

Study on ZnO-Based UV Detector

Tianqing Li, Jun Yan

Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang
Email: m13159861083@163.com

Received: Feb. 3rd, 2019; accepted: Feb. 18th, 2019; published: Feb. 25th, 2019

Abstract

With the rapid development of optoelectronic technology, UV photodetectors are widely used in military and civilian fields. Among them, zinc oxide (ZnO) has been regarded as a promising candidate for UV photodetector for its strong radiation tolerance, high saturated drift rate, high breakdown voltage and low growth temperature. Since the performance of photodetectors is strongly dependent on the structural and optical properties of the material. Therefore, based on the development status of ZnO-based UV detectors at home and abroad, this paper introduces the characteristics of the typical structure of photoconductive ultraviolet detector, p-n junction UV detector and Schottky UV detector, optical properties of UV detectors prepared by different membrane methods such as laser pulse deposition and hydrothermal method. Finally, a UV detector prepared by sol-gel method is described in detail to achieve rapid response and strong responsivity. A ZnO-based UV detector with high spectrum selectivity ZnO filter layer is proposed. Through comparative analysis, it is concluded that the future ZnO-based UV detector will develop towards flexible, self-powered, tunable detection.

Keywords

Ultraviolet Photodetector, ZnO, Fast Response, High Spectrum Selectivity

ZnO基紫外探测器的研究

李天清, 闫 珺

哈尔滨师范大学, 黑龙江 哈尔滨
Email: m13159861083@163.com

收稿日期: 2019年2月3日; 录用日期: 2019年2月18日; 发布日期: 2019年2月25日

摘 要

随着光电子技术的快速发展, 紫外探测器广泛应用在军事和民用两大领域。其中ZnO基紫外探测器以其高耐辐射性, 高饱和漂移率, 高击穿电压和低生长温度等优势成为目前科学探究领域的新热潮。由于光

电探测器的性能强烈依赖于材料的结构和光学性质。因此, 本文基于国内外ZnO基紫外探测器的发展现状, 综合介绍了光电导型紫外探测器、p-n结型紫外探测器和肖特基型紫外探测器典型结构的性质特点, 归纳了化学气相沉积、激光脉冲沉积、水热法等不同制膜方法制备紫外探测器的光学性质。最后详细阐述了一种基于溶胶凝胶法制备的紫外探测器实现快速反应与强响应度, 一种加装ZnO滤波层实现强选择性的ZnO基紫外探测器。通过对比分析总结出未来ZnO基紫外探测器将向着柔性、自供能、可调谐探测发展。

关键词

紫外探测器, ZnO, 快速响应, 高光谱选择性

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现如今, 随之光电子信息和空间物理技术的快速发展, 对探测领域的研究备受重视。紫外探测器以其高响应度、高灵敏度、高稳定性的良好特性广泛应用于军用和民用两大领域[1] [2]。在军用方面中, 由于紫外辐射处于 10~400 nm 波段。因此可以利用其“日盲光谱区”在大气层中辐射为零, 且不存在人为噪声干扰等特性, 应用于紫外线制导、紫外线警告、紫外线通讯和紫外干扰[3]-[8]; 在民用领域中, 紫外探测又具有背景噪声小、不需制冷的优势, 即成为天文探测、医学、火焰探测、生物效应、水净化使用的优良器件[9]-[14]。此外针对传统的紫外探测器件, ZnO 作为一种重要的宽禁带半导体, 是具有光电、铁电、压电特性的宽禁带直接带隙的半导体材料。并且其具有熔点高, 无毒, 低外延生长温度, 低成本, 易刻蚀, 工艺加工方便等优点。同时, ZnO 基材料具有较宽的带隙可调范围(3.37~7.8 eV), 因此是制作紫外探测器的理想材料。本文围绕 ZnO 基紫外探测器, 简要介绍了光电导型紫外探测器和光伏型探测器的基本工作原理。并系统的讨论了 ZnO 基紫外探测器的研究进展。通过对比分析传统不同方法制备的 ZnO 薄膜的紫外探测器, 详细阐述了紫外探测器新型结构的未来发展前景和高效率制备方法的研究方向。

2. ZnO 基紫外探测器的原理, 结构及特点

光电探测器是一种把光辐射信号转化为电信号的功能器件, 其基本工作原理是基于光子同物质相互作用产生电子的光电效应。按照器件的构造, ZnO 基光电探测器可分为光电导型紫外探测器和光伏型紫外探测器。其中, 光电导型探测器是根据光电导效应探测光辐射的器件。其基本原理是足够能量的紫外光的光子作用在 ZnO 薄膜上, 薄膜吸收光子产生非平衡光生载流子, 光生载流子的出现引起 ZnO 基半导体的电导率增大, 这时在外加电压作用下探测器输出回路中即可产生光电压或光电流; 而光伏型探测器是利用了光伏效应, 即光照射到薄膜产生的电子-空穴对被内建电场分离, 形成与入射光相同功率的光生电动势。其中光伏型探测器又分为 p-n 结、p-i-n 结、肖特基势垒等形式, 几种不同类型的半导体紫外探测器结构如图 1。

3. ZnO 基紫外探测器的研究进展

3.1. ZnO 基 p-n 结型紫外探测器

由于 p 型 ZnO 材料缺乏, ZnO 基紫外光电二极管基本使用 n 型 ZnO 与其他 p 型材料构成异质 p-n

结, 最常见的是将 n-ZnO 薄膜在 p 型衬底上沉积。Jeong 等人[15]在 p-Si(100)上利用磁控溅射得到 n-ZnO 薄膜, 制作出 p-n 结型紫外探测器。在紫外区域, n-ZnO/p-Si 结型探测器在波长为 310 nm 的光照下, 光响应度为 0.5 A/W, 同时它还保持且增强了 Si 对可见光区域的光响应强度, 因此这种 n-ZnO/p-Si 结型探测器可以适用于紫外和可见光波长区域。Ohta 等人[16]报道了采用 n-ZnO/p-NiO 制作出的 p-n 结型紫外探测器, 该探测器在紫外区域显示出很好的光响应特性, 在波长为 360 nm 的光照下, 其光响应度为 0.3 A/W。

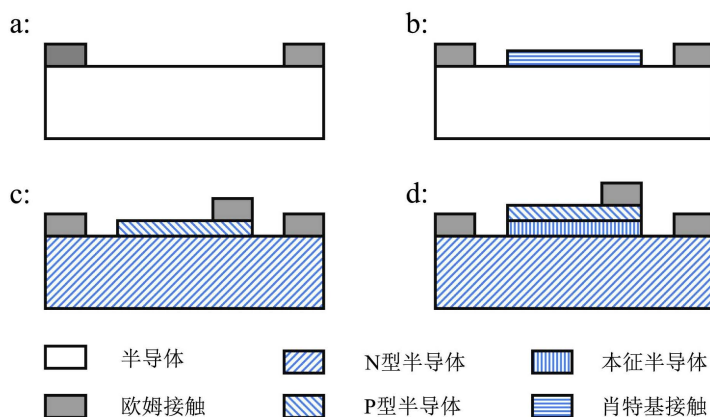


Figure 1. Schematic diagram of several different types of wide-forbidden semiconductor ultraviolet detectors; a: Photoconductor, b: Schottky photodiode, c: p-n junction photodiode, d: p-i-n photodiode

图 1. 几种不同类型宽禁带半导体紫外探测器结构示意图; a: 光电半导体, b: 肖特基光电二极管, c: p-n 结光电二极管, d: p-i-n 光电二极管

同时, 使用 p 型掺杂 ZnO 材料制作 ZnO 基同质 p-n 结紫外探测器也有报道。Moon 等人[17]利用磁控溅射技术生长出一层 900 nm 的 p-ZnO 在 GaAs 衬底上, 再溅射一层 300 nm 厚的 n-ZnO 层在 p-ZnO 层上, 首次制作出 p-n 同质结型紫外探测器。在 3 V 偏压下, p-n 同质结紫外探测器的光生电流为 2 mA。

3.2. ZnO 基肖特基紫外探测器

ZnO 基肖特基探测器, 实际上是在 n-ZnO 耗尽区内由入射光量子诱导产生电子-空穴对, 通过检测它的光电流实现对紫外光的探测。同光电导探测器相比, 肖特基结探测器具有快速反应和低噪声的特性, 但在制造肖特基接触的器件时, 需要制作极薄的金属接触电极, 这种电极要具有高稳定性和高紫外光透过性, 而且污染物、表面态以及表面缺陷也会对势垒高度和暗电流造成较大影响。

2001 年 Liang 等[18], 用掺氮 ZnO 薄膜, 用 Ag 制作叉指电极, 制备了 Ag-ZnO-Ag 结构肖特基紫外探测器。探测器在 5 V 偏压下的暗电流为 1 nA; 光响应度为 1.5 A/W; 光谱响应在 370~390 nm 之间, 在 370 nm 处有陡峭的截止边, 器件具有快速的光响应。2015 年 Zhangtongshuo 等, 利用基于溶液法制备的 ZnO 纳米晶的快速响应紫外光探测器。如图 2 和图 3: 在 5 V, 上升时间和设备的衰减时间是 20~350 ns 左右, 在 356 nm 处光响应度为 0.1 A/W。

4. 传统 ZnO 基紫外探测器薄膜的制备技术

4.1. 化学气相沉积法(CVD)

2004 年, 杨晓天[20]等报道了采用新型的等离子体辅助金属有机化学气相沉积(P-MOCVD)系统在蓝宝石、硅等衬底上生长出具有单一 C 轴取向、高阻的 ZnO 薄膜, 制备的 ZnO 基紫外探测器属光电导型器件, 器件采用 MSM 结构, 规格为 $80 \times 100 \mu\text{m}$, 使用叉指式电极, 结构如图 4 所示。探测器对紫外波段有响应, 响应峰值在 375 nm 附近。2006 年, Ying Li 等人[21]用 MOCVD 方法制成的 ZnO 基探测器的

截止波长为 368 nm, 且器件对蓝紫光也有响应。在制得的 ZnO 薄膜上溅射沉积 SiO₂ 或 Si₃N₄ 涂层后的电流比沉积前大 30 倍, 且沉积 SiO₂ 涂层提高了探测器的光响应度但延长了响应时间, 沉积 Si₃N₄ 涂层后降低了响应时间也降低了光响应度。

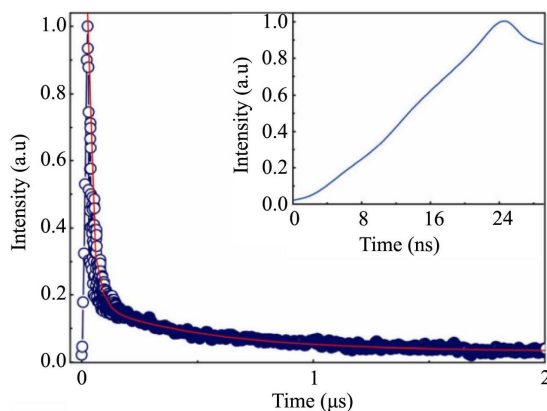


Figure 2. Photoresponse decay of the photodetector at 5 V, in which the scattered circles are experimental data, while the solid line is the fitting results to the experimental data using a two-order exponential decay formula, and the inset shows the detailed rise time of the device

图 2. 基于溶液法制备的 ZnO 紫外探测器 5 V 的光电探测器响应的衰减, 其中分散的圆圈是实验数据, 实线是使用二阶指数衰减公式的实验数据的拟合结果, 插图显示设备的详细上升时间

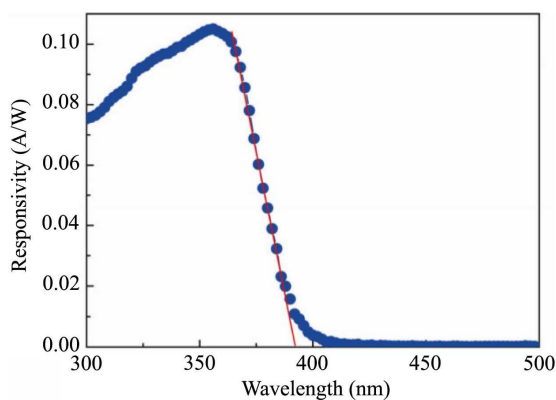


Figure 3. Response spectrum of ultraviolet photodetector based solution-processed ZnO nanocrystals at 5 V [19]

图 3. 基于溶液法制备的 ZnO 紫外探测器在 5 V 的光响应[19]

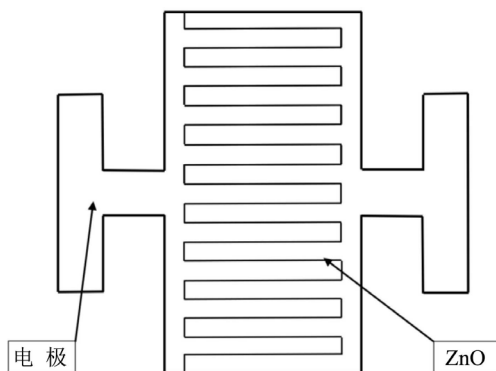


Figure 4. Inter digital structure of ZnO based UV detector

图 4. ZnO 基紫外探测器叉指结构

4.2. 脉冲激光沉积法(PLD)

浙江大学叶志镇小组[22]利用 PLD 在 Si(111)衬底上制得 C 轴高度择优取向的 ZnO 薄膜, 利用剥离技术制备了 ZnO 光电导型紫外探测器。ZnO 和极薄的 Al 叉指式电极形成了很好的欧姆接触。探测器的电阻值有 100 k Ω 左右。在 5 V 偏压下的光响应度为 0.5 A/W。

2007 年, ZHUANG 和 WONG 报道了用 PLD 法在 MgO(111)衬底上外延生长出高质量的 P 型 LNO 和 n 型 ZnO 异质结。室温下在整个红外和可见区, 异质结的光输出率平均为 50%~60%, 如图 5 所示。其在紫外区出现光响应峰及较大的光响应度。

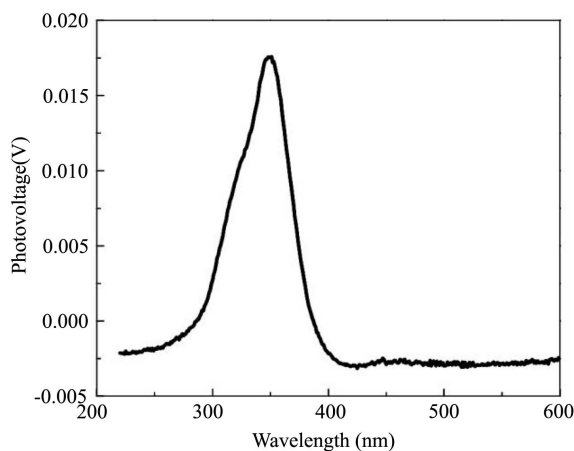


Figure 5. Optical response Curve of p-LNO/n-ZnO Heterojunction [23]

图 5. p-LNO/n-ZnO 异质结的光响应曲线[23]

4.3. 水热法

2005 年, 电子科技大学的高晖[24]等以 p-Si(111)为衬底, 用水热法首次制得六棱微管 ZnO, 制备了 Ag/n-ZnO 肖特基势垒结紫外探测器。Ag 和 ZnO 六棱管形成的有效肖特基势垒高度为 0.35 eV。在无光照时暗电流很小, 在 365 nm 的光照条件, 5 V 和 9 V 偏压下 Ag/n-ZnO 紫外探测器的光生电流分别为 25.6 μ A 和 57.9 μ A。Ag/n-ZnO 紫外探测器有明显的光响应特性和较高的量子效率, 在 366 nm 波长处, 光响应度为 0.161 A/W、量子效率为 54.7%。但响应对比度不高, 为提高 ZnO 对紫外光的响应, 须改进器件结构, 提高微管结晶质量, 改善 Ag/ZnO 表面态。

制备 ZnO 薄膜的方法有很多, 表 1 介绍了几种不同方法制作出的紫外探测器的响应时间。

5. 新型紫外探测器的制备技术

5.1. 基于溶胶凝胶法制备的 Au/ZnO/Au 结构紫外探测器

Zhang Tongshuo 等, 采用溶胶凝胶法在石英衬底上生长了用作紫外光电探测器活性层的 ZnO 纳米晶。醋酸锌($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 99.5%) 在室温下溶解在 1,2-丙二醇($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$, 99.5%) 和乙醇胺中(MEA, $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$, 99.0%) 制备的 ZnO 量子点溶液被旋涂在石英衬底上, 100 $^\circ\text{C}$ 干燥半小时, 然后在空气中 600 $^\circ\text{C}$ 退火半小时, 往复几次得到一定厚度的 ZnO 层, 在上面真空喷镀一个薄的金层, 通过光刻工艺制备叉指电极。测试霍尔, ZnO 薄膜呈现 n 型传导电子浓度 $1.9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 氧化锌薄膜的表面形貌显示在图 5 的插图中。纳米粒子的形貌为球形、柱状, 平均晶粒尺寸约为 60 nm。这些 ZnO 纳米粒子彼此紧密接触, 形成连续的薄膜。图 6 显示了氧化锌薄膜的 X 射线衍射(XRD)图谱。主要有三个谱峰, 分别对应于(100)、(002)

和(101)的 ZnO 纤锌矿结构平面。同时, 可以看出纳米 ZnO 薄膜定向于 C 轴。

Table 1. Comparison of the response time of the ZnO-based UV photo-detectors fabricated by different methods
表 1. 不同方法制备 ZnO 基紫外光探测器响应时间的比较

制备方法	响应时间	参考
激光脉冲沉积(PLD)	50 s (上升时间)	[25]
	120 s (下降时间)	
MOCVD	1 μ s (上升时间)	[26]
	1.5 μ s (下降时间)	
射频衍射	100 ns (上升时间)	[27]
	1.5 μ s (下降时间)	
分子束外延(MBE)	95 s (上升时间)	[28]
	2068 s (下降时间)	
溶胶凝胶法	20 ns (上升时间)	[19]
	350 ns (下降时间)	

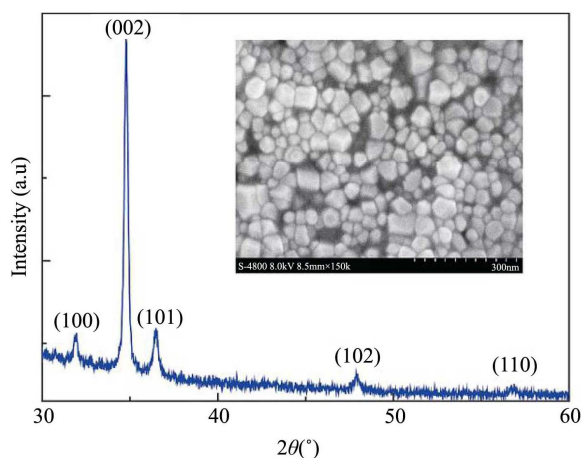


Figure 6. XRD pattern of the ZnO film, with the inset showing the surface morphology of the ZnO film
图 6. 氧化锌薄膜的 X 射线衍射图, 插图显示了 ZnO 薄膜的表面形貌

图 7 显示了氧化锌薄膜的吸收光谱。可见, 薄膜在紫外光谱区有很强的吸收能力, 而在可见光区几乎是透明的。一个吸收峰出现在 360 nm 左右, 对应于 ZnO 的激子吸收。观察到激子吸收可以归因于 ZnO 纳米晶的结晶质量好。图 2 的插图显示了在室温下的氧化锌薄膜 PL 光谱。约 377 nm 处的强辐射对应于 ZnO 的典型近带边发射, 而在 520 nm 附近的弱发射是由于缺陷相关的发射。结果表明, 该薄膜结晶质量好, 缺陷密度小。

ZnO 薄膜的厚度大约是 1 μ m。金叉指 500 μ m 长 5 μ m 宽电极间距也是 5 μ m。薄膜在黑暗和 356 nm 光照条件下的 I-V 曲线, 由曲线观察, 表明 Au/ZnO 界面已获得肖特基接触。

这个方案在肖特基结构上实现了基于 ZnO 纳米晶的快速响应紫外光探测器。在 5 V, 上升时间和设备的衰减时间是 20~350 ns 左右, 最大光响应度在 356 nm 光谱显示 0.1 A/W。这是报道的 ZnO 基光电探测器最快的响应时间之一。

5.2. 一种覆盖 ZnO 纳米颗粒的 Au/ZnO/Au 结构

这个工作通过将 ZnO 纳米颗粒层包覆在 Au/ZnO/Au 结构上实现了高光谱选择性和高响应度的紫外紫

外光电探测器。ZnO 纳米颗粒在这个结构中, 首先作为过滤器, 确保高光谱选择性, 其次也散射光, 将散射入射光进入随后的吸收层, 从而提高探测器的响应度。

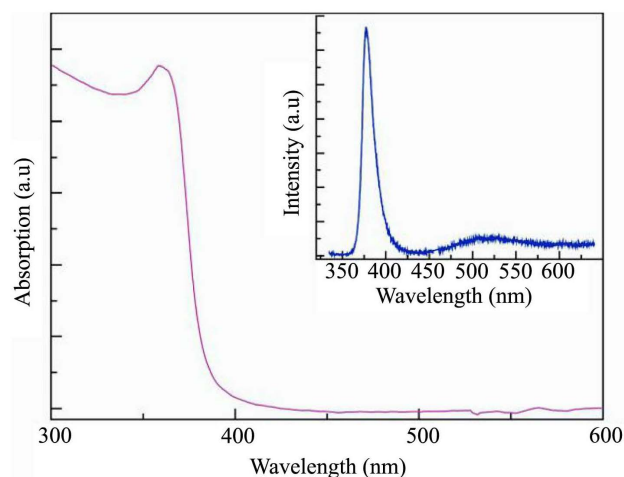


Figure 7. Room temperature absorption spectrum of the ZnO film, and the inset shows PL spectrum of the ZnO film [19]
图 7. ZnO 薄膜的室温吸收光谱, 插入图显示了 ZnO 薄膜的 PL 谱[19]

首先采用磁控溅射技术在蓝宝石衬底上沉积了作为有源层的 ZnO 薄膜, 使用金属锌(99.999%)作为靶点, 溅射功率 100 W, 混合氧气和氩气(1:1), 工作压力 1 Pa, 温度 300℃。

之后采用真空蒸发法在薄膜上蒸发薄金层, 通过光刻和湿法刻蚀工艺配置叉指电极。接着采用溶胶凝胶法制备的 ZnO 纳米颗粒浸涂上 Au/ZnO/Au 结构。分别在图 8(a)和图 8(b)中示出了 ZnO 薄膜和 ZnONPs (量子点)层的表面 SEM 图像。可以看出, ZnO 薄膜具有光滑的表面形态, 由许多小的纳米平均粒径为 20 nm 颗粒。ZnONPs 层表面粗糙, ZnONPs 平均尺寸约为 100 nm, 适合用作散射光的散射。

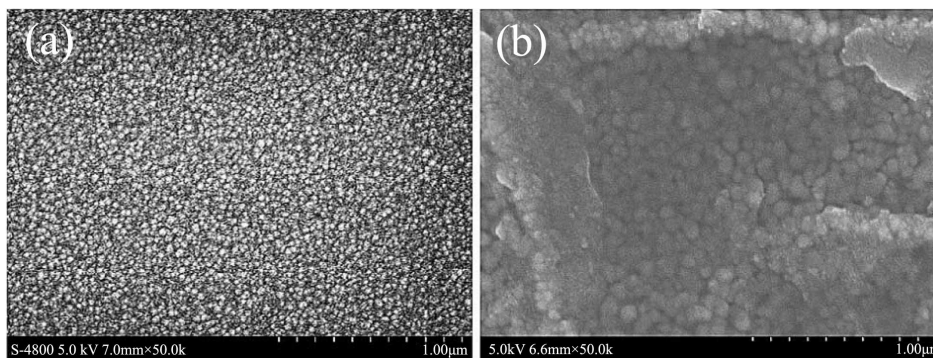


Figure 8. The surface SEM images of the (a) ZnO film, and (b) ZnO NPs layer
图 8. (a) ZnO 薄膜, (b) ZnO NPs 电镜图

图 9 显示了 01~401 范围内的 ZnO NPs。有三个主峰分别对应于(100)、(002)和(101)面。插图显示了在 01~401 范围内的 ZnO 薄膜的 XRD 图谱。只有一个强峰。

图 10 显示了 ZnO 薄膜的吸收光谱和氧化锌层的透射光谱。可以看出, 可见波长大于 370 nm 的光子能穿透氧化锌纳米层, 波长小于 390 nm 的光子可以被氧化锌薄膜吸收。因此, ZnO 纳米颗粒层的传输和 ZnO 薄膜的吸收在 370 nm 到 390 nm 之间具有重叠。这条狭窄的“窗口”使光谱选择性光电探测器在 Au/ZnO/Au 结构与 ZnO NPs 覆盖可以实现。

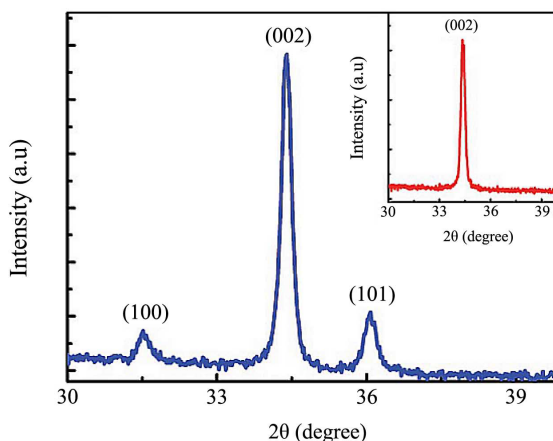


Figure 9. XRD pattern of the ZnO NPs, and the inset shows the XRD pattern of the ZnO films
图 9. ZnO 纳米颗粒的 XRD 谱图, 插入图显示了 ZnO 薄膜的 XRD 谱图

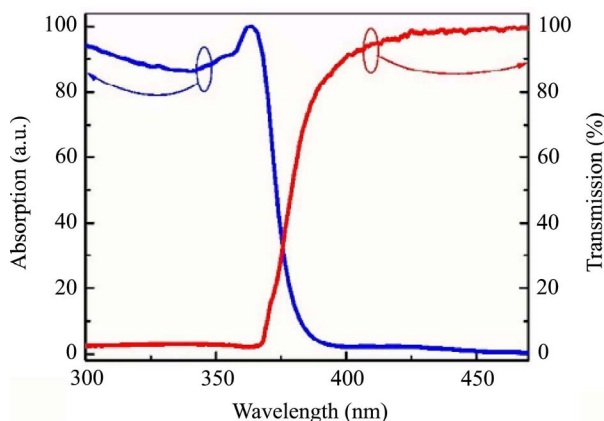


Figure 10. The absorption spectrum of the ZnO film and transmission spectrum of the ZnO NPs layer
图 10. ZnO 薄膜的吸收光谱和氧化锌层的透射光谱

图 11 显示了探测器的示意图。Au/ZnO/Au 复合镀层的结构。氧化锌纳米颗粒层和氧化锌薄膜的厚度分别约为 180 nm 和 1 μm。指间电极的金手指长度为 500 μm，宽度为 2 μm，电极间距为 2 μm。

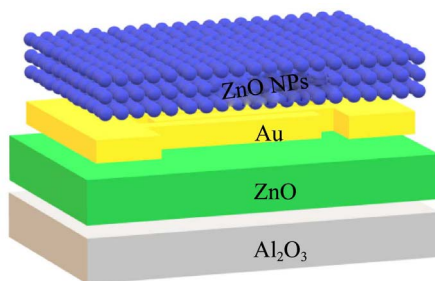


Figure 11. Schematic of the ZnO photodetector based on the Au/ZnO/Au structure and ZnO NPs coating
图 11. 基于 Au/ZnO/Au 结构和 ZnO NPs 涂层的 ZnO 光电探测器原理图

Au/ZnO/Au 结构光电探测器的光谱区域的响应如图 12，其光谱选择性较差。ZnO NPs & Au/ZnO/Au 结构光电探测器的范围从 370 nm 到 390 nm，与单独结构的光学窗口相一致。它显示了一个狭窄的 376 nm 的探测范围，半高宽为 10 nm，体现了光电探测器的响应是高度选择性。该器件的光谱选择性归因于 ZnO

纳米颗粒层的滤波效应。在紫外范围内, 氧化锌纳米颗粒层的厚度约为 180 nm, 波长小于 370 nm 的光子完全被氧化锌纳米颗粒层吸收。波长大于 370 nm 的光子穿过 ZnO 纳米层, 到达 ZnO 薄膜。因为氧化锌薄膜只吸收波长小于 390 nm 的光子, 基于光检测器的 ZnO 包覆的结构在 370~390 nm 的窄光谱窗口中有响应。通常, 表面涂层将影响探测器的性能。然而, 我们观察到氧化锌纳米颗粒包裹 Au/ZnO/Au 结构光探测器的响应度在 372~390 nm 的范围内高于前者, 这取决于 ZnO 纳米颗粒的散射效应。由于 ZnO NPs 的尺寸小于光子的波长, 所以 ZnO 纳米颗粒可以作为散射光的散射体。随后, 氧化锌薄膜将吸收散射光, 从而器件的响应度。该器件在 3 V 偏压下, 在 376 nm 处可达到 0.052 A/W 的响应。

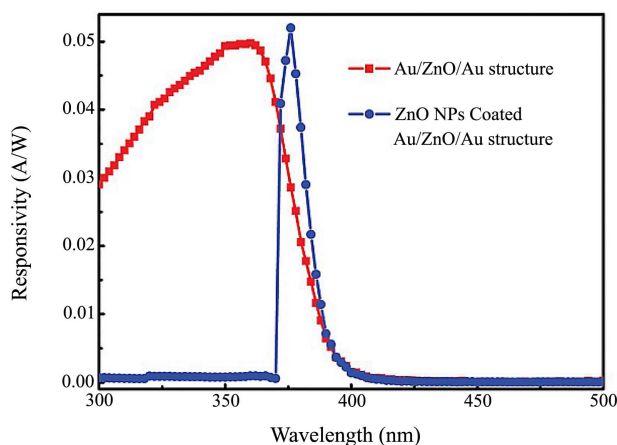


Figure 12. The photoresponse of the bare Au/ZnO/Au structured and ZnO NPs coated Au/ZnO/Au structured photodetectors at 3 V [29]

图 12. 3 V 偏压下 Au/ZnO/Au 结构和 ZnO&Au/ZnO/Au 结构的光电探测器光响应图[29]

6. 展望

现今, 根据光伏效应和光电导效应设计和制备了大量的 ZnO 基紫外探测器。其中灵敏度、响应速度和选择性等参数随着材料、结构和工艺的发展和优化都有了质的飞跃。基于两种新型探测器, 本文提出几点展望: 第一, 基于这种覆盖 ZnO 纳米颗粒的 Au/ZnO/Au 结构, 可以在保持高选择性的基础上, 提出通过控制 ZnO 纳米颗粒的合成过程来调节其物理性质, 进而调节响应探测范围, 制备出可调谐的高选择性 ZnO 紫外探测器。其次, 研究出可弯折, 可多次弯折的穿戴电子领域的柔性器件, 是研究人员主要面对的创新难题。最后, 利用肖特基结和 p-n 结的光伏效应设计出的自供能智能光电传感器器件将成为新型半导体探测器领域研究的热潮。

7. 总结

本文总结了 ZnO 基紫外探测器的结构、原理和特点, 分析了化学气相沉积、激光脉冲沉积等制膜方法制备的传统 ZnO 基紫外探测器的性能, 详细介绍了利用简单结构实现肖特基接触、利用 ZnO 滤波层的结构制备的两种新型 ZnO 基紫外探测器。并阐述了新型 ZnO 基紫外探测器由于其更完善的工艺和更复杂的结构成功获得了高选择性、高响应度和强灵敏度等探测器特性。总结出在不同制备薄膜方法和不同结构原理的基础上, 依靠更先进的工艺, 使用新型材料制作多层复杂结构来实现器件功能多样化是未来主要的发展前景。

参考文献

- [1] Bai, Z., Chen, X., Yan, X., Zheng, X., Kang, Z. and Zhang, Y. (2014) Self-Powered Ultraviolet Photodetectors Based

- on Selectively Grown ZnO Nanowire Arrays with Thermal Tuning Performance. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **16**, 9525. <https://doi.org/10.1039/c4cp00892h>
- [2] Chen, H.Y., Liu, K.W., Chen, X., Zhang, Z.Z., Fan, M.M., Jiang, M.M., *et al.* (2014) Realization of a Self-Powered ZnO MSM UV Photodetector with High Responsivity Using an Asymmetric Pair of Au Electrodes. *Journal of Materials Chemistry C*, **2**, 9689-9694. <https://doi.org/10.1039/C4TC01839G>
- [3] Jiang, D.L., Li, L., Chen, H.Y., Gao, H., Qiao, Q., Xu, Z.K., *et al.* (2015) Realization of Unbiased Photoresponse in Amorphous InGaZnO Ultraviolet Detector via a Hole-Trapping Process. *Applied Physics Letters*, **106**, 6549. <https://doi.org/10.1063/1.4918991>
- [4] Kaminska, E., Piotrowska, A., Kossut, J., Barcz, A., Butkute, R., Dobrowolski, W., *et al.* (2005) Transparent p-Type ZnO Films Obtained by Oxidation of Sputter-Deposited Zn₃N₂. *Solid State Communications*, **135**, 11-15. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2005.04.002>
- [5] Guziewicz, M., Schifano, R., Przędziecka, E., Domagala, J.Z., Jung, W., Krajewski, T.A., *et al.* (2015) n-ZnO/p-4H-SiC Diode: Structural, Electrical, and Photoresponse Characteristics. *Applied Physics Letters*, **107**, 1255-1435. <https://doi.org/10.1063/1.4930307>
- [6] Shen, H., Shan, C.X., Li, B.H., Xuan, B. and Shen, D.Z. (2013) Reliable Self-Powered Highly Spectrum-Selective ZnO Ultraviolet Photodetectors. *Applied Physics Letters*, **103**, 232112. <https://doi.org/10.1063/1.4839495>
- [7] Ni, P.N., Shan, C.X., Li, B.H. and Shen, D.Z. (2014) High Mg-Content Wurtzite MgZnO Alloys and Their Application in Deep-Ultraviolet Light-Emitters Pumped by Accelerated Electrons. *Applied Physics Letters*, **104**, 032107. <https://doi.org/10.1063/1.4862789>
- [8] Yue, L.L., Yang, Y.D., Kim, H.S., Jang, N.W. and Yun, Y. (2016) Electrical Properties of Mg_xZn_{1-x}O Thin Films Deposited by Using RF Magnetron Co-Sputtering with ZnO and Mg_{0.3}Zn_{0.7}O Targets. *Journal-Korean Physical Society*, **68**, 686-691. <https://doi.org/10.3938/jkps.68.686>
- [9] Kumar, Y., Kumar, H., Rawat, G., Kumar, C., Pal, B.N. and Jit, S. (2018) Spectrum Selectivity and Responsivity of ZnO Nanoparticles Coated Ag/ZnO QDs/Ag UV Photodetectors. *IEEE Photonics Technology Letters*, **1**. <https://doi.org/10.1109/LPT.2018.2880518>
- [10] Ni, P.N., Shan, C.X., Wang, S.P., Li, B.H., Zhang, Z.Z., Zhao, D.X., *et al.* (2016) Enhanced Responsivity of Highly Spectrum-Selective Ultraviolet Photodetectors. *Journal of Physical Chemistry C*, **116**, 1350-1353. <https://doi.org/10.1021/jp210994t>
- [11] Pei, J., Jiang, D., Zhao, M., Duan, Q., Liu, R., Sun, L., *et al.* (2016) Controlled Enhancement Range of the Responsivity in ZnO Ultraviolet Photodetectors by Pt Nanoparticles. *Applied Surface Science*, **389**, 1056-1061. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.08.048>
- [12] Um, H., Moiz, S.A., Park, K., Jung, J., Jee, S., Ahn, C.H., *et al.* (2011) Highly Selective Spectral Response with Enhanced Responsivity of n-ZnO/p-Si Radial Heterojunction Nanowire Photodiodes. *Applied Physics Letters*, **98**, 33102. <https://doi.org/10.1063/1.3543845>
- [13] Rajan, A., Kaur, G., Paliwal, A., Yadav, H.K., Gupta, V. and Tomar, M. (2014) Plasmonic Assisted Enhanced Photoresponse of Metal Nanoparticle Loaded ZnO Thin Film Ultraviolet Photodetectors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **47**, 425102. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/42/425102>
- [14] Wang, X., Liu, K., Chen, X., Li, B., Jiang, M.M., Zhang, Z., *et al.* (2017) Highly Wavelength-Selective Enhancement of Responsivity in Ag Nanoparticle-Modified ZnO UV Photodetector. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 5574. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b14430>
- [15] Jeong, S.H., Kim, B.S. and Lee, B.T. (2003) Photoluminescence Dependence of ZnO Films Grown on Si(100) by Radio-Frequency Magnetron Sputtering on the Growth Ambient. *Applied Physics Letters*, **82**, 2625. <https://doi.org/10.1063/1.1568543>
- [16] Nomura, K., Kamiya, T., Ohta, H., Ueda, K., Hirano, M. and Hosono, H. (2004) Carrier Transport in Transparent Oxide Semiconductor with Intrinsic Structural Randomness Probed Using Single-Crystalline InGaO₃(ZnO)₅ Films. *Applied Physics Letters*, **85**, 1993-1995. <https://doi.org/10.1063/1.1788897>
- [17] Moon, T.H., Jeong, M.C., Lee, W. and Myoung, J.M. (2005) The Fabrication and Characterization of ZnO UV Detector. *Applied Surface Science*, **240**, 280-285. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.06.149>
- [18] Liang, S., Sheng, H., Liu, Y., Huo, Z., Lu, Y. and Shen, H. (2001) ZnO Schottky Ultraviolet Photodetectors. *Journal of Crystal Growth*, **225**, 110-113. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(01\)00830-2](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(01)00830-2)
- [19] Zhang, T.S., Yu, J., Deng, Y.F., Tian, N. and Gao, P. (2015) Fast Response Ultraviolet Photodetectors Based on Solution-Processed ZnO Nanocrystals. *Science China Technological Sciences*, **58**, 1328-1332. <https://doi.org/10.1007/s11431-015-5870-8>
- [20] 杨晓天, 刘博阳, 马艳, 等. ZnO 基紫外探测器的制作与研究[J]. 发光学报, 2004, 25(2): 156-158.

- [21] Li, Y., Feng, S., Yang, J., Zhang, Y., Xie, X., Lü, C., *et al.* (2009) Photoresponse of ZnO Single Crystal Films. *Frontiers of Optoelectronics*, **1**.
- [22] 叶志镇, 张银珠, 陈汉鸿, 何乐年, 邹璐, 黄靖云, 等. ZnO 光电导紫外探测器的制备和特性研究[J]. 电子学报, 2003, 31(11): 1605-1607.
- [23] Zhuang, L. and Wong, K.H. (2007) Fabrication of Transparent p-n Junction Composed of Heteroepitaxially Grown p-Li_{0.15}Ni_{0.85}O and n-ZnO Films for UV-Detector Applications. *Applied Physics A*, **87**, 787-791. <https://doi.org/10.1007/s00339-007-3921-0>
- [24] 高晖, 邓宏. 热处理对 ZnO 六棱微管结构及发光特性的影响[J]. 微纳电子技术, 2006, 43(12): 572-576.
- [25] Yu, J., Shan, C.X., Huang, X.M., Zhang, X.W., Wang, S.P. and Shen, D.Z. (2013) ZnO-Based Ultraviolet Avalanche Photodetectors. *Journal of Physics D Applied Physics*, **46**, Article ID: 305105. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/30/305105>
- [26] Liu, J.S., Shan, C.X., Li, B.H., Zhang, Z.Z., Yang, C.L., Shen, D.Z., *et al.* (2010) High Responsivity Ultraviolet Photodetector Realized via a Carrier-Trapping Process. *Applied Physics Letters*, **97**, 15. <https://doi.org/10.1063/1.3527974>
- [27] Ozgur, U., Alivov, Y.I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M.A., Dogan, S., *et al.* (2005) A Comprehensive Review of ZnO Materials and Devices. *Journal of Applied Physics*, **98**, Article ID: 41301. <https://doi.org/10.1063/1.1992666>
- [28] Liu, Y., Gorla, C.R., Liang, S., Emanetoglu, N., Lu, Y., Shen, H., *et al.* (2000) Ultraviolet Detectors Based on Epitaxial ZnO Films Grown by MOCVD. *Journal of Electronic Materials*, **29**, 69-74. <https://doi.org/10.1007/s11664-000-0097-1>
- [29] Yu, J. and Tian, N. (2016) High Spectrum Selectivity and Enhanced Responsivity of a ZnO Ultraviolet Photodetector Realized by the Addition of ZnO Nanoparticles Layer. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **18**, 24129-24133.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: app@hanspub.org