

文章编号: 1000-7032(2023)10-1816-08

高增益 ZnO 肖特基紫外光电探测器光响应特性

段雨晗^{1,2*}, 蒋大勇^{1,2}, 赵 曼^{1,2}

(1. 长春理工大学材料科学与工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 光电功能材料教育部工程研究中心, 吉林 长春 130022)

摘要: ZnO 宽禁带半导体紫外光电探测器具有稳定性高、成本低等诸多优势, 在国防、医疗、环境监测等领域具有重要的应用前景。本文采用射频磁控技术在 SiO₂ 衬底上制备了 ZnO 薄膜, 在此基础上获得了具有高增益的金属-半导体-金属(MSM)结构的 ZnO 紫外光电探测器。10 V 偏压下, 探测器的响应度和外量子效率分别为 4.90 A/W 和 1668%。这是由于光照情况下, 半导体与金属界面处的空穴俘获产生高增益所导致的。此外, 进一步研究了增益效应、外加偏压和耗尽层宽度对 ZnO 紫外光电探测器响应度的调控规律与影响机制, 为高性能紫外光电探测器的研制与性能调控提供了重要的参考依据。

关键词: ZnO; 紫外光电探测器; 响应度; 增益效应; 耗尽层

中图分类号: O472

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230169

Responsivity Characteristics of ZnO Schottky Ultraviolet Photodetectors with High Gain

DUAN Yuhan^{1,2*}, JIANG Dayong^{1,2}, ZHAO Man^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Engineering Research Center of Optoelectronic Functional Materials, Ministry of Education, Changchun 130022, China)

* Corresponding Author, E-mail: duanyuhan@cust.edu.cn

Abstract: The wide bandgap semiconductor ZnO ultraviolet (UV) photodetector has many advantages, such as high stability, low cost, and has important application prospects in fields such as national defense, medical care, and environmental monitoring. In this work, ZnO thin films were fabricated on SiO₂ substrate using radio frequency magnetron sputtering. Subsequently, a ZnO UV photodetector with a high-gain metal-semiconductor-metal (MSM) structure was achieved. At a bias voltage of 10 V, the detector exhibited a responsivity of 4.90 A/W and an external quantum efficiency of 1668%. This high gain was attributed to the hole trapping at the semiconductor-metal interface under illumination. Furthermore, the modulation rules and influence mechanisms of gain effect, applied bias voltage, and depletion layer width on the responsivity of ZnO UV photodetector were thoroughly investigated. This research provides an important reference for the development and performance control of high-performance UV photodetectors.

Key words: ZnO; ultraviolet photodetector; responsivity; gain effect; depletion layer

1 引 言

紫外探测技术在导弹制导、紫外预警、保密通

讯、电网安全监测、人类医疗健康以及全球环境监测等领域具有重要的应用前景^[1-6]。紫外光电探测器是紫外探测技术的核心, 随着对半导体材料与

收稿日期: 2023-07-21; 修订日期: 2023-08-07

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(YDZJ202301ZYTS266); 吉林省科学技术协会项目(QT202223); 国家自然科学基金(62274016)
Supported by Science and Technology Development Plan Project of Jilin Province (YDZJ202301ZYTS266); Jilin Province Association for Science and Technology(QT202223); National Natural Science Foundation of China(62274016)

器件制备工艺研究的不断深入,宽禁带半导体材料的出现为高性能紫外探测器的研究和应用提供了新动力。宽禁带材料具有优异的频段选择性,可以有效屏蔽可见及红外光从而避免滤光设备的引入,而且其中多种金属氧化物半导体材料凭借性质稳定、成本低、制备工艺多样、电子和光学特性优异等特点已被广泛用作紫外探测器的感光材料^[7-8]。其中,具有纤锌矿结构的 ZnO 宽禁带氧化物半导体引起了越来越多的关注。ZnO 作为一种本征 n 型直接宽禁带半导体材料,具有较大的禁带宽度、高的激子束缚能^[9-11],呈现出优异的光电特性。此外,ZnO 材料还具有抗辐射性强、缺陷密度低、环境友好且化学性质稳定等优点,因此成为制备紫外光电探测器最理想的宽禁带半导体材料。

随着光电探测器的深入研究与发展,光电探测器的种类也日益繁多。按照光电半导体探测器结构划分,主要可以分为两种:光电导型光电探测器和光伏型光电探测器。光导型光电探测器具有内部光电流增益。该器件能够实现高响应,主要归功于器件内有源区半导体中的少数载流子陷阱效应引起的光电导增益^[12]。但是由于持续光电导效应,导致器件响应时间很慢,严重制约了其发展^[13]。与光导型光电探测器相比,光伏型光电探测器因其零功耗、电荷信号与光强成线性关系、能实现超快的时间响应和高灵敏度等诸多优势成为近年来人们研究的热点^[14-16]。目前,研究人员在基于 GaN、MgZnO、TiO₂ 等材料制备的光伏型光电探测器中普遍观察到增益效应的存在^[17-19]。已经提出了几种理论来解释这种增益机制,其中包括光电导增益^[20]、雪崩倍增^[21]以及半导体/金属界面上的空穴俘获^[22]。在肖特基型光电探测器中,耗尽层作为有效收集光生载流子的区域,在器件电流传输性质与光电响应行为中起着至关重要的作用。然而,关于 ZnO 紫外光电探测器中耗尽层与增益之间相互作用的影响机制尚不清楚。

本文采用磁控溅射技术在 SiO₂ 衬底上生长 ZnO 薄膜,利用紫外曝光与湿法刻蚀工艺制作了具有金属-半导体-金属(MSM)结构的紫外光电探测器,研究了外加偏压、耗尽层宽度与内增益对探测器光响应的影响机制,为紫外光电探测器性能的调控与优化提供一定的指导。

2 实 验

2.1 ZnO 薄膜制备与表征

采用高纯度 ZnO(99.99%)陶瓷靶材,利用射频磁控溅射技术在 SiO₂ 衬底上沉积 ZnO 薄膜。在沉积 ZnO 薄膜之前,依次使用丙酮、无水乙醇、去离子水在超声波清洗机中清洗 SiO₂ 衬底 10 min,去除表面有机物与油脂,然后用高纯度氮气将表面吹干。溅射腔体背底真空度为 5×10^{-4} Pa,工作气体为氧气和氩气,溅射过程中氧氩流量比为 10:40;溅射压强 0.6 Pa;溅射功率 150 W;托盘转速 5 r/min;衬底温度 400 °C,生长时间 3 h。

本文使用 JSM-6701F 冷场发射扫描电子显微镜(SEM)与 X 射线能量色散谱仪(EDS)分析 ZnO 薄膜的截面形貌与二维表面形貌,并获取样品表面的元素含量及其组成、元素分布等信息。使用 X 射线衍射仪(XRD)分析 ZnO 薄膜的晶体结构,X 射线源为铜靶(Cu, $\lambda_{\text{Cu}}=0.154\ 056\ \text{nm}$),测试管压为 40 kV,管流为 40 mA,采用步进式扫描,扫描步幅 $2(^{\circ})/\text{min}$,扫描范围 $20^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。使用 Perkin Elmer Lambda 950UV/VIS 分光光度计表征 ZnO 薄膜的紫外-可见吸收光谱与透射光谱。

2.2 ZnO 紫外光电探测器制备和表征

为了制备具有金属-半导体-金属(MSM)结构的探测器,采用直流溅射方法在制备的 ZnO 薄膜上沉积了一层 Au 膜(99.99%),通过紫外曝光与湿法刻蚀工艺将 Au 薄膜刻蚀为叉指电极,叉指电极共有 15 对,叉指长度 500 μm ,叉指宽度和叉指间距均为 5 μm 。

本文使用 Agilent B1500A 半导体分析仪测试 ZnO 紫外光电探测器在黑暗与特定波长光源照射条件下的电流-电压(I - V)特性曲线。在测试暗电流时,为隔绝光源影响,在暗室环境下进行测试,测试电压范围 $-65 \sim 65\ \text{V}$ 。测试光电流时,针对探测器的吸收波段,采用氙灯作为光源,利用光栅固定特定波长照射探测器。使用 Zolix DR800-CUST 测试系统测量 ZnO 紫外光电探测器的光谱响应特性,测试步幅为 5 nm,测试范围 200 ~ 500 nm。使用 Agilent B1500A 半导体分析仪并接入氙灯光源,利用光栅进行分光得到特定波长的入射光,采集探测器在有光和无光照条件下的电流-时间(I - t)曲线。所有测试均在室温下完成。

3 结果与讨论

Au/ZnO/SiO₂ 紫外光电探测器的制备流程和结构示意图如图 1 所示。

图 2(a) 为 ZnO 薄膜的 XRD 谱, 可以观察到, 在 34.68° 与 72.55° 处出现了对应于 ZnO(002) 面和 ZnO(004) 面的衍射峰, 且衍射峰半高宽较窄, 峰型尖锐, 并无其他衍射峰存在, 表明所制备的 ZnO 薄膜为单一六方相结构, 具有良好的 *c* 轴择优取向。利用 X 射线能量色散谱仪对薄膜进行元素定量分析, 实验结果如图 2(b)~(d) 所示。从图中可以明显看出薄膜由 Zn、O 元素组成, 分布均匀, 并无其他元素和杂质, 与 XRD 分析结果相吻合。

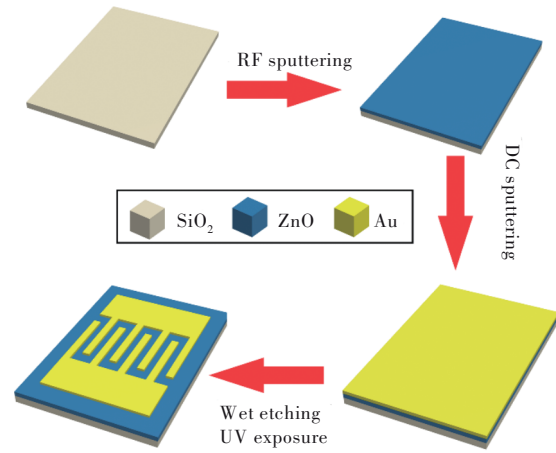


图 1 ZnO 光电探测器制备流程图

Fig.1 Flowchart for ZnO UV photodetector preparation

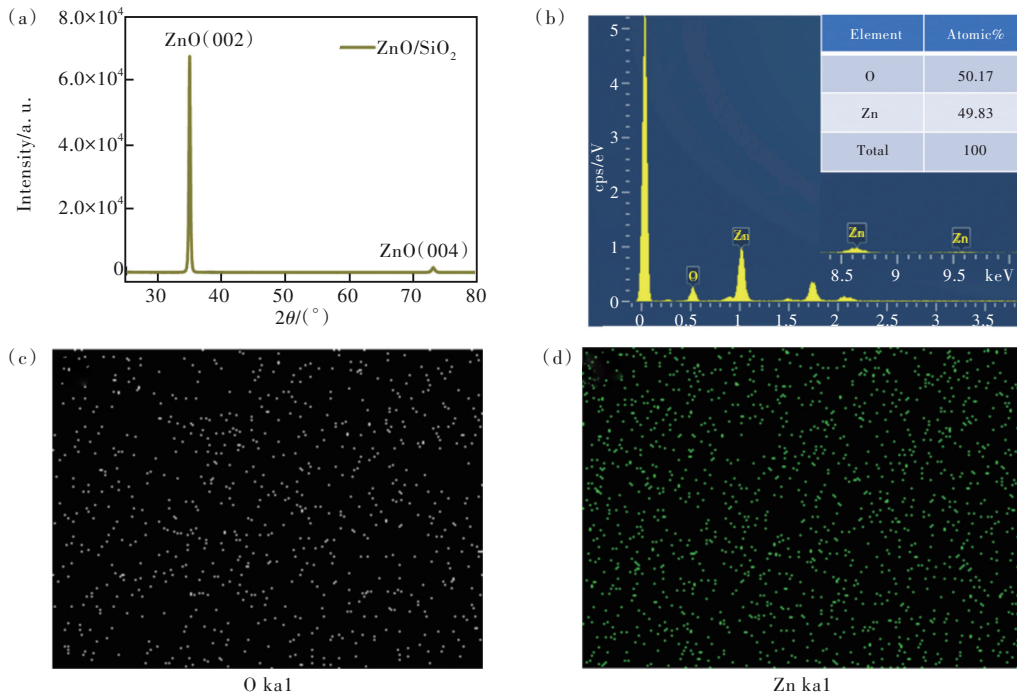


图 2 ZnO 薄膜的 XRD 谱(a)、EDS 图(b)、O(c)和 Zn(d)元素分布图。

Fig.2 (a)XRD pattern of ZnO. (b)EDS spectrum of ZnO film. Distribution of O(c) and Zn(d) elements.

ZnO 薄膜的横截面形貌与表面形貌 SEM 如图 3 所示, 可以观察到 ZnO 薄膜由多个柱状晶粒组成, 表面呈六方柱微晶结构, 晶粒紧密排列, 厚度为 546.9 nm。这种具有单一六方相结构的薄膜为后续制备高性能 ZnO 紫外光电探测器奠定了基础。

图 4(a) 为使用紫外-可见分光光度计测量的 ZnO 薄膜的紫外-可见吸收光谱与透射光谱。从图中进一步观察可以发现, ZnO 薄膜存在单一吸收边, 吸收截止边位于 365 nm 处, 并且在可见光区域的透射率大于 80%。这些特性表明 ZnO 材料

在紫外敏感光电探测器方面具有重要的应用。ZnO 作为一种直接跃迁带隙的半导体材料, 根据吸收光谱的结果, 利用 Tauc 公式^[23]计算 ZnO 薄膜的禁带宽度:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g), \quad (1)$$

其中 $h\nu$ 为光子能量, α 为吸收系数, A 为常数, E_g 为禁带宽度。通过绘制出公式(1)中 $(\alpha h\nu)^2$ 与 $h\nu$ 的关系曲线, 由该曲线线性外推计算 ZnO 的禁带宽度为 3.37 eV, 结果如图 4(b) 所示。以上实验结果表明已成功在 SiO₂ 衬底上制备了高质量的 ZnO 薄膜。

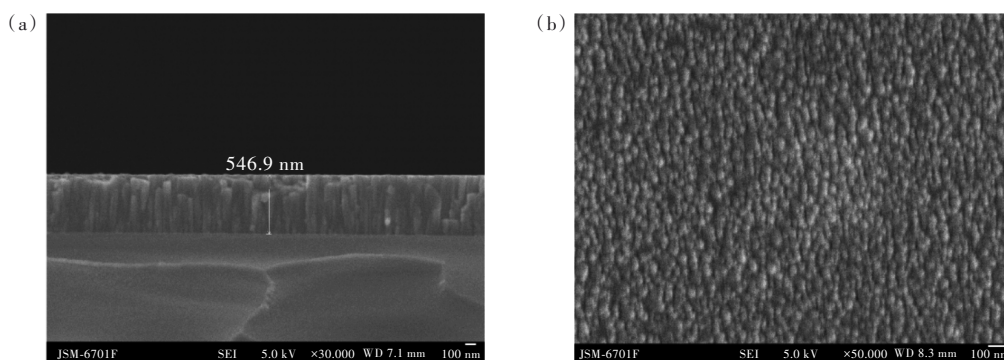


图 3 ZnO 薄膜的横截面形貌(a)和表面形貌(b)SEM 图

Fig.3 SEM image of cross-sectional morphology(a) and surface morphology(b) of ZnO film

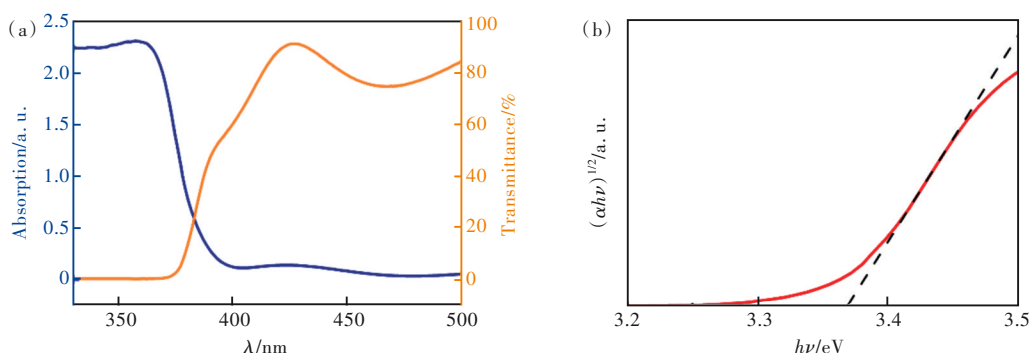


图 4 ZnO 薄膜的紫外-可见吸收与透射光谱(a)和禁带宽度计算结果(b)

Fig.4 (a)UV-Vis, absorption and transmission spectra of ZnO film. (b)The calculation results of band gap of ZnO film.

暗电流是衡量探测器电学性能好坏的重要指标之一,通过半导体分析仪测量了 ZnO 紫外光电探测器在黑暗条件下的 I - V 曲线,结果如图 5(a)所示。从图中可见,探测器的 I - V 曲线具有对称非线性,表明 ZnO 薄膜与 Au 形成了良好的肖特基接触。10 V 偏压下,探测器的暗电流为 1.65×10^{-8} A。图 5(b)展

示了 ZnO 紫外光电探测器在黑暗和紫外光照射 (365 nm) 条件下测量的光暗电流对数坐标曲线,探测器在 10 V 偏压下的光电流为 3.57×10^{-6} A,探测器的光暗电流比达到了 10^2 。说明探测器具有较低的噪声,在实际应用时,探测器具有较好的抗背景噪声干扰、分辨弱信号的能力^[24]。

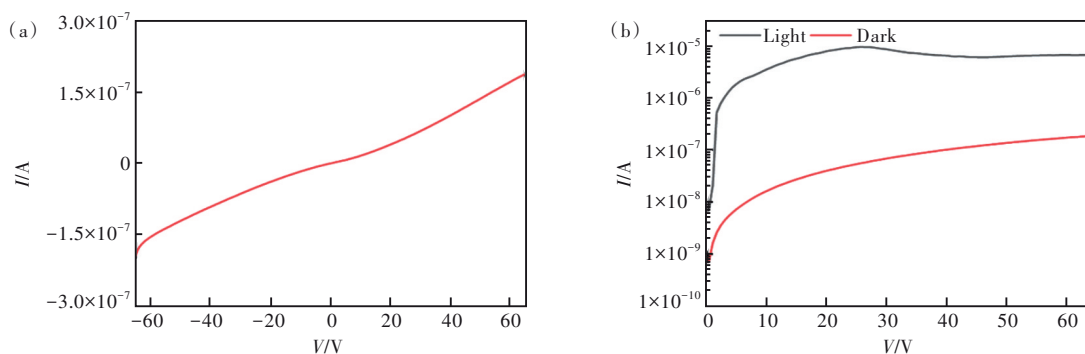


图 5 ZnO 紫外光电探测器的暗电流-电压(I - V)特性曲线(a)和对数坐标下的电流-电压曲线(b)

Fig.5 (a) I - V characteristic curves of ZnO UV photodetector. (b) I - V characteristic curves in logarithmic coordinate of ZnO UV photodetector.

图 6(a)为 ZnO 紫外光电探测器在 10 V 偏压下的响应度对数坐标曲线。探测器在入射光波长为 365 nm (光功率密度为 1.732 mW/cm^2) 处具有最大响应度为 4.90 A/W,响应截止边位于长波紫

外区,光电探测器的紫外可见抑制比达到 4 个数量级,表明探测器拥有出色的紫外探测性能。此外,作为评估光电探测器性能的重要指标,外量子效率(EQE) η_{EQE} 可以用下式描述:

$$\eta_{\text{EQE}} = \frac{Rhc}{q\lambda}, \quad (2)$$

其中 R 是响应度, h 是普朗克常数, c 是光速, q 是电子的电荷, λ 是入射光波长。通过计算得到 ZnO 紫外光电探测器在 10 V 偏压下的 η_{EQE} 值为 1668%, 这表明器件内部存在高增益。图 6(b) 是 10 V 偏压下 ZnO 紫外光电探测器的电流-时间($I-t$)特性曲线, 可以看出在 365 nm 紫外光照射下探测器展现出稳定且可重复的光开关特性, 上升和衰减时间分别为 0.3 s 和 0.5 s。图 7(a) 显示了系列偏压下 ZnO 紫外光电探测器的光谱响应度, 测

量的光谱范围为 200~500 nm, 偏压从 10 V 逐步增加到 65 V。从图中观察到一个有趣的现象: 随着偏压的增加, 探测器的响应度逐渐增大, 在 25 V 时达到峰值; 当偏压继续增加时, 响应度开始下降, 并在进一步增加偏压时再次轻微增强。为了更直观地分析这一现象, 图 7(b) 展示了峰值响应度随外加偏压的变化曲线。可以看出, 响应度的变化趋势分为三个阶段: 第一个上升阶段(10 ~ 25 V)、下降阶段(30 ~ 45 V)和第二个上升阶段(50 ~ 65 V)。由于增益效应对外加偏置电压的依赖, 第一阶段的响应度增幅比第二阶段略高。

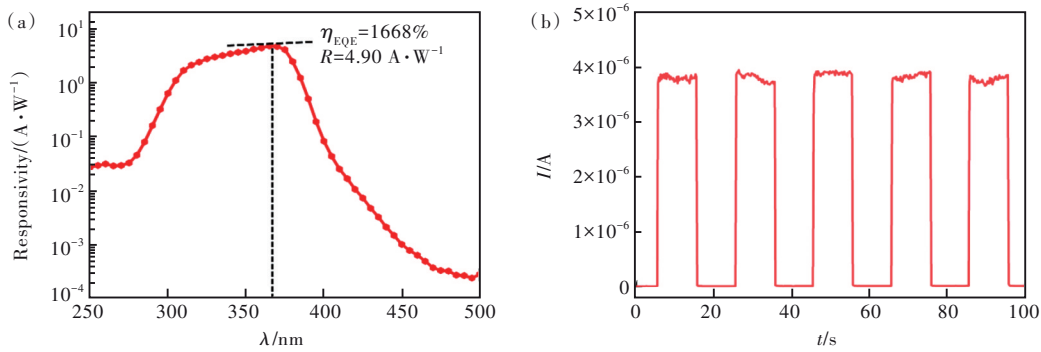


图 6 ZnO 紫外光电探测器对数坐标下的响应度图谱(a)和 $I-t$ 特性曲线(b)

Fig.6 (a) Logarithmic coordinate of responsivity spectra of ZnO UV photodetector. (b) $I-t$ characteristic curve of ZnO UV photodetector.

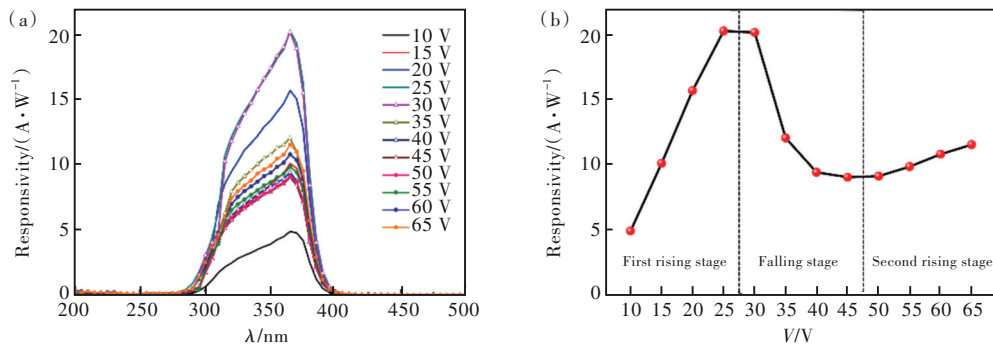


图 7 不同偏压下 ZnO 紫外光电探测器的响应度图谱(a)和峰值响应度(b)

Fig.7 (a) Responsivity of ZnO UV photodetector with different bias voltages. (b) Peak responsivity of ZnO UV photodetector with different bias voltages.

为了阐明肖特基型光电探测器的工作原理, 图 8 给出了 ZnO/Au 肖特基结的能带变化示意图。Au 的功函数为 5.1 eV^[25], ZnO 的电子亲和能为 4.5 eV, Au 与 ZnO 在接触前的能带图如图 8(a) 所示。ZnO 与 Au 形成接触时, 由于金的功函数大于 ZnO 的电子亲和能^[26], ZnO 中的电子向比它能级低的金属流动, 在 ZnO 表面形成一个正的空间电荷区, 即耗尽层^[27], 耗尽层内存在的电场造成能带向上弯曲, 即形成肖特基势垒, 如图 8(b) 所示。当

器件在紫外光照射下, 受光子激发会在耗尽层内产生新的电子-空穴对, 通过外界偏压电场, 电子和空穴克服并穿过势垒, 在肖特基界面分离并形成光电流。因此, ZnO 与 Au 接触形成的耗尽层在器件电流传输性质与光电响应行为中起着至关重要的作用。耗尽层宽度的计算公式为^[28]:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_1}{qN_d}(\varphi_0 + V)}, \quad (3)$$

其中 ε_0 是绝对介电常数, ε_1 是相对介电常数, q

是电子标准电荷量, N_d 是施主浓度, φ_0 是内建电场, V 是外加偏压。根据公式 (3) 可以看出, 随着外加偏压的增大, 反向偏置结区的耗尽层宽度增大 (左侧), 正向偏置结区的耗尽层宽度逐渐减小 (右侧), 探测器整体的耗尽层宽度是随偏压的增

加而逐渐展宽的, 展宽的耗尽层会显著提升探测器的响应度。因此, 我们认为 ZnO 紫外光电探测器响应度随偏压增加而发生变化是由增益效应、外加偏压和耗尽层宽度这三个因素共同作用的结果。

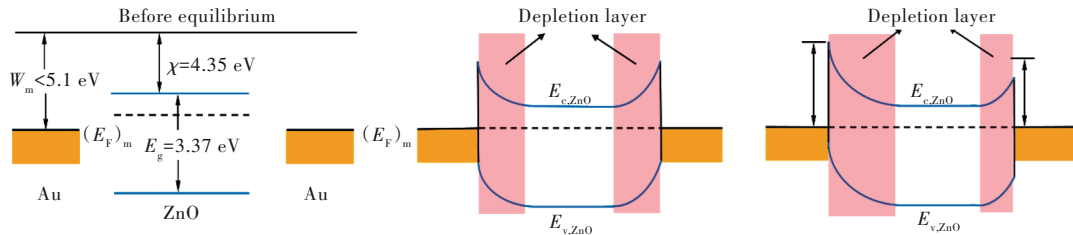


图 8 ZnO/Au 肖特基结在不同情况下的能带变化示意图。(a)平衡前;(b)平衡后;(c)外加偏压。

Fig.8 Energy band change diagram of ZnO/Au schottky junction in different cases. (a) Before equilibrium. (b) After equilibrium. (c) With bias voltage.

在探测器响应度第一个上升阶段 (10 ~ 25 V), 探测器响应度的增加主要有两个方面的贡献。一方面, 在紫外光照情况下, 受光子激发产生电子空穴对, 部分空穴被俘获, 电子被复合或者被电场扫向电极^[29]。被俘获的空穴从另一电极吸引电子, 由于电场的作用, 部分被吸引的电子还没有来得及和空穴复合就被电场扫走, 因此产生了比较大的内部增益。另一方面, 随着偏压的增加, 耗尽层宽度拓宽, 有效收集的光生载流子数目增加, 导致探测器表现出接近线性电压依赖的响应度。随着偏压继续增加 (30 ~ 45 V), 足够强的电场使被俘获的空穴从缺陷陷阱中逃逸出来, 导致增益效应减弱^[29]。尽管此时耗尽层宽度继续拓宽, 但其对探测器响应度的影响远远小于增益效应减弱所导致的响应度下降, 因此, 探测器的响应度随偏压的增加而减小。当偏压达到 50 V 时, 耗尽层宽度与电极间距相等并保持不变。随着偏压进一步增加到 65 V, 增益效应已经迅速衰减, 光生电子

空穴对在强电场作用下被有效地收集, 减少了被复合的几率, 导致探测器响应度再次略有增加。

为了定量评价 ZnO 紫外光电探测器的实际探测能力, 可以用另一个重要参数——比探测率 (D^*) 来表征, 比探测率的计算公式为^[30]:

$$D^* = \frac{R\sqrt{S}}{\sqrt{2qI_d}}, \quad (4)$$

其中 R 是探测器响应度, S 是探测器有效面积 ($8.25 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$), q 是电子标准电荷量, I_d 是探测器暗电流。通过计算得出 ZnO 紫外光电探测器在 10 V 偏压下的比探测率为 1.61×10^{12} Jones, 这表明该探测器在实际应用中, 能更好地区分微弱信号和噪声, 提高探测器整体探测性能。将本文所制备的 ZnO 紫外光电探测器性能参数与此前报道的其他 MSM 结构 ZnO 基紫外光电探测器性能参数进行比较, 汇总数据如表 1 所示^[7,31-33]。从表 1 中可以看出, 本文所制备的 ZnO 紫外光电探测器具有优异的光电性能并且拥有较高的比探测率, 而且制备方式简单, 器件稳定性好。

表 1 MSM 结构 ZnO 基紫外光电探测器性能参数比较

Tab. 1 Comparison of performance parameters of ZnO-based UV photodetector with MSM structure

材料	响应度/(A·W ⁻¹)	外量子效率/%	比探测率/Jones	参考文献
氟掺杂 ZnO	0.66	—	1.3×10^{10}	[31]
MgZnO	0.13	—	—	[7]
铝掺杂 ZnO	5.63	—	1.8×10^{12}	[32]
铋掺杂 ZnO	2.62	893.35	—	[33]
ZnO	4.90	1668	1.61×10^{12}	本文

4 结 论

本文采用射频磁控溅射方法设计并制备了

具有 MSM 结构的 ZnO 紫外光电探测器, 研究了外加偏压对 ZnO 紫外光电探测器响应度的影响规律。该探测器具有较高的增益, 低偏压 (10 V)

下的响应度和外量子效率分别为 4.90 A/W 和 1668%, 具有较强探测能力。随着外加偏压的增加, 探测器响应度出现先升高、再下降随后再次轻微增强的现象, 这是由于增益效应、外加偏压和耗尽层宽度共同作用所导致的。本文的研究结果为 ZnO 紫外光电探测器高增益的来源提供了一种解释, 加深了对 ZnO 紫外光电探测器高增

益来源的认识, 对进一步研究、应用和调控紫外光电器件性能, 实现高性能紫外光电探测提供了一定的理论指导。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230169>.

参 考 文 献:

- [1] CHEN J X, OUYANG W X, YANG W, *et al.* Recent progress of heterojunction ultraviolet photodetectors: materials, integrations, and applications [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(16): 1909909.
- [2] CHEN Y, WU Y, BEN J, *et al.* A high-response ultraviolet photodetector by integrating GaN nanoparticles with graphene [J]. *J. Alloys Compd.*, 2021, 868: 159281.
- [3] 李炳军, 江文杰, 梁永辉. 基于导弹羽烟紫外辐射的日盲型探测器 [J]. *航天电子对抗*, 2006, 22(6): 7-10.
LI B J, JIANG W J, LIANG Y H. Solar-blinded detector by UV radiation from missile plume [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2006, 22(6): 7-10. (in Chinese)
- [4] NASIRI N, JIN D Y, TRICOLI A. Nanoarchitectonics of visible-blind ultraviolet photodetector materials: critical features and nano-microfabrication [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, 7(2): 1800580.
- [5] HOU Y N, MEI Z X, LIANG H L, *et al.* Dual-band MgZnO ultraviolet photodetector integrated with Si [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(15): 153510.
- [6] CHEN H Y, LIU K W, HU L F, *et al.* New concept ultraviolet photodetectors [J]. *Mater. Today*, 2015, 18(9): 493-502.
- [7] 孙华山, 刘可为, 陈洪宇, 等. Au 电极厚度对 MgZnO 紫外探测器性能的影响 [J]. *发光学报*, 2015, 36(2): 200-205.
SUN H S, LIU K W, CHEN H Y, *et al.* Effect of Au electrode thickness on the performance of MgZnO UV detector [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(2): 200-205. (in Chinese)
- [8] 薛金玲, 马剑钢. 化学气相沉积法制备 β -Ga₂O₃ 纳米结构及其缺陷发光性质研究 [J]. *发光学报*, 2017, 38(10): 1273-1279.
XUE J L, MA J G. Defects luminescence behavior of β -Ga₂O₃ nanostructures synthesized by chemical vapor deposition [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(10): 1273-1279. (in Chinese)
- [9] WANG T, JIAO Z B, CHEN T, *et al.* Vertically aligned ZnO nanowire arrays tip-grafted with silver nanoparticles for photoelectrochemical applications [J]. *Nanoscale*, 2013, 5(16): 7552-7557.
- [10] KHAN S B, FAISAL M, RAHMAN M M, *et al.* Low-temperature growth of ZnO nanoparticles: photocatalyst and acetone sensor [J]. *Talanta*, 2011, 85(2): 943-949.
- [11] RIDHUAN N S, RAZAK K A, LOCKMAN Z. Fabrication and characterization of glucose biosensors by using hydrothermally grown ZnO nanorods [J]. *Sci. Rep.*, 2018, 8(1): 13722.
- [12] 陈洪宇, 王月飞, 闫璐, 等. 基于 Se 和有机无机钙钛矿异质结的宽光谱光电探测器制备及其光电特性研究 [J]. *中国光学*, 2019, 12(5): 1057-1063.
CHEN H Y, WANG Y F, YAN J, *et al.* Fabrication and photoelectric properties of organic-inorganic broad-spectrum photodetectors based on Se microwire/perovskite heterojunction [J]. *Chin. Opt.*, 2019, 12(5): 1057-1063. (in Chinese)
- [13] MOORE J C, THOMPSON C V. A phenomenological model for the photocurrent transient relaxation observed in ZnO-based photodetector devices [J]. *Sensors*, 2013, 13(8): 9921-9940.
- [14] ZHENG W, LIN R C, RAN J X, *et al.* Vacuum-ultraviolet photovoltaic detector [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(1): 425-431.
- [15] WU D, JIA C, SHI F H, *et al.* Mixed-dimensional PdSe₂/SiNWA heterostructure based photovoltaic detectors for self-driven, broadband photodetection, infrared imaging and humidity sensing [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2020, 8(7): 3632-3642.

- [16] TABARES G, HIERRO A, ULLOA J M, *et al.* High responsivity and internal gain mechanisms in Au-ZnMgO Schottky photodiodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(10): 101112.
- [17] ZHANG S K, WANG W B, SHTAU I, *et al.* Backilluminated GaN/AlGaIn heterojunction ultraviolet photodetector with high internal gain [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 81(25): 4862-4864.
- [18] ZHU H, SHAN C X, WANG L K, *et al.* Metal-oxide-semiconductor-structured MgZnO ultraviolet photodetector with high internal gain [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2010, 114(15): 7169-7172.
- [19] HOU Y N, MEI Z X, LIU Z L, *et al.* Mg_{0.55}Zn_{0.45}O solar-blind ultraviolet detector with high photoresponse performance and large internal gain [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 98(10): 103506.
- [20] MUÑOZ E, MONROY E, GARRIDO J A, *et al.* Photoconductor gain mechanisms in GaN ultraviolet detectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 71(7): 870-872.
- [21] GAO W, KHAN A S, BERGER P R, *et al.* In_{0.53}Ga_{0.47}As metal-semiconductor-metal photodiodes with transparent cadmium tin oxide Schottky contacts [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 65(15): 1930-1932.
- [22] KATZ O, BAHIR G, SALZMAN J. Persistent photocurrent and surface trapping in GaN Schottky ultraviolet detectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(20): 4092-4094.
- [23] TAUC J. Optical properties and electronic structure of amorphous Ge and Si [J]. *Mater. Res. Bull.*, 1968, 3(1): 37-46.
- [24] YOUNGBLOOD N, CHEN C, KOESTER S J, *et al.* Waveguide-integrated black phosphorus photodetector with high responsivity and low dark current [J]. *Nat. Photon.*, 2015, 9(4): 247-252.
- [25] CHEN S, TENG C J, ZHANG M, *et al.* A flexible UV-VIS-NIR photodetector based on a perovskite/conjugated-polymer composite [J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28(28): 5969-5974.
- [26] HSU C L, JHANG B Y, KAO C, *et al.* UV-illumination and Au-nanoparticles enhanced gas sensing of *p*-type Na-doped ZnO nanowires operating at room temperature [J]. *Sens. Actuators B*, 2018, 274: 565-574.
- [27] YANG Y, GUO W, QI J J, *et al.* Self-powered ultraviolet photodetector based on a single Sb-doped ZnO nanobelt [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97(22): 223113.
- [28] LIU R S, JIANG D Y, DUAN Q, *et al.* Origin of the responsivity characteristics of Au/ZnO/MgZnO and Au/MgZnO/ZnO structured ultraviolet photodetectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 105(4): 043505.
- [29] 蒋大勇. MSM 结构 MgZnO 短波紫外光电探测器的制备和特性研究 [D]. 长春: 中国科学院, 2009.
JIANG D Y. *The Fabrication and Characterization of Short Wavelength MgZnO MSM UV Photodetectors* [D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)
- [30] WANG P, LIU S S, LUO W J, *et al.* Arrayed van der Waals broadband detectors for dual-band detection [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(16): 1604439.
- [31] MUHAMMAD A, HASSAN Z, MOHAMMAD S M, *et al.* Enhanced sensitivity of low-cost fabricated fluorine doped ZnO metal semiconductor metal photodetector [J]. *Opt. Mater.*, 2021, 122: 111771.
- [32] KUMAR C, KUSHWAHA B K, KUMAR A, *et al.* Fibrous Al-doped ZnO thin film ultraviolet photodetectors with improved responsivity and speed [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2020, 32(6): 337-340.
- [33] FATHIMA N, PRADEEP N, BALAKRISHNAN J. Enhanced optical and electrical properties of antimony doped ZnO nanostructures based MSM UV photodetector fabricated on a flexible substrate [J]. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2019, 90: 26-31.



段雨晗(1994-),女,吉林长春人,博士,讲师,2021年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事宽禁带半导体材料与器件的研究。

E-mail: duanyuhan@cust.edu.cn