光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023070401

ZnO基异质结紫外探测器光电特性研究

张彩珍*，戴明娇，闫升荣

（兰州交通大学 电子与信息工程学院，兰州 730070）

摘　要： n-ZnO/p-Si异质结紫外探测器存在响应度低和响应范围广的问题，为了获得更好的紫外探测性能，设计了一种n-ZnO/p-SiC异质结紫外探测器。应用TCAD仿真软件模拟了n-ZnO/p-SiC异质结紫外探测器的光学和电学特性，模拟结果表明：n-ZnO/p-SiC异质结紫外探测器暗电流为10^{-15} A，较n-ZnO/p-Si异质结紫外探测器降低了一个数量级；ZnO/p-SiC探测器响应度高达0.41 A/W，较n-ZnO/p-Si器件提高了156%，且n-ZnO/p-SiC紫外探测器仅对紫外光有响应，有效抑制了n-ZnO/p-Si紫外探测器对可见光的响应。

关键词： ZnO；异质结；紫外探测器；光电特性；响应度

中图分类号： TN364.2　**文章编号：** 1001－5868(2023)06－0832－05

Study on the Photoelectric Characteristics of ZnO Based Heterojunction UV Detectors

ZHANG Caizhen，DAI Mingjiao，YAN Shengrong

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

Abstract： The n-ZnO/p-Si heterojunction ultraviolet（UV）detector suffers from low responsivity and wide response range. In order to obtain better UV detection performance，the n-ZnO/p-SiC heterojunction UV detector was designed in this study. TCAD software was applied to simulate the optoelectronic properties of n-ZnO/p-SiC heterojunction UV detectors. The simulation results show that the dark current of the n-ZnO/p-SiC heterojunction UV detector was 10^{-15} A，which was one order of magnitude lower than that of the n-ZnO/p-Si heterojunction UV detector；the responsivity of the ZnO/p-SiC detector reached as high as 0.41 A/W，which was 156% higher than that of the n-ZnO/p-Si device；The n-ZnO/p-SiC UV detector only responded to UV light，effectively suppressing the response of the n-ZnO/p-Si UV detector to visible light.

Key words： ZnO；heterojunction；UV detector；optoelectronic characteristics；responsivity

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。光伏型光电探测器具有p-n结、pin结[1]和肖特基结等结构，相比于肖特基结和pin结紫外探测器，p-n结型紫外探测器暗电流低、响应速度快且能够工作在0 V偏压下。ZnO作为宽禁带半导体材料，具有激子结合能大、制备成本低、抗辐射干扰能力强及化学性质稳定等优点，是制备p-n异质结紫外探测器的理想材料之一。已有研究表明，ZnO本质为n型半导体材料，生产高质量的p型ZnO具有一定的挑战性，通常选用另一种p型衬底材料生长n-ZnO来制备异质p-n结型紫外探测器。近年来，许多p型材料如Si，GaN，NiO和SiC等已被用于制备p-n异质结[2-4]和pin异质结[5-6]型

收稿日期：2023－07－04.

基金项目：甘肃省自然科学基金项目(23JRRA844).

* **通信作者：**张彩珍　**E-mail：** 17393161206@163.com

紫外探测器。Wang 等[7]提出了 n-ZnO 纳米线/p-Si 异质结紫外探测器，结果表明，由于 ZnO 良好的光电性能，只需将其所处环境从空气改为真空，该紫外探测器的响应度就能得到很大提升。Ohta 等[8]制备了 n-ZnO/p-NiO 异质结紫外探测器，该器件在 26 V 偏压下对 360 nm 紫外光的响应度高达 0.3 A/W。由于和成熟的硅基微电子技术工艺相兼容，p 型 Si 衬底材料被广泛应用于 ZnO 异质结光电二极管的制备。但是 Si 衬底材料对长波长光响应抑制性差，和 ZnO 半导体材料之间晶格失配较大，使得 n-ZnO/p-Si 异质结紫外探测器不能单独作为紫外光的检测使用。为了优化器件的光响应特性，本研究基于 TCAD 仿真软件建立了 n-ZnO/p-SiC 异质结紫外探测器二维结构模型，对所构建器件的光电流、暗电流、响应度及响应时间等光电特性进行了模拟分析，采用对比分析法，研究了 p-SiC 和 p-Si 衬底材料对 ZnO 基异质结紫外探测器光电特性的影响。

1　器件结构与仿真模型

应用软件的 Atlas 仿真模块通过定义网格、材料、电极和掺杂浓度建立的 n-ZnO/p-SiC 异质结紫外探测器二维结构模型如图 1 所示。在高掺杂的 p 型 SiC 衬底上生长一层厚度为 0.2 μm、掺杂浓度为 1×10^{17} cm^{-3} 的 n 型 ZnO 薄膜，阴极电极与 ZnO 接触，阳极电极分布于 SiC 背面，电极均为欧姆接触，仿真不考虑电极厚度对器件光电特性的影响，因此所建模型的电极厚度设置为 0 μm。仿真中所用物理模型包括载流子掺杂浓度模型、能带模型、SRH(Shockley-Read-Hall)复合模型、俄歇(Auger)复合模型、迁移率模型等。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 380 nm 和 0.2 W/cm^2。

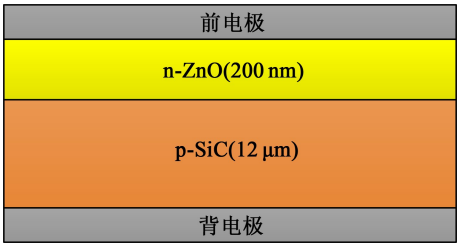


图 1　n-ZnO/p-SiC 异质结紫外探测器结构图

p-n 异质结型紫外探测器工作于反向偏压下，由少数载流子控制其导电特性。紫外探测器对入射光非常敏感，当入射光照射在器件表面时，入射光子将能量转移到吸收材料原子中激发产生非平衡载流子，在电场作用下向器件两端移动，器件外加反向偏置电压，更多的载流子运动到两端，此时耗尽区宽度变宽，光生载流子以其饱和速度向相反方向漂移穿过空间电荷区，漂移过程中载流子与原子发生碰撞进一步电离产生新的电子-空穴对，从而产生增益。

n-ZnO/p-SiC 异质结紫外探测器在外加 0 及 5 V 偏压下的电场分布如图 2 所示。由图可见，器件外加偏压越大电场越大，外加偏压为 5 V 时，该器件在异质结附近的电场强度最大为 0.95×10^6 V/cm，同时，从图中明显可见当器件所加反偏电压增大时，空间电荷区在吸收层展宽，仿真结果与理论分析一致。

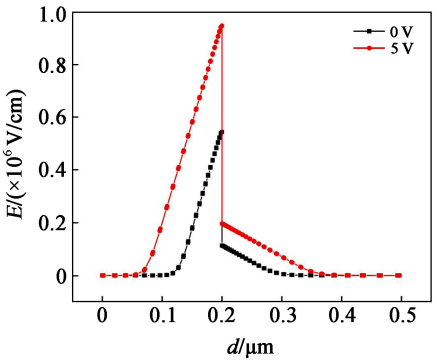


图 2　电场分布

2　结果分析与讨论

2.1　*I-V* 特性

在理想无光照条件下，热电子发射会引起电场作用下器件内部的微弱漏电流，即暗电流。暗电流是影响器件性能的重要参数之一[9]，它表征器件的噪声信号，暗电流越小器件性能越好。异质结型紫外探测器的暗电流包括扩散电流、产生-复合电流以及表面泄漏电流。扩散电流由器件未耗尽区产生的少子向空间电荷区扩散引起，与温度相关。表面泄露电流可在制造过程中通过提高工艺水平得以有效抑制。因此异质结型紫外探测器暗电流主要以产生-复合电流为主。耗尽区宽度 W_{dep} 是决定器件暗电流的一个重要因素，其表达式如式(1)所示：

$$W_{dep}=\sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon_s(V_{bi}-V)}{qN_D}} \tag{1}$$

式中，ε_0 是真空介电常数，ε_s 是 ZnO 的介电常数，V_{bi} 是内建电势，V 是偏置电压，q 是电子电荷，N_D

是施主浓度。空间电荷区宽度与掺杂浓度成反比，与外加反偏电压成正比。

有光照和无光照条件下器件的 I-V 特性曲线如图 3 所示，仿真器件外加 5 V 偏压，入射光垂直照射器件表面，入射光波长及入射光功率分别为 380 nm 和 0.2 W/cm^2。由图可知，在±5 V 偏压范围内，器件具有良好的 p-n 结整流特性。仿真结果与实验结果基本一致[10]。器件暗电流低至 10^{-15} A，表明其可用于低噪声环境。光电流为 10^{-8} A，光电流与暗电流比远大于三个数量级，表明其开关比较大，对光信号的区分能力较强。

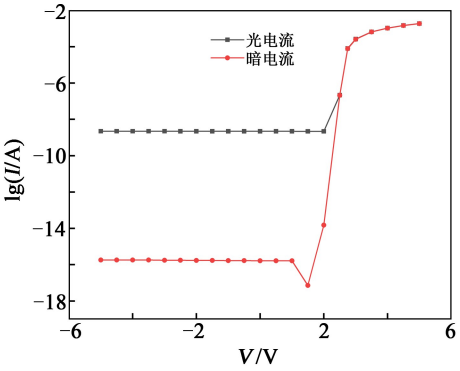


图 3 I-V 曲线

图 4 所示为 n-ZnO/p-SiC 异质结紫外探测器和 n-ZnO/p-Si 异质结紫外探测器的光电流及暗电流对比结果，两种器件光电流大小差别不大，但相较于 n-ZnO/p-Si 异质结紫外探测器，n-ZnO/p-SiC 异质结紫外探测器的暗电流降低了一个数量级，光、暗电流比明显较高，表明其对光信号的区分能力更强，光电响应特性更优。

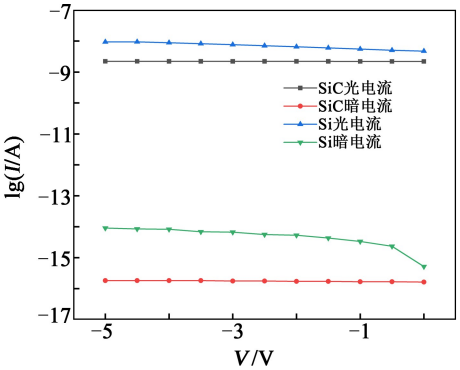
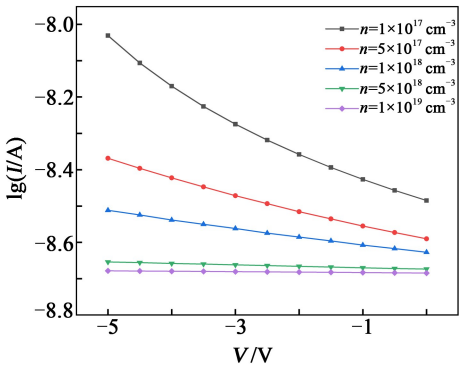
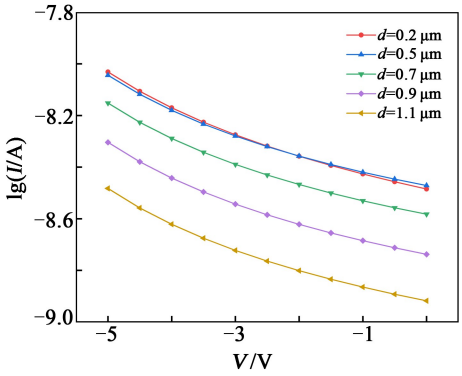


图 4 n-ZnO/p-SiC 和 n-ZnO/p-Si 的光电流与暗电流

图 5 所示为吸收层掺杂浓度(n)及厚度(d)对 n-ZnO/p-SiC 异质结紫外探测器光电流影响的仿真结果。仿真中吸收层掺杂浓度从 1×10^{17} cm^{-3} 均匀增加至 1×10^{19} cm^{-3}，吸收层薄膜厚度从 0.2 μm 均匀增加到 1.1 μm。由图 5(a)可见，光电流随吸收层掺杂浓度的增大而减小，这是由于在相同偏压下，吸收层掺杂浓度越大，器件的空间电荷区宽度越小，空间电荷区产生的光生载流子越少，光电流越小。图 5(b)表明，吸收层厚度与光电流大小成反比，吸收层厚度增加，光生载流子距空间电荷区较远，部分光生载流子在扩散到空间电荷区前被损耗，对光生电流的贡献减小，导致光电流减小。综上考虑，当吸收层掺杂浓度及厚度较小时，可实现对 n-ZnO/p-SiC 异质结紫外探测器光电特性的优化。



(a) ZnO 掺杂浓度的影响



(b) ZnO 厚度的影响

图 5 ZnO 掺杂浓度与厚度对光电流的影响

2.2 响应度

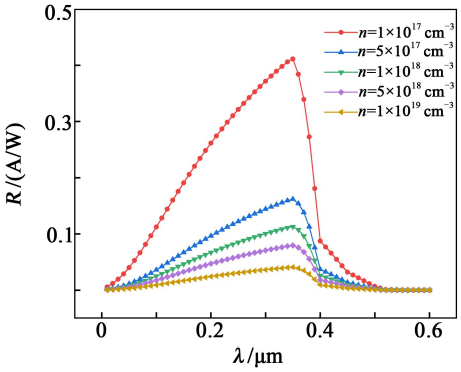
响应度(R)是表征紫外探测器将入射光信号转换为电信号能力的重要参数，定义为输出的光电流与入射光功率的比值，单位为 A/W。响应度由量子效率确定，两者之间的关系表达如式(2)所示：

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

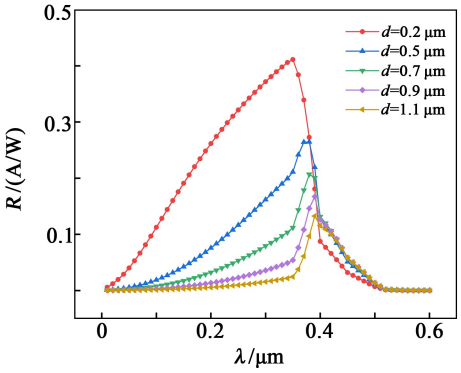
式中，q 是电子电荷，η 是量子效率，λ 是波长，h 是普朗克常量，c 是光速。响应度与量子效率成正比，表明可通过提高量子效率来提高器件的响应度。

在 Atlas 仿真器内模拟器件的光谱响应曲线，经光谱响应曲线提取数据计算得到响应度，如图 6

所示。由图 6(a)所示响应度随吸收层掺杂浓度变化曲线可知，当吸收层掺杂浓度为 1×10^{17} cm^{-3} 时器件响应度较高为 0.41 A/W，这主要是受到扩展在吸收层的空间电荷区的影响，当吸收层掺杂浓度较低时，空间电荷区主要集中在吸收层，能够分离更多的光生载流子进而提高响应度。图 6 (b)所示吸收层厚度对响应度影响的曲线表明，当吸收层薄膜厚为 0.2 μm 时，器件响应度最高，这是由于吸收层薄膜较厚时产生的光生载流子在表面堆积较难被电场分离导致量子效率降低，响应度与量子效率成正比，故吸收层较薄时器件响应度较大。综上所述，在紫外光范围内，ZnO 吸收层掺杂浓度为 1×10^{17} cm^{-3}，厚为 0.2 μm 时，n-ZnO/p-SiC 异质结紫外探测器响应度最高。



(a) ZnO 掺杂浓度的影响



(b) ZnO 厚度的影响

图 6　ZnO 掺杂浓度与厚度对响应度的影响

图 7 所示为两种器件在 10～600 nm 波长范围内的响应度曲线。从图 7 中可明显看出，相较于 n-ZnO/p-Si 器件，n-ZnO/p-SiC 异质结紫外探测器在紫外光范围内的响应度提高了 156%，其对可见光的抑制能力明显增强。

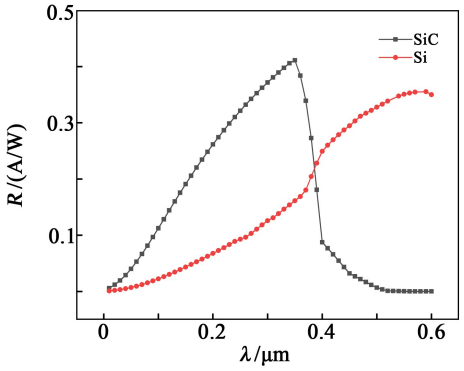


图 7　n-ZnO/p-SiC 和 n-ZnO/p-Si 的响应度

2.3　响应时间

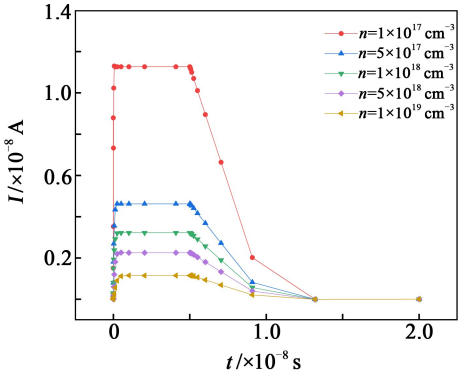
响应时间即探测器在接收光信号后进行光电转换的速度，表征器件的瞬态响应能力，包括上升时间和下降时间，上升时间定义为从峰值的 10%上升到 90%所需的时间，下降时间定义为从峰值的 90%下降到 10%所需的时间，本研究只讨论上升时间。响应时间包括耗尽区光生载流子渡越时间 τ_{cc}、耗尽区外产生的光生载流子扩散时间 τ_{diff} 和光电二极管以及与其相关电路的 RC 时间常数，如式(3)所示：

$$\tau_r = 2.2\tau = (\tau_{cc}^2 + \tau_{diff}^2 + \tau_{RC}^2)^{0.5} \tag{3}$$

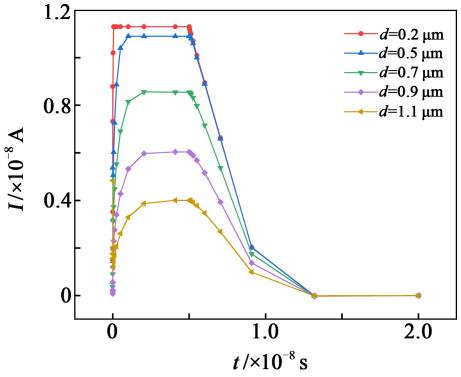
当光照射到光电探测器表面时，半导体材料表面受激产生新的电子-空穴对，并在电场的作用下向相反的电极漂移。载流子在耗尽区的渡越时间与耗尽区宽度密切相关，耗尽区宽度越宽，载流子渡越时间越长，紫外探测器响应速度越慢。紫外探测器将光信号转变为电信号的过程需要一定时间，器件的响应会存在延迟，因此分析吸收层掺杂浓度及厚度的变化对器件响应时间的影响很有必要。

为了简化研究过程，仿真中假设时间为 0 s 时入射光功率为 0.2 W/cm^2 的光源垂直照射器件，时间为 5×10^{-9} s 时撤去光源。n-ZnO/p-SiC 异质结紫外探测器响应时间曲线随吸收层掺杂浓度及厚度的变化如图 8 所示，从图中提取数据并经计算得到该探测器响应时间约为 10^{-11} s，响应速度较快。图 8(a)表明，随着吸收层掺杂浓度的增大，响应时间略微有变长的趋势，吸收层掺杂浓度的增加会使异质结空间电荷区宽度变窄，结电容增大，电容充放电时间变长，RC 时间常数变长，因此在时间常数的影响下器件的响应时间变长。图 8(b)显示，随着吸收层薄膜厚度的增加响应时间变长，吸收层厚度的增加导致异质结型探测器势垒区有一定的扩展，载流子渡越时间变长，响应时间变长。

图 9 示出两类器件的响应上升时间对比结果，由图可知，n-ZnO/p-SiC 和 n-ZnO/p-Si 器件的响应时间分别为 10^{-11} 和 10^{-10} s，n-ZnO/p-SiC 异质结紫外探测器的响应速度达到了高速响应的标准。



(a) ZnO 掺杂浓度的影响



(b) ZnO 厚度的影响

图 8 ZnO 掺杂浓度与厚度对响应时间的影响

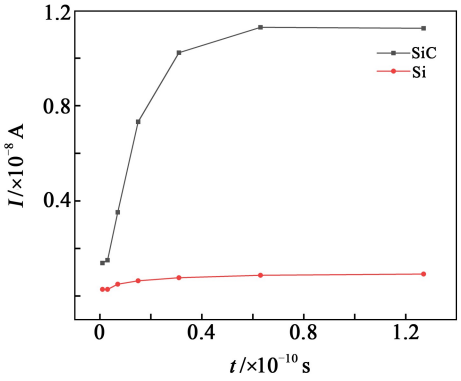


图 9 n-ZnO/p-SiC 和 n-ZnO/p-Si 的响应时间

3 结论

为优化 n-ZnO/p-Si 异质结紫外探测器的光电特性，基于 TCAD 仿真软件模拟研究了 n-ZnO/p-SiC 异质结紫外探测器的暗电流、光电流、响应度以及响应时间等光电特性。研究结果表明，n-ZnO/p-SiC 异质结紫外探测器具有更低的暗电流，ZnO 材料与 SiC 的结合，可以有效抑制 n-ZnO/p-Si 异质结紫外探测器对可见光的响应，明显提高了异质结紫外探测器在紫外光范围内的响应度，器件响应度最高可达 0.41 A/W。此外，n-ZnO/p-SiC 异质结紫外探测器响应速度更快，可作为高速反应器件。综上所述，n-ZnO/p-SiC 异质结紫外探测器的光电特性总体明显较优。

参考文献：

[1] Zou Y. Ultraviolet detectors based on wide bandgap semiconductor nanowire: A review[J]. Sensors, 2018, 18(7): 2072.

[2] Shao D, Yu M, Lian J, et al. Heterojunction photodiode fabricated from hydrogen treated ZnO nanowires grown on p-silicon substrate[J]. Appl. Phys. Lett., 2012, 101(21): 211103.

[3] Alivov Y I, Özgür Ü, Dogan S, et al. Photo response of n-ZnO/p-Si heterojunction diodes grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy[J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 86(24): 241108.

[4] Kwietniewski N, Masłyk M, Werbowy A, et al. Electrical characteristics of ZnO/4H-SiC n-p heterojunction diode[J]. Phys. Status Solidi A, 2016, 213: 1120.

[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 progress in silicon-based germanium PIN photodetectors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(2): 261-266.

[6] 丰亚洁，何晓颖，刘巧莉，等. Si 基 PIN 光电探测器电场隔离结构对暗电流的影响[J]. 半导体光电，2017，38(6)：802-805.
Feng Yajie, He Xiaoying, Liu Qiaoli, et al. The effect of electric field isolation structure on dark current in Si-based PIN photodetectors[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(6): 802-805.

[7] Wang Z, Yu R, Wang X, et al. Ultrafast response p-Si/n-ZnO heterojunction ultraviolet detector based on pyro-phototronic effect[J]. Adv. Materials, 2016. 28(32): 6880-6886.

[8] Ohta H, Hirano M, Nakahara K, et al. Fabrication and photoresponse of a pn-heterojunction diode composed of transparent oxide semiconductors, p-NiO and n-ZnO [J]. Appl. Phys. Lett., 2003, 83(5): 1029-1031.

[9] Iakovleva N I. The study of dark currents in HgCdTe heterostructure photodiodes[J]. J. of Commun. Technol. and Electron., 2021, 66: 368-374.

[10] Sochacki T A. Electrical properties of isotype and anisotype ZnO/4H-SiC heterojunction diodes[J]. Appl. Phys. Lett., 2017, 110(14): 143509.

作者简介：

张彩珍(1972—)，女，甘肃省定西市人，博士，教授，主要从事半导体材料与器件的研究。