [J]. *CrystEngComm*, 2012, 14(18): 5705-5709.
- [21] KHAN F, BAEK S H, KIM J H. Investigation of the surface passivation mechanism through an Ag-doped Al-rich film using a solution process [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(2): 1007-1014.
- [22] RONG P, GAO S Y, ZHANG M Y, *et al.* Large-area hierarchical Bi₂O₃S flowers composed of 2D ultrathin nanosheets for high performance self-powered IR photodetector [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 928: 167128.
- [23] SANGKHARAT N, CHAIYUT N, KSA-PABUTR B, *et al.* Single-step synthesis process of interconnected spiderweb-like TiO₂ films as photoanode for self-powered ultraviolet-detector [J].

- Ceramics International*, 2016, 42(5): 5858-5864.
- [24] SOOD S, UMAR A, KUMAR MEHTA S, *et al.* α - Bi_2O_3 nanorods: an efficient sunlight active photocatalyst for degradation of Rhodamine B and 2, 4, 6-trichlorophenol[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(3): 3355-3364.
- [25] MCDANIEL H, FUKU N, MAKAROV N S, *et al.* An integrated approach to realizing high-performance liquid-junction quantum dot sensitized solar cells[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2887.

作者简介:

方向明(1982—),男,山西太原人,硕士,副教授,2008年于吉林大学获得硕士学位,主要从事光电材料制备与性能方面的研究。E-mail: fangxiangm@126.com

通讯作者:

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