材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260226002

Ag/AZO/Ag肖特基UV PDs光电特性模拟研究

张彩珍*，沈玲琴，胡　彤

（兰州交通大学 电子与信息工程学院，兰州 730070）

摘　要： ZnO薄膜质量是影响Ag/ZnO肖特基UV PDs性能的主要因素，Al掺杂可改善薄膜质量从而提高器件性能。为进一步研究AZO材料参数对Ag/AZO/Ag肖特基UV PDs性能的影响，文章通过Silvaco TCAD仿真平台模拟器件光电特性，并研究了AZO薄膜厚度及掺杂浓度对器件性能的影响。结果表明，Ag/AZO/Ag肖特基UV PDs光电流为5.12×10^{-6} A，响应度为0.41 A/W，比探测率为1.72×10^{10} Jones，外量子效率为147.4%；较Ag/ZnO器件分别提高了260%，180%，148%，176%。当AZO薄膜掺杂浓度约为1×10^{17} cm^{-3}、厚度为0.3～0.5 μm时，器件综合性能较好。

关键词： ZnO；AZO；肖特基；紫外探测器；光电特性

中图分类号： TN364.2　**文章编号：** 1001－5868(2026)04－0651－06

Simulation Study on Photoelectric Characteristics of Ag/AZO/Ag Schottky UV PDs

ZHANG Caizhen, SHEN Lingqin, HU Tong

(School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, CHN)

Abstract: The quality of the ZnO film is a key factor determining the performance of Ag/ZnO Schottky ultraviolet photodetectors (UV PDs). Al doping can improve the quality of the ZnO film, thereby enhancing the performance of the device. To further investigate the influence of AZO material parameters on the performance of Ag/AZO/Ag Schottky UV PDs, this study employed Silvaco TCAD simulation software to evaluate the influence of AZO film thickness and doping concentration on the device performance. The results show that the photocurrent of the Ag/AZO/Ag Schottky UV PDs is 5.12×10^{-6} A, the responsivity is 0.41 A/W, the specific detectivity is 1.72×10^{10} Jones, and the external quantum efficiency is 147.4%, which are respectively 260%, 180%, 148%, and 176% higher than those of the Ag/ZnO devices. When the doping concentration of the AZO film is approximately 1×10^{17} cm^{-3} and the thickness is 0.3～0.5 μm, the device performance is improved.

Key words: ZnO; AZO; Schottky barrier; ultraviolet photodetector; optoelectronic characteristics

0　引言

紫外探测器基于光电效应实现对光信号的检测和处理，根据检测原理可将其分为三类：光电导型、光伏型和发射型。其中，光伏型光电探测器具有p-n结、PIN结和肖特基结[1-5]等结构。肖特基紫外光电探测器由于其响应速度快、灵敏度高、体积小、功耗低等优点，被广泛应用于光通信、环境监测和医疗诊断等

收稿日期：2026－02－26.

基金项目：国家自然科学基金项目(62461031).

* **通信作者：**张彩珍

领域。ZnO作为第三代宽带隙材料(约3.37 eV)[6],具有较大的激子结合能,已成为肖特基紫外光电器件的主要材料之一。

ZnO基肖特基紫外光电探测器的性能与ZnO薄膜的质量密切相关。掺杂是改善ZnO薄膜质量的一种有效方法,铝掺ZnO薄膜因其低电阻率和高透光率成为研究热点。Singh等[7]采用射频溅射方法在p型Si衬底上沉积高质量的AZO薄膜,制备了MSM型光电探测器,结果表明其电阻随电极间距增加而增加,在紫外光照射下光暗电流比达到1×10^2。Pon等[8]利用雾化器喷雾技术在玻璃衬底上分别沉积了ZnO薄膜和AZO薄膜,结果证明Al掺杂能够改变ZnO薄膜的晶粒尺寸和带隙,改善ZnO薄膜质量。Khan等[9]利用SILAR方法制备了AZO薄膜光电探测器,结果表明Al掺杂增强了ZnO的结晶度和晶体生长,平均晶粒尺寸从未掺杂时的21.6 nm增加到掺杂时的23.8 nm,提高了光探测效率。Li等[10]采用溶胶-凝胶法制备了与硅平面工艺相容的AZO薄膜,并对其光学性能进行了系统研究,结果表明AZO薄膜具有较高的透光率,通过掺杂可以调控AZO薄膜带隙。

上述研究大多集中在工艺实验方面,结果较为单一,缺乏对AZO薄膜材料参数与器件性能关系的系统研究。本研究利用Silvaco TCAD[11]仿真平台模拟了Ag/ZnO/Ag和Ag/AZO/Ag两种结构的肖特基紫外光电探测器的光暗电流、响应度、比探测率和外量子效率等光电特性,研究了AZO薄膜厚度及掺杂浓度对器件性能的影响。该研究结果对降低实验成本及设计高性能ZnO薄膜基UV PDs具有一定的借鉴意义。

1 器件结构与仿真模型

器件的二维结构如图1所示,首先在玻璃衬底上生长一层AZO薄膜,厚度为0.57 μm,载流子浓度为1×10^{17} cm^{-3}。金属Ag作为电极,与AZO薄膜形成肖特基接触,厚度为0.2 μm。利用Silvaco TCAD软件的Atlas仿真模块通过定义网格、材料、电极和掺杂浓度建立的器件部分模拟计算结构图如图2所示。

表1所示为模拟中所用的材料参数[12-13]。仿真中所用的物理模型包括能带模型、肖克利-里德-霍尔(Shockley-Read-Hall,SRH)复合模型、俄歇(Auger)

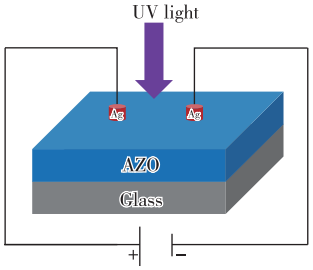


图1 Ag/AZO/Ag肖特基UV PDs结构图

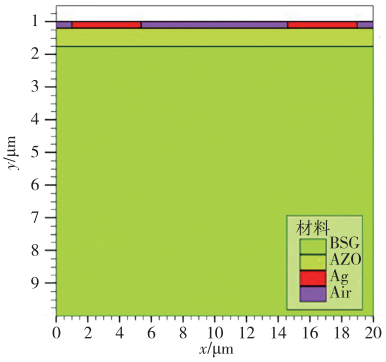


图2 Ag/AZO/Ag肖特基UV PDs模拟计算图

复合模型、迁移率模型、光学复合模型、费米统计模型等。建立器件的连续性方程和泊松方程,再利用牛顿迭代法求解器件各光电特性。仿真实验中,器件外加偏压为−5 V,入射光垂直照射器件表面,入射光波长和入射光功率分别为385 nm和5 mW/cm^2。

表1 实验材料参数

参数	材料	
	ZnO	AZO
禁带宽度/eV	3.35	3.18
电子亲合能/eV	4.35	4.4
相对介电常数	9.4	9
电子迁移率/(cm^2·V^{-1}·s^{-1})	270	270
空穴迁移率/(cm^2·V^{-1}·s^{-1})	70	70
导带密度/cm^3	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}
价带密度/cm^3	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}

2 结果与讨论

2.1 *I-V*特性

Ag/AZO/Ag肖特基UV PDs工作在反向偏压下,由多子控制其导电特性。当Ag与AZO薄膜接触后,电子从AZO层流向金属Ag,在界面附近形成空间电荷区并产生内建电场。当器件外加反向偏置电压时,空间电荷区变宽,内建电势增强,电场强度也随之增大。Ag/AZO/Ag肖特基UV PDs在外加偏压为0 V和−5 V时,电场分布情况如图3所示,可以看出空间电荷区宽度随外加偏压增大而展

宽。同时器件外加偏压越大电场越大，当外加偏压为－5 V 时，器件在肖特基结附近的电场强度最大为 4.05×10^5 V/cm。仿真结果与理论分析一致。

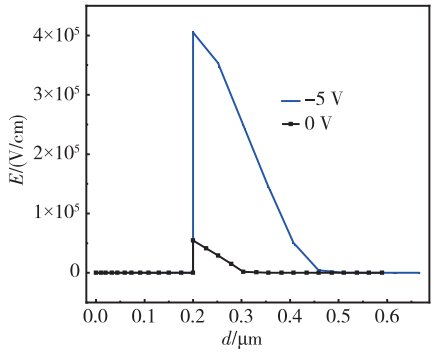


图 3　Ag/AZO/Ag UV PDs 电场分布图

光照前后的光电流（I_p）、暗电流（I_d）是衡量光电探测器性能的主要参数。图 4 所示为 Ag/AZO/Ag 肖特基 UV PDs 在无光照和 385 nm 波长光照下的 *I-V* 曲线。由图可知，曲线呈现对称性整流，当外加偏压为－5 V 时，光电流为 5.12×10^{-6} A，暗电流为 1.58×10^{-6} A，光电流始终比暗电流大。随着外加偏压的增大，光电流也相应增大，这是由于空间电荷区宽度随外加偏压增大而展宽，到达电极的光生载流子增多。仿真结果与实验结果[8]基本吻合。

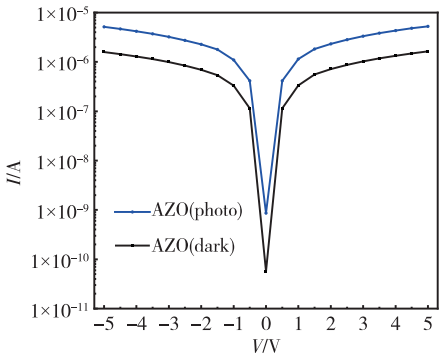
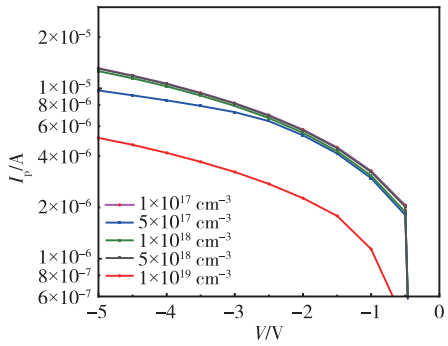
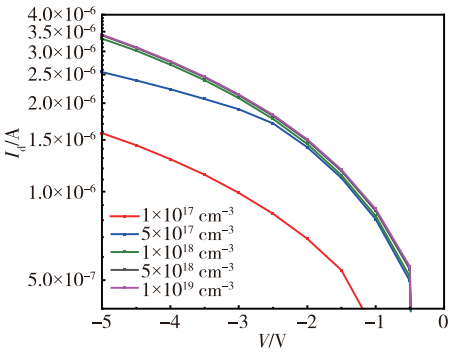


图 4　Ag/AZO/Ag UV PDs 的 *I-V* 曲线

图 5 所示为 Ag/AZO/Ag 肖特基 UV PDs 光暗电流随 AZO 薄膜掺杂浓度的变化。仿真实验中，AZO 薄膜掺杂浓度从 1×10^{17} cm^{-3} 均匀增加至 1×10^{19} cm^{-3}。由图 5(a)可以看出，光电流随着掺杂浓度的增加而增大，这是因为在相同的偏压下，随着载流子浓度的增加，电阻率降低，电场强度增大，导致光电流增大。当掺杂浓度大于 1×10^{18} cm^{-3} 时，光电流几乎不变。由图 5(b)可以看出，当掺杂浓度为 1×10^{17} cm^{-3} 时，暗电流最小为 1.58×10^{-6} A。暗电流随着掺杂浓度的增加而增加，这是因为暗电流的大小和载流子浓度成正比，载流子浓度越大，暗电流越大。综合考虑，AZO 薄膜的掺杂浓度约为 1×10^{17} cm^{-3} 时，器件性能较好。



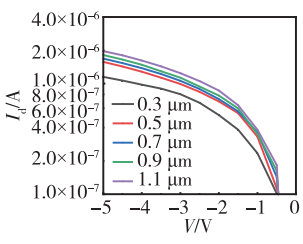
（a）光电流



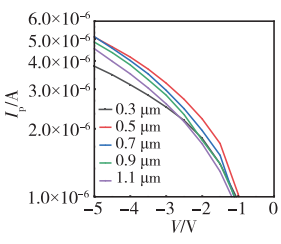
（b）暗电流

图 5　AZO 薄膜掺杂浓度对 Ag/AZO/Ag UV PDs 光暗电流的影响

图 6 所示为 Ag/AZO/Ag 肖特基 UV PDs 光暗电流随 AZO 薄膜厚度的变化，仿真中 AZO 薄膜厚度从 0.3 μm 均匀增加至 1.1 μm。由图 6(a)可以看出，当薄膜厚度为 0.3 μm 时，暗电流最小为 1.15×10^{-6} A，暗电流随着薄膜厚度的增加而增加。由图 6(b)可以看出，当薄膜厚度为 0.5 μm 时，光电流最大为 5.10×10^{-6} A，光电流随着薄膜厚度的增加而增加。但当薄膜厚度大于 0.5 μm 时，光电流反而有减小的趋势，这是因为外延层对入射光的吸收大多数在 0.5 μm 左右厚处已完成。



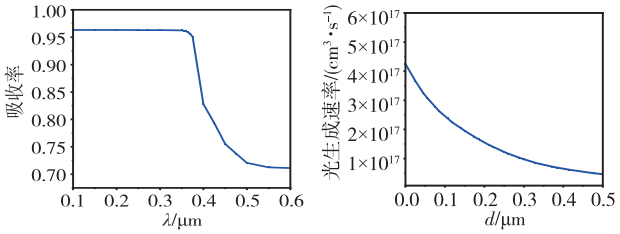
（a）暗电流



（b）光电流

图 6　AZO 薄膜厚度对 Ag/AZO/Ag UV PDs 光暗电流的影响

图7所示为Ag/AZO/Ag肖特基UV PDs光吸收率和光生成速率。由图7(a)可以看出,当AZO薄膜厚度为0.57 μm时,对紫外光的吸收率大约为0.96;图7(b)可以看出,光生成速率(载流子生成率)随AZO薄膜厚度的增加呈指数式衰减。综合考虑,AZO薄膜的厚度为0.3~0.5 μm时,器件性能较好。



(a) 光吸收率 (b) 光生成速率

图7 Ag/AZO/Ag肖特基UV PDs光吸收率和光生成速率

图8为Ag/ZnO/Ag和Ag/AZO/Ag肖特基UV PDs光、暗电流对比图。可以看出,Ag/AZO/Ag肖特基UV PDs的光电流为5.12×10^{-6} A,对比Ag/ZnO/Ag肖特基UV PDs器件的1.95×10^{-6} A,提升了2.6倍。同时,Ag/AZO/Ag肖特基UV PDs的暗电流也提高了。这是因为在AZO薄膜中掺入Al元素使薄膜载流子浓度提高,增强了薄膜电导率,导致光电流和暗电流同时上升。

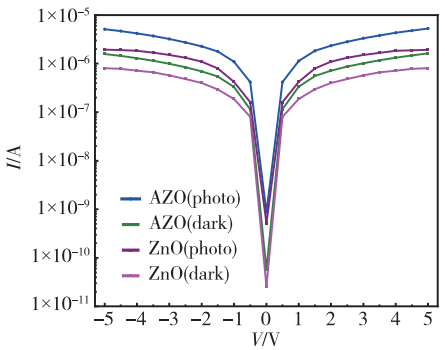


图8 两种器件光、暗电流对比图

2.2 响应度

在Atlas仿真器内模拟Ag/ZnO/Ag和Ag/AZO/Ag肖特基UV PDs的光谱响应曲线,提取数据计算得到两种器件的响应度(R)如图9所示。可以看出,响应度峰值对应的入射光波长为360 nm左右,Ag/AZO/Ag肖特基UV PDs响应度峰值为0.41 A/W,对比Ag/ZnO/Ag肖特基UV PDs的0.23 A/W,提升了1.8倍。波长在375~400 nm内,响应度急剧下降;当波长大于400 nm时,响应度几乎为零,说明器件有很好的紫外可见光抑制比;波长在100~360 nm内,响应度随波长的增大而增大。

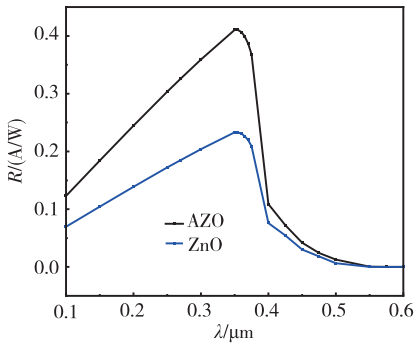
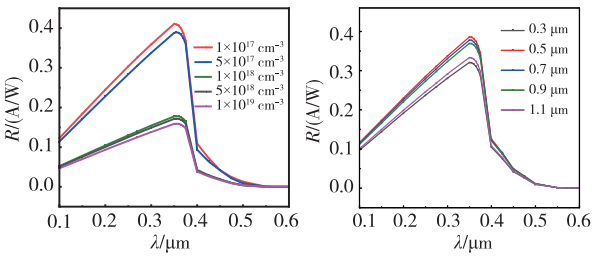


图9 Ag/ZnO/Ag和Ag/AZO/Ag UV PDs响应度

图10所示为Ag/AZO/Ag肖特基UV PDs响应度随AZO薄膜掺杂浓度和厚度的变化,仿真中AZO薄膜掺杂浓度从1×10^{17} cm^{-3}均匀增加至1×10^{19} cm^{-3},厚度从0.3 μm均匀增加至1.1 μm。由图10(a)可以看出,响应度随着掺杂浓度的增加而减小,当吸收层掺杂浓度较低时,肖特基结所形成的耗尽区较宽,能够分离更多的光生载流子进而提高响应度。当掺杂浓度为1×10^{17} cm^{-3}时,响应度最大为0.41 A/W。由图10(b)可以看出,当薄膜厚度为0.5 μm时,响应度最大为0.38 A/W。当薄膜厚度大于0.5 μm时,响应度随着薄膜厚度的增加而减小,这是因为当吸收层较厚时,耗尽区分离光生载流子的能力降低。综上所述,当AZO薄膜掺杂浓度约为1×10^{17} cm^{-3},厚度为0.3~0.5 μm时,器件响应度较高。



(a) 掺杂浓度 (b) 厚度

图10 AZO薄膜掺杂浓度和厚度对Ag/AZO/Ag UV PDs响应度的影响

2.3 比探测率及外量子效率

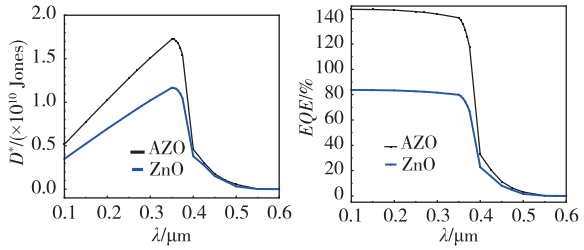
比探测率[14](D^*)描述了器件对于弱光的探测能力,计算公式如式(1)所示。外量子效率[15](EQE)是指光电转换器件中入射光子产生的电子空穴对数目与入射光子数目之比,计算公式如式(2)所示。

$$D^{*}=R\sqrt{\frac{A}{2qI_{\mathrm{d}}}} \tag{1}$$

$$EQE=R\frac{hc}{q\lambda} \tag{2}$$

式中，A 为器件有效面积（8.8×10^{-4} cm^2），h 为普朗克常数，c 表示光速。

利用公式（1）计算得到 Ag/ZnO/Ag 和 Ag/AZO/Ag 肖特基 UV PDs 的比探测率如图 11（a）所示，Ag/AZO/Ag 肖特基 UV PDs 的比探测率为 1.72×10^{10} Jones，对比 Ag/ZnO/Ag 肖特基 UV PDs 的 1.16×10^{10} Jones，提升了 1.48 倍。利用公式（2）计算得到两种器件的外量子效率如图 11（b）所示，Ag/AZO/Ag 肖特基 UV PDs 的外量子效率为 147.4%，对比 Ag/ZnO/Ag 肖特基 UV PDs 的 83.6%，提升了 1.76 倍。此外，Ag/AZO/Ag 肖特基 UV PDs 的外量子效率超出了 100% 的理论值，这是因为光照情况下耗尽层产生电子-空穴对，空穴在 ZnO 与 Ag 界面处被界面态俘获，从而导致的内部增益效应。

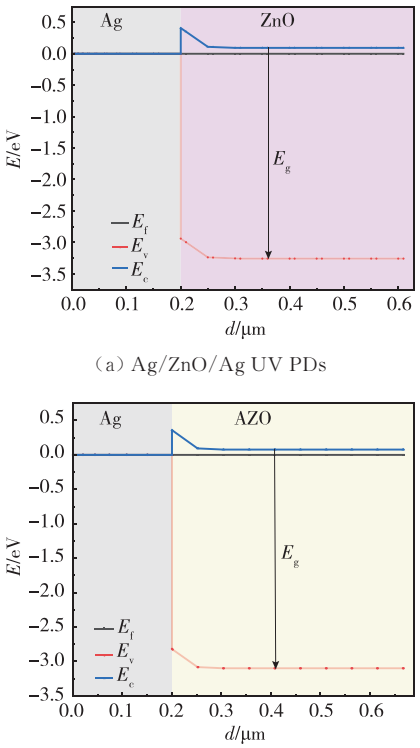


（a）比探测率　　（b）外量子效率

图 11　Ag/ZnO/Ag 和 Ag/AZO/Ag UV PDs 比探测率及外量子效率

2.4　能带

图 12 为 Ag/ZnO/Ag 和 Ag/AZO/Ag 肖特基 UV PDs 能带图。在金属 Ag 与 AZO 界面处，能带向上弯曲并形成肖特基势垒，这是因为 Ag 的功函数大于 AZO 的电子亲和能，当两者接触时，AZO 导带电子向 Ag 侧流动，在接触界面附近留下带正电的施主离子，形成空间电荷区并产生内建电场，仿真结果与理论分析一致。此外，Al 掺杂会使费米能级向导带底移动，从图中可以看出，Ag/AZO/Ag 肖特基 UV PDs 势垒高度为 0.36 eV，对比 Ag/ZnO/Ag 肖特基 UV PDs 的 0.41 eV，Ag/AZO/Ag 肖特基 UV PDs 势垒高度较低，导致 Ag/AZO/Ag 肖特基 UV PDs 光电流和暗电流增加。因为光电流增加幅度较大，响应度也随之增大，比探测率和外量子效率都与响应度成正比，也相应增大。



（a）Ag/ZnO/Ag UV PDs

（b）Ag/AZO/Ag UV PDs

图 12　Ag/ZnO/Ag 和 Ag/AZO/Ag UV PDs 能带图

3　结论

本文通过在 ZnO 薄膜中掺入 Al 形成 AZO 薄膜来优化 Ag/ZnO 肖特基 UV PDs 的性能，通过 Silvaco TCAD 软件模拟了 Ag/ZnO/Ag 和 Ag/AZO/Ag 肖特基 UV PDs 的暗电流、光电流、响应度、比探测率和外量子效率等特性。结果表明，Ag/AZO/Ag 肖特基 UV PDs 具有更高的光电流、比探测率和外量子效率，响应度高达 0.41 A/W。研究了 AZO 薄膜掺杂浓度和厚度对 Ag/AZO/Ag 肖特基 UV PDs 性能的影响，结果表明，当 AZO 薄膜掺杂浓度为 1×10^{17} cm^{-3} 左右，厚度为 0.3～0.5 μm 时，器件性能较好。本研究对于减少实验次数，节约试验成本，且对制备低成本高性能 AZO 光电探测器具有重要研究意义。

参考文献：

[1]　张彩珍，戴明娇，闫升荣．ZnO 基异质结紫外探测器光电特性研究[J]．半导体光电，2023，44(6)：832-836.
Zhang Caizhen，Dai Mingjiao，Yan Shengrong．Study on the photoelectric characteristics of ZnO based heterojunction UV detectors[J]．Semiconductor Optoelectronics，2023，44(6)：

832-836.

[2] Varma T, Periasamy C, Boolchandani D. Performance analyses of Schottky diodes with Au/Pd contacts on n-ZnO thin films as UV detectors[J]. Superlattices and Microstructures, 2017, 112: 151-163.

[3] Das M, Sarmah S, Barman D, et al. Distinct band UV - Visible photo sensing property of ZnO-Porous silicon (PS): p-Si hybrid MSM heterostructure [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2020, 118: 105188.

[4] Ismail R A, Al-Samarai A E, Mohammed W M. Preparation of n-ZnO/p-Si heterojunction photodetector *via* rapid thermal oxidation technique: effect of oxidation time [J]. Applied Physics A, 2018, 124(8): 527.

[5] 刘 智, 成步文. 硅基锗PIN光电探测器的研究进展[J]. 半导体光电, 2022, 43(2): 261-266.
Liu Zhi, Cheng Buwen. Research progresses of Si-based Ge PIN photodetectors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(2): 261-266.

[6] Sharma S K, Periasamy C. Simulation study and performance analysis of n-ZnO/p-Si heterojunction photodetector [J]. Journal of Electron Devices, 2014, 19: 1633-1636

[7] Singh S. Simulation, fabrication, and characterization of Al-doped ZnO-based ultraviolet photodetectors [J]. Journal of Electronic Materials, 2016, 45(1): 535-540.

[8] Doni Pon V, Joseph Wilson K S, Hariprasad K, et al. Enhancement of optoelectronic properties of ZnO thin films by Al doping for photodetector applications[J]. Superlattices and Microstructures, 2021, 151: 106790.

[9] Khan M T, Prasad K H, Khan A, et al. Enhancement of photodetector performance of aluminum-doped zinc oxide thin films fabricated *via* SILAR method: structural, optical, and electrical analysis[J]. Inorganic Chemistry Communications, 2024, 169: 112973.

[10] Li Z, Chen Y, Meng X, et al. Band engineering and enhanced photoluminescence *via* Al donor doping in ZnO thin films[J]. Physica B: Condensed Matter, 2025, 717: 417788.

[11] Bansal S, Kumar S, Jain A, et al. Design and TCAD analysis of few-layer graphene/ZnO nanowires heterojunction-based photodetector in UV spectral region [J]. Scientific Reports, 2025, 15: 7762.

[12] Yousefizad M, Golshan Bafghi Z, Shahriyari A, et al. Advancements in photovoltaic efficiency: the role of fluorine-doped CZTS in homojunction solar cells[J]. Heliyon, 2025, 11(3): e42300.

[13] Bansal S, Rajpoot A K, Chamundeswari G, et al. Pt/ZnO and Pt/few-layer graphene/ZnO Schottky devices with Al ohmic contacts using Atlas simulation and machine learning[J]. Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 2024, 9(4): 100798.

[14] Zhang C, Hu T, Wang Z, et al. Influence of AZO buffer layer on characteristics of ZnO film on glass substrates for Schottky UV photodetector applications [J]. Optical Materials, 2024, 156: 115889.

[15] 李震球, 钟皖生, 舒林聪, 等. 铟掺杂氧化镓日盲深紫外探测器[J]. 半导体光电, 2025, 46(2): 261-268.
Li Zhenqiu, Zhong Wansheng, Shu Lincong, et al. In doping of gallium oxide solar-blind deep-ultraviolet detector [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2025, 46(2): 261-268.

作者简介：

张彩珍(1972—),女,甘肃省临洮县人,博士,教授,主要研究方向为新型半导体材料及器件。