

一种 ZnO 单晶肖特基结 X 射线探测器及其特性研究

黄丹阳^{1,2}, 赵小龙^{1,2}, 贺永宁^{1,2}, 彭文博^{1,2}

(1. 西安交通大学电子与信息学部, 710049, 西安; 2. 西安市微纳电子与系统集成重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对传统的硅基辐射探测器在极端环境应用中表现出抗辐照和耐高温能力差的问题, 提出并实现了一种采用 ZnO 单晶制备的肖特基结 X 射线探测器, 并对其各项电学特性进行了测试分析。利用磁控溅射法在 ZnO 单晶的两面分别制备了 Au 电极和 Al 电极; 在 400 °C 下退火使得 Au-ZnO 形成肖特基接触, Al-ZnO 形成欧姆接触。常温暗场条件下电流特性测试结果表明: 器件的反向电流与温度的倒数成指数关系; 在 -10 V 反向偏置电压下的器件电流为 15 μ A, 10 V 正向偏置电压下的电流为 100 μ A; 在偏置电压为 -10 V 时测量器件对 X 射线的响应, 发现响应电流随射线电子束流的增加而增加; 当加速电压为 30 keV、入射 X 射线电子束流在 1~10 μ A 范围内时器件有较高的能量分辨率; 在偏置电压为 -10 V 条件下对器件施加以周期性光照时, 器件上升时间和下降时间分别为 0.04 s 和 3.59 s, 响应速度快且重复性好。该研究结果表明, 基于 ZnO 单晶的 Au/ZnO/Al 结构的肖特基结探测器件在 X 射线探测领域具有较好的应用前景。

关键词: ZnO 单晶; 肖特基结; X 射线探测; 半导体探测器

中图分类号: TN364 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202209018 **文章编号:** 0253-987X(2022)09-0169-07



OSID 码

Characterizations of Schottky X-Ray Detector Based on ZnO Single Crystal

HUANG Danyang^{1,2}, ZHAO Xiaolong^{1,2}, HE Yongning^{1,2}, PENG Wenbo^{1,2}

(1. Faculty of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. The Key Lab of Micro-Nano Electronics and System Integration of Xi'an City, Xi'an 710049, China)

Abstract: As traditional silicon-based radiation detectors reveal their intolerance to radiation and high temperature, a Schottky junction X-ray detector based on ZnO single crystal is proposed and realized. Its various electrical characteristics are measured and analyzed. Au electrode and Al electrode are fabricated on the front side and back side of the ZnO single crystal by RF magnetron sputtering method. The device is annealed at 400 °C to get a Schottky contact with Au and ZnO and ohmic contact with Al and ZnO. The results of current characteristic tests at room temperature in the dark show that the reverse current of the device is exponentially related to the reciprocal of temperature, and the current is 15 μ A at a reverse bias voltage of -10 V and 100 μ A at 10 V. The response of the device to X-ray is measured at a bias voltage of -10 V, and it is found that the response current increases with the increase of the ray electron beam. Higher energy resolution is achieved when the incident tube current ranges from 1-10 μ A while the acceleration voltage is 30 keV. When the device is periodically illuminated at a bias voltage of

-10 V, the device has a rise time and fall time of 0.04 s and 3.59 s respectively and has quick response and good reproducibility. The study results show that Au/ZnO/Al structured Schottky detector has application prospect for the X-ray detection field.

Keywords: ZnO single crystal; Schottky junction; X-ray detection; semiconductor detector

氧化锌作为第三代半导体材料,在发光二极管^[1]、激光二极管^[2-3]、传感器^[4]等方面具有重要的应用前景。与 GaN, SiC 等其他宽禁带半导体材料相比, ZnO 激子束缚能高、耐辐照性好,化学和热稳定性好,且材料易得、电子诱生缺陷少,成膜性强,薄膜的外延生长温度较低,这些都有利于制备高性能的辐射探测器^[5-6]。但是,由于高质量块体氧化锌单晶生长困难,磁控溅射制备的 ZnO 薄膜^[7-9]和 ZnO 纳米线^[10]成为各种 ZnO 探测器中 ZnO 材料的主要形式。近几年,随着块体高质量氧化锌单晶的生长成为可能^[11-13],将其应用在辐射探测领域的可行性值得研究。

X 射线的能量范围是 120 eV~120 keV。由于 X 射线对生物组织和很多物质有很好的穿透能力,经常被用在射线照相技术中,比如 X 射线 CT 扫描和无损系统。这些应用中的 X 射线探测器必须具有高灵敏度和高的能量分辨率,同时要易于得到且对环境无害。目前,成熟的半导体核辐射探测器以硅基材料为主,然而在极端环境应用中,硅探测器表现出抗辐照和耐高温能力差的缺点^[14-15]。以 GaN、SiC、ZnO、金刚石等为代表的第三代半导体具有大的禁带宽度、耐高温、耐辐照能力,使得基于宽禁带半导体材料的核辐射探测器有望在强辐照以及高温环境下使用。然而目前宽禁带半导体探测器工艺仍不成熟,制作成本非常高^[16],仍然处于研究阶段^[17-20]。ZnO 作为宽禁带半导体材料近年来也开始被用于核辐射探测,但是 ZnO 基核辐射探测器研究报道依然较少。

半导体探测器按器件结构可以分为光电导型半导体探测器、光伏型半导体探测器和金属-半导体-金属(M-S-M)型半导体探测器。其中光伏型半导体探测器又可分为 pn 结型和肖特基结型。相较于 pn 结型辐射探测器,肖特基势垒辐射探测器具有更低正向开启电压和更好的高频特性。

郭小川等使用 ZnO MSM 光电导器件作为惠斯通电桥结构的桥臂,实现了可将紫外光信号转换为电压信号输出的 ZnO 电桥式紫外单元,紫外可见对比度为 143.8,整体体积小于 1 mm³,且能够对 1 μ W~6 mW 范围的紫外光进行响应^[22]。日本科学

家 Haruyuki Endo 等用 Pt 和 Au 分别在高阻 ZnO 单晶的两面形成电导型辐射探测器,测试结果显示器件在 20 V 偏压下, X 射线源的加速电压为 60 keV 时流经探测器的电流随 X 光管电流的增加而线性增加,计算得到响应度为 1.5 μ C/Gy^[23]。验证了 ZnO 单晶应用于辐射探测领域的可行性。拉脱维亚科学家 Edgars Butanovs 等采用气-液-固方法制备出了 CdS, SnO₂ 和 ZnO 纳米线用于辐射探测, X 光管加速电压为 30 keV, 光管电流为 10 mA, 测试得到 CdS, SnO₂ 纳米线辐射探测器的响应速度快,暗电流小且明暗电流比大,而 ZnO 纳米线辐射探测器的暗电流较大,这必然会使探测器的应用受到限制^[24]。

本文探索了高阻 ZnO 单晶应用于辐射探测器的可行性。利用 ZnO 单晶制备出了高阻肖特基结,实现了将 X 射线信号转换为电流信号输出的 ZnO 肖特基结型探测器,从理论上探讨了不同温度下暗电流的影响因素及瞬态响应的过程。

1 ZnO 单晶肖特基结辐射探测器的制备

器件由尺寸为 5 mm×5 mm×0.2 mm 的 ZnO 单晶和电极组成,结构如图 1 所示。器件的制备工艺如下。

(1)制备 Al 电极。用高温胶带将氧化锌单晶的四周掩蔽起来,只露出边长约为 3 mm 的正方形电极区域。电极采用磁控溅射的方法制备,选用纯度为 99.999% 的 Al 靶,溅射工艺参数为:溅射功率 120 W,氩气流量为 15 cm³/min,气压为 1.2 Pa,溅射时间 10 min。

(2)在 ZnO 单晶的另一面制备 Au 电极。同样的方法,用高温胶带将 ZnO 单晶的非电极区域掩蔽起来,露出与 Al 电极同样大小的电极区域。Au 电极采用磁控溅射的方法制备,选用纯度为 99.99% 的 Au 靶,溅射工艺参数为:溅射功率 50 W,氩气流量 15 cm³/min,气压为 0.7 Pa,溅射时间 15 min。

(3)真空热处理,将制备好的 ZnO 单晶肖特基结器件放入高温炉进行热处理,使得 ZnO 与 Al 和 Au 分别形成良好的欧姆接触和肖特基接触。热处理过程中高温炉内一直抽真空,真空度为 1~10

Pa,温度为 400 ℃,热处理时间 1 h。

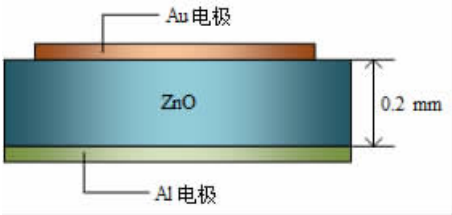


图 1 ZnO 单晶肖特基结结构

Fig.1 Schematic diagram of ZnO single crystal Schottky junction device

2 测试与结果分析

2.1 不同温度下器件暗场 I-V 测试

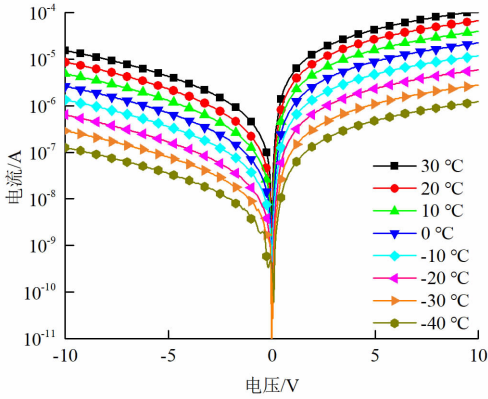
使用 Agilent B2902A 型精密源/测量单元和高低温湿热试验箱 (SETH-Z-022L, Shanghai Espec Environmental Equipment Corp.) 对器件进行不同温度下的电源输出和电流-电压特性测试。测量温度范围从 -40 ℃ 到 30 ℃,电压范围为 -10 V 到 10 V。测试得到的结果如图 2(a) 所示,一定温度下流经肖特基结的电流随外加偏压的增大而增大。外加偏压绝对值相同的条件下,正向电流值比反向电流值大一个数量级,器件具有整流效应,ZnO-Au 间形成了肖特基接触,ZnO-Al 间形成欧姆接触^[25]。常温 30 ℃ 的条件下,-10 V 偏压时器件反向电流仅为 15 μA,10 V 偏压下器件的正向电流为 100 μA,整流比约为 7,磁控溅射 Au 电极对 ZnO 单晶表面的损伤是导致器件整流特性较低的原因。

器件在 -10 V 偏压下测量得到的 $\ln |I| - 1/T$ 关系绘制在如图 2(b) 中,可以看到反向电流值随温度的升高而迅速的增加,反向电流对数值随温度的倒数变化的斜率为 -4 832 K。

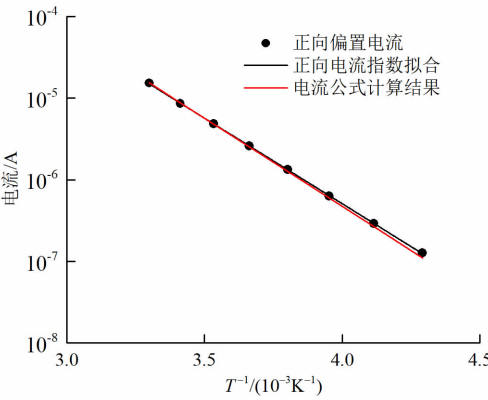
由于 ZnO 单晶厚度为 0.2 mm,正负电极间距较大,需要考虑 ZnO 体电阻的影响。器件等效结构示意图如图 2(c) 所示,主要由一个肖特基结和串联电阻构成。器件反向偏置时,肖特基结反偏电流占主导地位。由于 ZnO 单晶具有较高的电阻率,耗尽区的宽度将大于电子的平均自由程,所以 Au/ZnO 构成的肖特基结适用于扩散理论^[26-28]。电流随电压变化关系^[29]为

$$I = n_0 q \mu_n A \sqrt{\frac{2qN_D[V_D - (V - IR_s)]}{\epsilon_r \epsilon_0}} \cdot \exp\left(-\frac{qV_D}{k_0 T}\right) \left[\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{kT}\right) - 1\right] \quad (1)$$

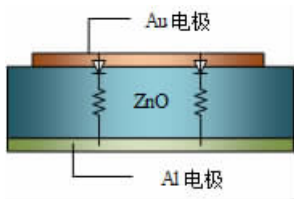
式中: n_0 为暗场电子浓度; q 为电子电荷量; μ_n 为电



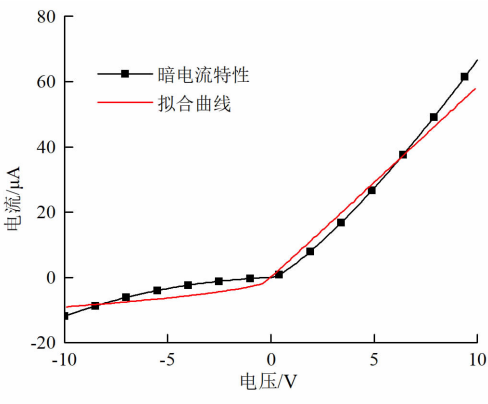
(a) 肖特基结在不同温度下的暗场 I-V 特性



(b) 肖特基结在 -10 V 偏压下电流随温度变化特性



(c) 肖特基器件等效结构示意图



(d) 暗电流数据拟合

图 2 器件暗场特性

Fig.2 Device characteristics in the dark

子迁移率; A 为器件电流流过的横截面积; N_D 为施主缺陷浓度; R_s 为串联电阻阻值; qV_D 为半导体一侧的电子势垒高度; V 为外加偏压值; ϵ_r 为 ZnO 相对介电常数; ϵ_0 为真空介电常数; k_0 为玻尔兹曼常数; T 为温度。

反向偏压下式(1)中最后一项约为 -1 , 故反向电流可以表示为

$$I = -n_0 q \mu_n A \sqrt{\frac{2qN_D[V_D - (V - IR_s)]}{\epsilon_r \epsilon_0}} \exp\left(-\frac{qV_D}{k_0 T}\right) \quad (2)$$

对上式两边取对数可以得到电流和温度的关系为

$$\ln(|I|) = \ln\left[n_0 q \mu_n A \sqrt{\frac{2qN_D[V_D - (V - IR_s)]}{\epsilon_r \epsilon_0}}\right] - \frac{qV_D}{k_0 T} \quad (3)$$

$\ln(|I|)$ 与 $1/T$ 成线性关系, 斜率为 qV_D/k_0 。将由 $\ln|I| - 1/T$ 图像拟合获得的斜率代入上式可以计算出半导体一侧势垒高度 $qV_D = 0.42 \text{ eV}$ 。用式(1)对常温下的肖特基结暗电流曲线进行拟合, 拟合曲线如图 2(d)中红色曲线所示, 从中得到半导体一侧势垒高度为 0.3 eV , 串联电阻阻值为 $1.7 \times 10^5 \Omega$ 。通过以上两种方法得到的势垒值不同, 这是因为式(3)第一项中 n_0 的计算公式为

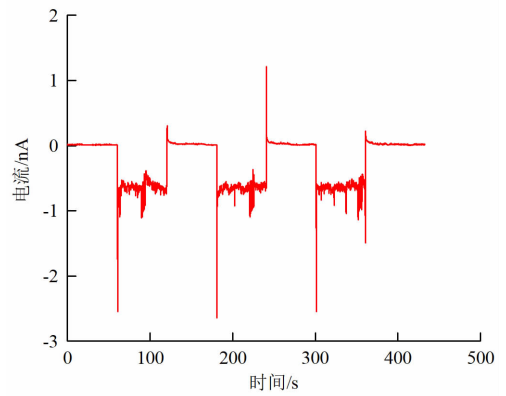
$$n_0 = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_C}{k_0 T}\right) \quad (4)$$

n_0 也为温度的函数, 由 $\ln(|I|) - 1/T$ 关系直接得到的 V_D 忽略了这一部分的影响, 因而存在偏差。将 $V_D = 0.3 \text{ V}$ 代入式(2), 同时将(4)式代入, 计算得到暗电流随温度变化如图 2(b)中红色曲线所示, 理论计算值与实际测量值有较高的一致性。

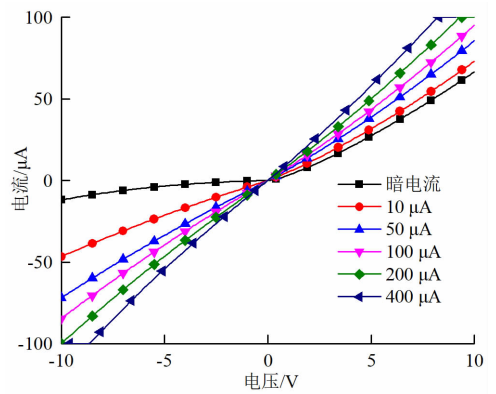
2.2 X 射线响应测试结果及分析

2.2.1 短路电流测试

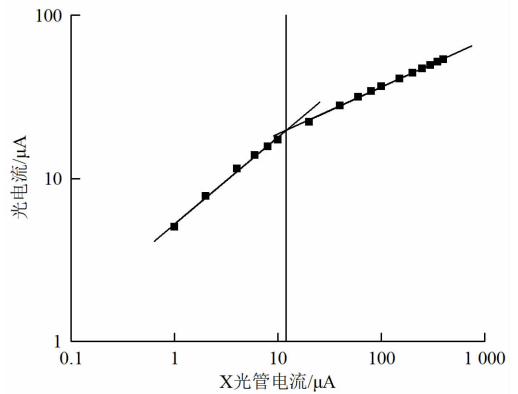
为了验证 ZnO 与 Au 之间确实形成了肖特基结, 用 X 射线源和 Agilent B2902A 型测量单元测量该器件的短路电流。探测器偏置电压为 0 V , 给器件施加一个周期性的 X 射线方波信号, 120 s 为一个周期, 占空比为 50% , 射线源加速电压为 30 keV , 光管电流为 $400 \mu\text{A}$, 记录下电流随时间的变化如图 3(a)所示。器件有光电流响应, 光电流值约为 0.7 nA 。由于 ZnO 的费米能级高于 Au 的费米能级, 当它们紧密接触时 ZnO 中靠近界面处的电子会向 Au 电极流动, 留下不能移动的电离施主在 Au-ZnO 界面处形成空间电荷区。空间电荷区内存在内建电场, 方向由 ZnO 体内指向 ZnO-Au 界面处。X 射线



(a) 肖特基结的短路电流瞬态响应曲线



(b) 肖特基结对不同强度 X 射线的 $I-V$ 响应曲线



(c) 光电流随 X 光管电流变化特性

图 3 器件 X 射线探测特性

Fig. 3 Device characteristics of X-ray detection

在 ZnO 耗尽区内激发出光生电子-空穴对, 由于内建电场的存在, 光生空穴向 Au 电极漂移, 电子向 ZnO 体内漂移, 从而形成从 ZnO 体内流向 Au 电极的电流。在 X 射线源照射和关闭的瞬间可以观察到器件的电流响应有一个跳变尖峰, 这是由于 ZnO 晶体的热释电效应导致的^[30]。在施加和关闭 X 射线的一瞬间, ZnO 的温度特性会产生变化, 而温度变化会使得 ZnO 材料产生极化, 从而影响 ZnO 的

电流响应。这个瞬态的温度变化很快就可以恢复至稳态值,从而产生电流响应中的尖峰。

短路电流随入射 X 射线的周期性变化证明 ZnO-Au 界面处形成了良好的肖特基结。

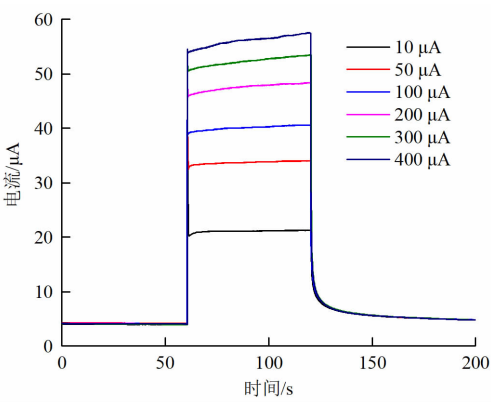
2.2.2 X 射线稳态响应测试

使用 Agilent B2902A 型精密源/测量单元和 X 射线源进行器件的 X 射线响应测试。X 射线源的加速电压为 30 keV,改变电子束流 I_x 测试器件对不同射线强度的响应,得到的结果如图 3(b)所示,图中黑色的线为常温下的暗电流曲线。随着电子束流的增大,器件的正反向电流与暗电流相比均有提升,反向偏压下的光电流值更大。这是因为反向偏压下 Au-ZnO 界面处有更宽的空间电荷区,空间电荷区中的载流子浓度远小于体内,电子和空穴的复合受到抑制,因而有更大的光电流值。制备出的探测器等效为肖特基结和 ZnO 体电阻的串联,入射 X 射线剂量较小时,光生电子和空穴在肖特基结耗尽区内复合较少,绝大部分光生载流子都能被很好地收集;当 X 射线强度变大时,耗尽区中不再满足小注入条件,即 $\Delta n \ll n_0$,光生载流子的复合作用增强,收集效率变低,此时器件的电流特性主要表现为 ZnO 体电阻的特性。由于产生的载流子有较高的能量能够越过肖特基势垒,器件的整流特性变弱,器件的 I - V 响应曲线逐渐趋于一条直线,肖特基接触变为欧姆接触。

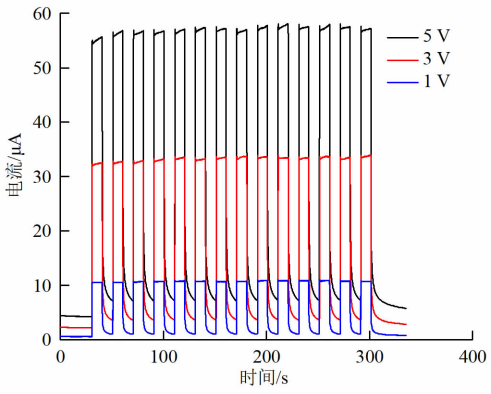
图 3(c)是探测器在 -10 V 偏压下得到的 $\ln I$ - $\ln I_x$ 关系。当 X 光管电流大于 $1\ \mu\text{A}$ 而小于 $10\ \mu\text{A}$ 时,光电流与电子束流的关系可以表示为 $\ln I \propto \ln I_x$,斜率为 1.32;当电子束流大于 $10\ \mu\text{A}$ 小于 $400\ \mu\text{A}$ 时, $\ln I$ - $\ln I_x$ 呈斜率为 0.075 的线性关系变化。这与之前的分析一致,即小剂量入射时器件能够更好的收集光生载流子,而大剂量入射时由于破坏了小注入条件,器件的收集效率变低。由以上分析可见,制备的肖特基结型射线探测器在探测低剂量射线时有更好的分辨率。

2.2.3 X 射线开关特性测试

对于射线探测器,响应速度是重要特性之一。为了测量器件的响应速度,给 -10 V 偏压下的器件施加加速电压为 30 keV 而 X 光管电流不同的 X 射线方波信号,高电平时间为 60 s,量化计算器件的瞬态响应特性。定义上升时间 τ_r 为电流从所加偏置电压下稳态光电流的 10% 上升到 90% 的时间,下降时间 τ_f 为所加偏置电压下稳态光电流从 90% 下降到 10% 的时间。根据测试结果图 4(a),计算得到上



(a)肖特基结器件对不同强度 X 射线的开关响应曲线



(b)肖特基结在不同偏压下对 X 射线的多次开关响应曲线

图 4 器件对 X 射线的瞬态响应

Fig. 4 Transient response to X-ray

升时间均值为 0.04 s,下降时间均值为 3.59 s,其中上升时间仅为文献[31]报导的 0.13 倍,器件探测不同剂量射线的响应速度没有显著的差异,器件的瞬态响应特性优良。ZnO 探测 X 射线瞬态响应过程中,其响应快慢主要由体效应和表面缺陷态两部分贡献^[22]。体效应是电子得到能量从价带跃迁至导带的过程,是一个快过程,而表面态缺陷则是 ZnO 表面对空气中的氧气吸附与解吸的过程,是慢过程。在此器件中,由于 ZnO 单晶的两面分别镀上了金属 Al 和 Au,ZnO 表面效应导致的慢响应过程得到了抑制,体效应主导了器件的响应过程,因而器件具有较快的响应速度。

接着,将器件分别偏置在 -1 V、-3 V 和 -5 V 电压下测量器件对 X 射线的多次瞬态响应,X 射线加速电压为 30 keV,X 光管电流为 $400\ \mu\text{A}$,方波信号周期为 20 s,占空比为 50%,得到图 4(b)瞬态响应曲线。器件的稳态电流值随外加偏压绝对值的增大而增大,在 14 次开关响应中不同偏压下的稳态电流值均保持定值,说明器件的探测重复性良好,器件

特性稳定。

3 结 论

本文通过磁控溅射在 ZnO 单晶的两面分别沉积 Al 电极和 Au 电极, 400 °C 热退火后 Au 电极与 ZnO 之间形成了良好的肖特基接触。对制备出来的肖特基器件进行特性测试, 暗场条件下对器件进行 -40 °C 到 30 °C 的 I - V 测试, 发现器件具有整流特性, 30° 时 10 V 正向偏压下器件电流为 100 μ A, -10 V 反向偏压下器件电流为 15 μ A, 正反向电流值均随温度的增加而成指数倍增长。接着测量了器件在 0 V 偏置电压下的光电导效应, 证明了肖特基结的存在。对器件进行稳态 X 射线响应测试, $\ln I$ 与 $\ln I_x$ 成线性关系, 当 X 射线源的电子束流在 1 μ A~10 μ A 范围内时, 器件具有较高的分辨率。器件的瞬态测试表明, 器件在 -10 V 偏压下对不同强度的 X 射线的响应速度较快且与射线强度弱相关, 平均上升时间为 0.04 s, 下降时间为 3.59 s。对器件进行多次重复性开关响应测试, 稳态电流一致, 器件的重复特性良好, 响应稳定。该论文研究工作表明, 单晶 ZnO 与 Au 形成的肖特基结能够作为响应快速且线性度好的探测器件在辐射探测领域应用。

参考文献:

- [1] 常艳玲, 张琦锋, 孙晖, 等. ZnO 纳米线双绝缘层结构电致发光器件制备及特性研究 [J]. 物理学报, 2007, 56(4): 2399-2404.
CHANG Yanling, ZHANG Qifeng, SUN Hui, et al. Development and behavior study of a ZnO nanowire-based electroluminescence device with double insulating-layer structure [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(4): 2399-2404.
- [2] HUANG M H, MAO S, FEICK H, et al. Chem-Inform abstract: room-temperature ultraviolet nanowire nanolasers [J]. Chem Inform, 2001, 32(40): 1897-1899.
- [3] LIU Ruibin, ZOU Bingsuo. Lasing behaviour from the condensation of polaronic excitons in a ZnO nanowire [J]. Chinese Physics: B, 2011, 20(4): 047104.
- [4] DAS S N, MOON K J, KAR J P, et al. ZnO single nanowire-based UV detectors [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(2): 022103.
- [5] 韦敏, 邓宏, 王培利, 等. ZnO 基紫外探测器的研究进展与关键技术 [J]. 材料导报, 2007, 21(12): 1-5.
WEI Min, DENG Hong, WANG Peili, et al. Research progress and key technologies of ZnO-based UV detectors [J]. Materials Review, 2007, 21(12): 1-5.
- [6] 赵懿琨, 连洁, 张飒飒, 等. ZnO 基紫外探测器的研究进展 [J]. 材料导报, 2006, 20(1): 109-112.
ZHAO Yikun, LIAN Jie, ZHANG Sasa, et al. Recent advances in research on UV detector based on ZnO [J]. Materials Review, 2006, 20(1): 109-112.
- [7] ZHAO Xiaolong, HUANG Danyang, HE Yongning, et al. Demonstration of an n-ZnO/p-Si/n-Si heterojunction bipolar phototransistor for X-ray detection [J]. Solid-State Electronics, 2022, 188: 108221.
- [8] ZHAO Xiaolong, CHEN Liang, PENG Wenbo, et al. Study of a neutron-resistant p⁺-Si/n-ZnO photodetector with avalanching gain [J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2020, 318: 112375.
- [9] ZHAO Xiaolong, HUANG Danyang, LI Ganggui, et al. High sensitivity X-ray detector based on a 25 μ m-thick ZnO film [J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2022, 334: 113310.
- [10] PENG Wenbo, PAN Zijian, LI Fangpei, et al. Pyrophototronic effect enhanced ZnO nanowire-based tri-layer heterojunction for visible light sensing and communication [J]. Nano Energy, 2020, 78: 105268.
- [11] 魏学成, 赵有文, 董志远, 等. ZnO 单晶的缺陷及其对材料性质的影响 [J]. 半导体学报, 2006, 27(10): 1759-1762.
WEI Xuecheng, ZHAO Youwen, DONG Zhiyuan, et al. Defects and their influence on properties of bulk ZnO single crystal [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(10): 1759-1762.
- [12] OKA K, SHIBATA H, KASHIWAYA S. Crystal growth of ZnO [J]. Journal of Crystal Growth: Part 1, 2002, 237/238/239: 509-513.
- [13] NAUSE J, NEMETH B. Pressurized melt growth of ZnO boules [J]. Semiconductor Science and Technology, 2005, 20(4): S45-S48.
- [14] MCGREGOR D S, HERMON H. Room-temperature compound semiconductor radiation detectors [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section: A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1997, 395(1): 101-124.
- [15] OWENS A, PEACOCK A. Compound semiconductor radiation detectors [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section: A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2004, 531(1/2): 18-37.
- [16] 赵小龙, 康雪, 陈亮, 等. ZnO 半导体电导型 X 射线探测器件研究 [J]. 物理学报, 2014, 63(9): 098502.
ZHAO Xiaolong, KANG Xue, CHEN Liang, et al.

- Study of ZnO photoconductive X-ray detector [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(9): 098502.
- [17] GUO Shuwen, ZHAO Xiaolong, HE Yongning, et al. Low-voltage and high-gain ultraviolet detector based on 4H-SiC n-p-n bipolar phototransistor [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, 68(5): 2342-2346.
- [18] GUO Shuwen, ZHAO Xiaolong, HE Yongning, et al. Visible-blind photodetector based on p-i-n junction 4H-SiC vertical nanocone array [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, 68(12): 6208-6215.
- [19] VAITKUS J, CUNNINGHAM W, GAUBAS E, et al. Semi-insulating GaN and its evaluation for α particle detection [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section: A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, 509(1/2/3): 60-64.
- [20] KANIA D R, LANDSTRASS M I, PLANO M A, et al. Diamond radiation detectors [J]. *Diamond and Related Materials*, 1993, 2(5/6/7): 1012-1019.
- [21] 马宏宇. ZnO 量子点及其紫外探测器的制备与特性研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [22] 郭小川, 彭文博, 蔡亚辉, 等. 小体积电压输出型 ZnO 惠斯通电桥式紫外探测单元 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(1): 184-192.
- GUO Xiaochuan, PENG Wenbo, CAI Yahui, et al. A ZnO Wheatstone bridge type UV detection unit with small volume and voltage output capability [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(1): 184-192.
- [23] ENDO H, CHIBA T, MEGURO K, et al. Fabrication and characterization of a ZnO X-ray sensor using a high-resistivity ZnO single crystal grown by the hydrothermal method [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section: A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, 665: 15-18.
- [24] BUTANOV E, KUZMIN A, BUTIKOVA J, et al. Synthesis and characterization of ZnO/ZnS/MoS₂ core-shell nanowires [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2017, 459: 100-104.
- [25] 李新坤, 张天宇, 王增斌. ZnO 薄膜器件欧姆电极的高掺杂接触法制备 [J]. *半导体光电*, 2014, 35(4): 633-636, 641.
- LI Xinkun, ZHANG Tianyu, WANG Zengbin. Fabrication of high-quality ohmic contacts between Al and ZnO thin films by introducing high doping layer [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, 35(4): 633-636, 641.
- [26] HE Yongning, ZHAO Xiaolong, WANG Xuyang, et al. Characterizations of an X-ray detector based on a Zn₂SiO₄ film [J]. *Sensors and Actuators: A Physical*, 2015, 236: 98-103.
- [27] 张景文, 任丙振, 侯洵. ZnO 基金属/半导体肖特基接触的研究 [J/OL]. 中国科技论文在线, 2007 [2022-01-24]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200702-180>.
- ZHANG Jingwen, REN Bingzhen, HOU Xun. The study of ZnO based metal/semiconductor schottky contact [J/OL]. *Sciencepaper Online*, 2007 [2022-01-24]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200702-180>.
- [28] 顾建龙. n 型 ZnO 欧姆接触及肖特基接触电极的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [29] 施敏, 伍国珏, 耿莉, 等. 半导体器件物理 [M]. 3 版. 张瑞智, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2008.
- [30] WANG Zhaona, YU Ruomeng, WANG Xingfu, et al. Ultrafast response p-Si/n-ZnO heterojunction ultraviolet detector based on pyro-phototronic effect [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(32): 6880-6886.
- [31] 祁晓萌, 彭文博, 赵小龙, 等. 基于高阻 ZnO 薄膜的光电导型紫外探测器 [J]. *物理学报*, 2015, 64(19): 198501.
- QI Xiaomeng, PENG Wenbo, ZHAO Xiaolong, et al. Photoconductive UV detector based on high-resistance ZnO thin film [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(19): 198501.

(编辑 荆树蓉 刘杨)