



NiO/GaN p-n结紫外探测器及自供电技术

王顺利 王亚超 郭道友 李超荣 刘爱萍

NiO/GaN p-n junction ultraviolet photodetector and self-powered technology

Wang Shun-Li Wang Ya-Chao Guo Dao-You Li Chao-Rong Liu Ai-Ping

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 70, 128502 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210154

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210154>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

自驱动柔性生物医学传感器的研究进展

Research progress of self-powered flexible biomedical sensors

物理学报. 2020, 69(17): 178704 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201012>

基于p-n结中反常光电转换现象的新型带间跃迁量子阱红外探测器

Anomalous light-to-electricity conversion of low dimensional semiconductor in p-n junction and interband transition quantum well infrared detector

物理学报. 2018, 67(12): 128101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180588>

用于触觉感知的自供能可拉伸压电橡胶皮肤电子器件

Stretchable self-powered epidermal electronics from piezoelectric rubber for tactile sensing

物理学报. 2020, 69(17): 178701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200664>

超宽禁带半导体 β -Ga₂O₃及深紫外透明电极、日盲探测器的研究进展

Ultra-wide bandgap semiconductor of β -Ga₂O₃ and its research progress of deep ultraviolet transparent electrode and solar-blind photodetector

物理学报. 2019, 68(7): 078501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181845>

溶液法制备的金属掺杂氧化镍空穴注入层在钙钛矿发光二极管上的应用

Perovskite light-emitting diodes based on solution-processed metal-doped nickel oxide hole injection layer

物理学报. 2020, 69(1): 018101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191269>

基于氧化镍背接触缓冲层碲化镉薄膜太阳电池的研究

Nickel oxide as back surface field buffer layer in CdTe thin film solar cell

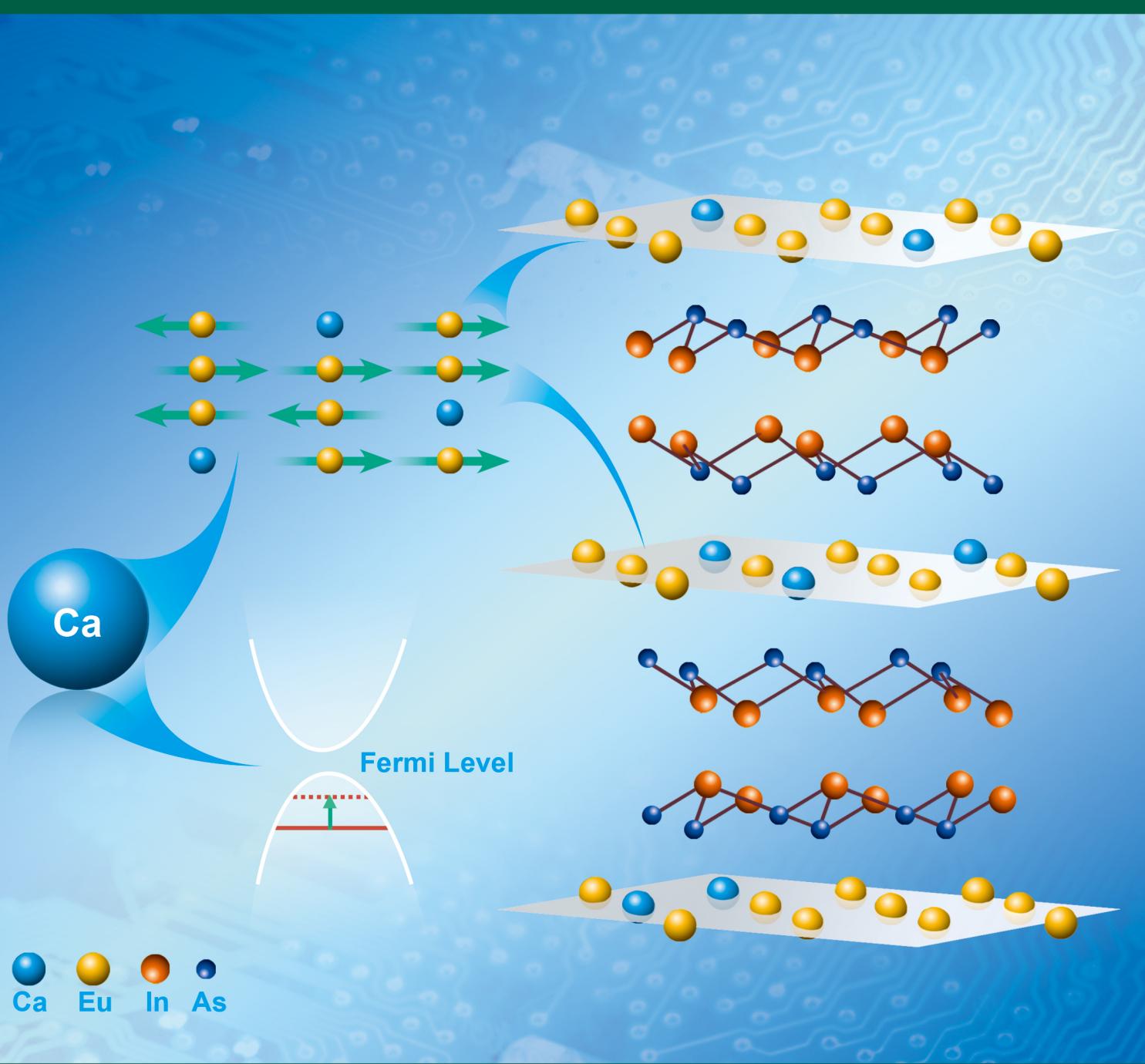
物理学报. 2017, 66(11): 117301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.117301>

物理学报

Acta Physica Sinica

12

2021 Vol.70
ISSN 1000-3290



中国物理学会 | 中国科学院物理研究所

Chinese Physical Society | Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences

物理学报

第 70 卷 第 12 期 2021 年 6 月 20 日

目 次

专题: 二维磁性材料

- 120101 二维磁性材料专题编者按 聂天晓 邵启明
 综述
127301 大面积二维磁性材料的制备及居里温度调控 王海宇 刘英杰 寻璐璐 李竞 杨晴 田祺云 聂天晓 赵巍胜
127302 层状磁性拓扑材料中的物理问题与实验进展 孙慧敏 何庆林
127303 二维材料中贝里曲率诱导的磁性响应 刘雨亭 贺文宇 刘军伟 邵启明
127501 基于二维材料的自旋-轨道矩研究进展 何聪丽 许洪军 汤建 王潇 魏晋武 申世鹏 陈庆强 邵启明 于国强 张广宇 王守国
127503 二维磁性材料及多场调控研究进展 肖寒 弼孟娟 王以林
127504 二维 CrI₃ 晶体的磁性测量与调控 张颂歌 陈雨彤 王宁 柴扬 龙根 张广宇
127801 二维磁性材料的物性研究及性能调控 蒋小红 秦泗晨 幸子越 邹星宇 邓一帆 王伟 王琳
 研究论文
127502 轴子拓扑绝缘体候选材料层状 Eu_{1-x}Ca_xIn₂As₂ 的物性研究 易恩魁 王彬 沈韩 沈冰
129101 Fe₃GeTe₂/h-BN/石墨烯二维异质结器件中的高效率自旋注入 杨维 韩江朝 曹元 林晓阳 赵巍胜

专题: 太赫兹生物物理

- 128201 砷(III)对 p53 突变蛋白活性恢复作用的太赫兹物理机制 唐朝 张广旭 胡钧 吕军鸿

综述

- 123201 超冷长程 Rydberg-基态分子 白素英 白景旭 韩小萱 焦月春 赵建明
128804 基于光子晶体的有机太阳能电池研究进展 兰伟霞 顾嘉陆 高晓辉 廖英杰 钟宋义 张卫东 彭艳 孙钰 魏斌

总论

- 120201 软体机器人用多孔聚合物水凝胶的摩擦接触非线性行为 陈康 沈煜年
120301 基于里德伯超级原子快速制备三粒子单重态 计彦强 王洁 刘颖莉 张大伟 肖瑞杰 董莉 修晓明
120302 纠缠光子对的级联 Hong-Ou-Mandel 干涉研究及其在多时延参数测量中的应用 翟艺伟 董瑞芳 权润爱 项晓 刘涛 张首刚
120501 耦合前包钦格复合体神经元中复杂混合簇放电的动力学 赵雅琪 刘谋天 赵勇 段利霞

核物理学

- 122101 钷原子簇自发磁矩的实验观测及理论分析 邱淑红 张阳 杨会静 伞星原 刘会媛 张素恒 李繁麟 太军君 周春丽
122801 U_{1-x}Th_xO₂ 混合燃料力学性能的分子动力学模拟 辛勇 包宏伟 孙志鹏 张吉斌 刘仕超 郭子萱 王浩煜 马飞 李垣明

原子和分子物理学

- 123101 柠单宁特征功能基团与金属离子作用的计算分析 … 刘智高 陈涛 胡朝浩 王殿辉 王仲民 李桂银
123102 硅醚/石墨醚异质结构光电性质的理论研究 ……………… 张颖 刘春生

电磁学、光学、声学、传热学、经典力学和流体动力学

- 124201 基于亚波长光栅和三明治结构的偏振无关微环谐振器的设计与仿真 … 汪静丽 张见哲 陈鹤鸣
124301 黏弹介质包裹的液体腔中气泡的动力学分析 … 张陶然 莫润阳 胡静 陈时 王成会 郭建中
124302 Doppler-warping 变换及其应用在声学目标运动速度估计 … 高德洋 高大治 迟静 王良 宋文华
124501 气-液-固三相流混合建模与求解方法 ……………… 范兴华 谭大鹏 李霖 殷梓超 王彤
124601 二维近零折射率声学材料的负向 Schoch 位移 ……………… 刘向东 吴福根 姚源卫 张欣
124701 非牛顿流体剪切稀化特性的分子动力学模拟 ……………… 杨刚 郑庭 程启昊 张会臣
124702 物性参数对液滴的聚并自弹跳的影响及其关联分析 ……………… 王宇航 袁猛 明平剑

凝聚物质: 结构、力学和热学性质

- 126101 纳米结构及浸润性对液滴润湿行为的影响 ……………… 李文 马晓婧 徐进良 王艳 雷俊鹏
126102 离子径迹特征与纳米反相器链单粒子瞬态的关联性研究 … 赵雯 陈伟 罗尹虹 贺朝会 沈忱
126401 胶体聚合物弹性模量的微观理论: 键长的效应 ……………… 张博凯

凝聚物质: 电子结构、电学、磁学和光学性质

- 127505 Fe_mB_{20} ($m = 1, 2$) 团簇中超快自旋动力学的第一性原理研究 ……………… 卢欣 谢孟琳 刘景 金蔚 李春 Georgios Lefkidis Wolfgang Hübner
127701 取向相关的 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ 外延薄膜的相图和介电性能 ……………… 白刚 林翠 刘端生 许杰 李卫 高存法
127702 一阶回转曲线图谱法及其在 HfO_2 基铁电薄膜极化翻转行为研究中的应用 ……………… 石志鑫 周大雨 李帅东 徐进 Uwe Schröder
127901 真空罐穿舱法兰介质微放电的实验研究 … 王新波 白鹤 孙勤奋 殷新社 张洪太 崔万照

物理学交叉学科及有关科学技术领域

- 128101 基于单层二硫化钼的高品质因子、高品质因数的四波段完美吸收器 ……………… 蒋黎英 易颖婷 易早 杨华 李治友 苏炬 周自刚 陈喜芳 易有根
128401 $\text{Cu}_{1.8-x}\text{Sb}_x\text{S}$ 热电材料的相结构与电热输运性能 … 赵英浩 张瑞 张波萍 尹阳 王明军 梁豆豆
128501 二阶梯度交叉耦合超导量子干涉仪电流传感器研制 ……………… 徐达 钟青 曹文会 王雪深 王仕建 李劲劲 刘建设 陈炜
128502 NiO/GaN p-n 结紫外探测器及自供电技术 ……………… 王顺利 王亚超 郭道友 李超荣 刘爱萍
128801 空间电荷层效应对固体氧化物燃料电池三相界面附近氧空位传输的影响 ……………… 徐晗 张璐
128802 高效硫硒化锑薄膜太阳电池中的渐变能隙结构 ……………… 曹宇 蒋家豪 刘超颖 凌同 孟丹 周静 刘欢 王俊尧
128803 2-溴对苯二甲酸钝化的全无机钙钛矿电池的性能 ……………… 林明月 巨博 李燕 陈雪莲

文章图片的彩色效果详见网刊



扫码阅读
电子版

NiO/GaN p-n 结紫外探测器及自供电技术*

王顺利¹⁾²⁾ 王亚超¹⁾ 郭道友^{1)2)†} 李超荣¹⁾ 刘爱萍^{1)2)‡}

1) (浙江理工大学物理系, 浙江省光场调控技术重点实验室, 光电材料与器件中心, 杭州 310018)

2) (金华紫芯科技有限公司, 金华 321015)

(2021年1月22日收到; 2021年2月7日收到修改稿)

紫外探测器在火灾预警、导弹跟踪以及紫外线杀菌消毒的剂量检测方面有着很重要的作用, 与人类生活息息相关。随着探测系统集成化的发展, 对探测器的尺寸、能耗等方面的要求越来越严格, 需要外加电源工作的传统探测器已经不能满足这样的要求。于是本文提出了一种基于 NiO/GaN p-n 结的紫外探测器。利用磁控溅射的方法, 在高质量的 n-GaN 膜上(由金属有机化学气相沉积生长在蓝宝石衬底上)沉积一层 p-NiO, 构建了 NiO/GaN p-n 结, 在 ± 0.5 V 下显示出明显的二极管整流特性。利用结区产生的内建电场, 器件可以在没有外加偏压的条件下工作。0 V 下对 365 nm 的紫外光显示出 272.3 mA/W 的响应度以及高达 2.83×10^{14} Jones 的探测率。得益于薄膜良好的结晶性, 暗电流低至 10^{-10} A, 开关比 $> 10^3$, 同时响应速度达到 31 ms。这些优异的性能显示出了基于 NiO/GaN p-n 结的器件在紫外探测领域广阔的应用前景, 为未来智能化集成发展提供了新的思路。

关键词: 紫外探测器, 自供电技术, 氮化镓, 氧化镍

PACS: 85.30.-z, 85.60.Gz, 78.66.-w, 42.70.Qs

DOI: [10.7498/aps.70.20210154](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210154)

1 引言

近年来, 紫外探测器因为在导弹预警、火焰探测、臭氧层空洞监测, 以及紫外消毒剂量检测等方面的广泛应用而受到全世界研究人员的关注^[1-4]。传统的紫外探测器制备材料主要以第一代半导体和第二代半导体为主, 这些半导体禁带宽度小, 截止波长较大, 用于紫外探测时往往需要加上一层滤光片, 已不能满足目前的需求。

氮化镓(GaN)作为第三代半导体, 具有 3.4 eV 的带隙, 对应的吸收边为 365 nm, 是一种天然的紫外探测材料^[5,6]。同时优异的物理和化学性能使得它制备的器件具有较高的稳定性。近年来对基于 GaN 材料的紫外探测器的研究主要有以下几

种结构, 如金属-半导体-金属(metal-semiconductor-metal, MSM)型^[7]、肖特基结型^[8], 以及 p-n 结型^[9-11]等。对于 MSM 型探测器, 主要的问题来自于光熄灭后持续的光电导效应^[12], 这主要归因于固有缺陷的亚稳态, 如 Ga 空位和缺陷^[13]。近年来, 研究人员进行了不断的优化, 制备了具有出色光响应性的探测器, 但是这些探测器通常需要外加偏压工作, 这无形中增大了探测器的尺寸不利于小型化的发展趋势, 同时响应速度也较慢。在 p-n 结和肖特基结的结接触区由于不同材料之间的电势差会产生内建电场, 它使得光生载流子可以自发且快速的分离, 不仅能够提高响应速度同时还具有自供电的效果。肖特基结型探测器由于表面的金属电极阻碍了紫外光的入射, 使得探测器的光响应度不佳, 从而限制了它的发展。相比较而言, 具有自供

* 浙江省自然科学基金(批准号: LY20F040005) 和浙江理工大学科研启动基金(批准号: 20062224-Y) 资助的课题。

† 通信作者。E-mail: dyguo@zstu.edu.cn

‡ 通信作者。E-mail: liuaiping1979@gmail.com

电、快速光响应的 p-n 结探测器无疑具有巨大优势,有利于未来小型化、高效化、智能化的集成网络发展.

最近对基于 GaN 材料的 p-n 结探测器也有一些研究,例如 Su 等^[14]利用金属有机物化学气相沉积 (metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD) 和分子束外延的方法分别沉积 p-GaN 和 n-ZnO 构成 p-n 结器件,在 0 V 下对 358 nm 的光显示出 0.68 mA/W 的响应度; Zhu 等^[15]通过 MOCVD 法在 p-GaN 衬底上制备 n-ZnMgO 构成 p-n 结器件,0 V 下对 362 nm 的光具有 196 mA/W 的响应. 前者制备方法简单,但是器件的光响应性不佳. 后者光响应性有所提升但 n-ZnMgO 掺杂制备过程较为困难. NiO 作为一种天然的 p 型半导体材料,由于其较高的空穴迁移率而常被用作空穴传输材料^[16]. 优良热稳定性和高透明度,以及低成本制备的方法(磁控、旋涂)使得 NiO 成为一种合适的材料用于构筑 p-n 结器件.

之前的研究表明, NiO 与 GaN 之间具有良好的外延关系以及匹配的能带结构^[17–19]. Li 等^[20]曾报道了 NiO/GaN p-n 结在探测器方面的应用,但是没有研究自供电性能,另外利用热氧化将 Ni 氧化为 NiO 的两步制备法,不仅工艺复杂而且无法保证 Ni 完全被氧化为 NiO.

本文通过磁控溅射的方法,在 500 °C 下制备了 NiO 薄膜. GaN 和 NiO 薄膜良好的结晶性使得器件暗电流仅为 10^{-10} A, 匹配的能带结构使得制备的 GaN/NiO p-n 结具有明显的二极管整流特性. 在没有外加偏压的情况下,探测器对 365 nm 的紫外光显示出 272.3 mA/W 的响应度以及高达 2.83×10^{14} Jones 的探测率.

2 实验方法

2.1 NiO 薄膜的制备

利用磁控溅射的方法制备 p-NiO 薄膜,靶材选用纯度为 99.99% 的 NiO 陶瓷靶,溅射条件为 500 °C, Ar 流量为 20 sccm (1 sccm = 1 mL/min), O₂ 流量为 20 sccm, 压强为 2.0 Pa, 溅射功率为 50 W. 衬底选用的是苏州纳维科技有限公司所购买的 n-GaN 厚膜自支撑片,采用 MOCVD 法在 2 英寸的 (0001) 面蓝宝石衬底上制备,厚度约为 4.5 μm,载流子浓度为 3.2×10^{18} . 在沉积 NiO 薄

膜之前,将 GaN 切成 1 cm × 1 cm 的小片. 为了进行对比,同样选取了 (0001) 面蓝宝石作为衬底沉积 NiO 薄膜.

2.2 器件的制备与表征

分别在 GaN 与 NiO 膜上方磁控溅射 Ti/Au 作为复合电极. 通过 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD, D8Discovery)、紫外-可见分光光度计 (UV-2600)、场发射扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM, HITACHI S-4800) 分别对 NiO 膜和 GaN 膜进行表征. 利用半导体测量系统 (4200-SCS) 对器件的光电性能进行测试,使用的光源波长分别为 254 和 365 nm.

3 结果与讨论

在 Al₂O₃ 衬底上生长的不同时间的 NiO 薄膜的 XRD 结果如图 1(a) 所示,在 36.5°附近显示出明显的特征衍射峰并且除此之外再无其他衍射峰,说明制备的 NiO 薄膜具有良好的结晶性并且沿着 (111) 晶面择优生长. 随着溅射时间的增加,薄膜的厚度增大,晶体的衍射峰强度升高,半高峰宽减小,相应的结晶性变好. 图 1(a) 中其余 3 个位置的衍射峰均来源于蓝宝石衬底,其中 41.7°对应 Al₂O₃ 的 (0001) 面, 37.5°和 40°位置的小峰则对应 Al₂O₃ 的 (004) 和 (200) 面. 图 1(b) 是 NiO 薄膜紫外-可见吸收谱,可以看到 NiO 薄膜对紫外光有着强烈的吸收,利用 Tauc 等提出的公式^[21]

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

可以计算得出 NiO 薄膜的带隙为 $E_{g,NiO} = 3.24$ eV. 图 1(c) 为在 GaN 衬底上生长的 NiO 薄膜的 XRD 图,由于 GaN 的衍射峰太强和 NiO 膜较薄,所以只能观察到溅射 2 h 的 NiO 薄膜的 (111) 晶面的衍射峰,可看到在 GaN 上生长的 NiO 和在 Al₂O₃ 上生长的 NiO 具有相同的择优生长方向. 图 1(d) 为 GaN 薄膜和 GaN/NiO 复合薄膜的吸收光谱,可看到 GaN 薄膜对 365 nm 附近的紫外光具有强烈的吸收,并且复合了 NiO 薄膜之后,其对波长大于 365 nm 的光没有明显变化,但对小于 365 nm 的紫外光吸收有明显的增强. 说明覆盖的 NiO 薄膜具有良好的可见光透过性,不仅没有阻碍光的透过反而增强了光的吸收,有利于制备 p-n 结器件. 图 1(d) 插图显示 GaN 的光学带隙 $E_{g,GaN} = 3.36$ eV.

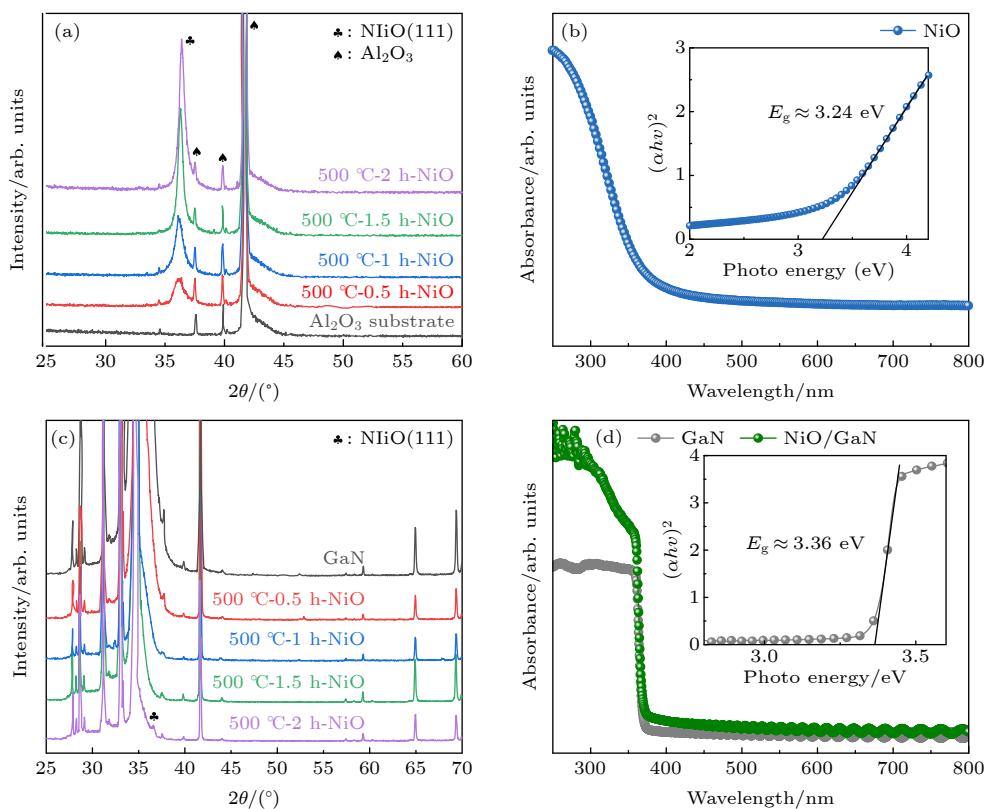


图 1 生长在蓝宝石衬底上的 NiO 薄膜的 XRD 图谱 (a) 和紫外-可见吸收图谱 (b) 以及 NiO 光学带隙 (插图); 生长在 GaN 膜上的 NiO 薄膜的 XRD 图谱 (c) 和紫外-可见吸收图谱 (d) 以及 GaN 的光学带隙 (插图)

Fig. 1. (a) XRD patterns and (b) UV-vis absorption spectra of the NiO film deposited on sapphire substrate (0001) plane. (panel (b) insert) Plots of $(\alpha h\nu)^2$ versus photon energy of the NiO film; (c) XRD patterns and (d) UV-vis absorption spectra of the NiO film deposited on GaN film. (panel (d) insert) Plots of $(\alpha h\nu)^2$ versus photon energy of the GaN film.

之后对 NiO/GaN p-n 结的电流-电压 ($I-V$) 特性进行了测试, 如图 2(c) 所示, 在黑暗条件下显示出了明显的整流特性, 插图为器件的简单示意图。为了验证这个整流效应是否来源于 GaN 与 NiO 构成的 p-n 结, 分别对单层 NiO MSM 结构和单层 GaN MSM 结构在相同条件下进行了 $I-V$ 测试, 结果如图 2(a) 和图 2(b) 所示。其中 NiO 显示出了良好的欧姆接触, GaN 显示出了准欧姆接触。插图中分别显示了两个器件在 0 V 偏压下对 365 nm 紫外光的电流-时间 ($I-T$) 光响应特性曲线, 可以看到此时两个器件在不外加电压的情况下几乎没有光电流产生。以上结果表明图 2(c) 所观察到的整流特性来源于 GaN 与 NiO 形成的 p-n 结, 同时 ± 0.5 V 下整流比大于 10^2 。图 2(d) 显示出了不同光强的 365 nm 紫外光照射下 NiO/GaN p-n 结器件的 $I-V$ 特性, 可以观察到在 0 V 下器件具有明显的光响应, 并且随着光强的增大光电流值增加。

基于 NiO/GaN p-n 结的光电探测器的结构示意图如图 3(a) 所示, 下方为 Al_2O_3 衬底, 中间的

GaN 层约 $4.5 \mu\text{m}$ 厚, 上方的 NiO 层约 70 nm 厚 (图 3(b)), Ti/Au 电极约 70 nm 厚 (如插图所示), 不同层之间具有清晰的边界。

在没有外加偏压的情况下, 探测器对紫外光具有明显响应, 例如在 $700 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的 365 nm 光照射下, 电流值从黑暗条件下的 0.17 nA 迅速上升至 275 nA, 在 $1300 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的 254 nm 光照下, 光电流值从 0.17 nA 迅速上升至 223 nA。关闭光照后, 探测器的电流值迅速下降到初始水平 (图 4(a))。其中对于 365 nm 和 254 nm 光的开关比 ($I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$) 分别达到 1617 和 1311。之后对探测器的光响应速度进行了测试, 结果如图 4(b) 所示, 其中 $\tau_{\text{f}}/\tau_{\text{d}}$ 分别为 37 ms/31 ms。为了进一步了解 NiO/GaN p-n 结内部载流子的输运情况, 图 4(c) 给出了 NiO/GaN p-n 的能带结构。其中 GaN 和 NiO 的电子亲和能 (χ) 分别为 4.2 eV 和 1.8 eV, 上面测得 $E_{g,\text{NiO}} = 3.24 \text{ eV}$, $E_{g,\text{GaN}} = 3.36 \text{ eV}$, 由此可以计算得出导带差 (ΔE_C) 和价带差 (ΔE_V):

$$\Delta E_C = \chi_{\text{GaN}} - \chi_{\text{NiO}} = 2.4 \text{ eV}, \quad (2)$$

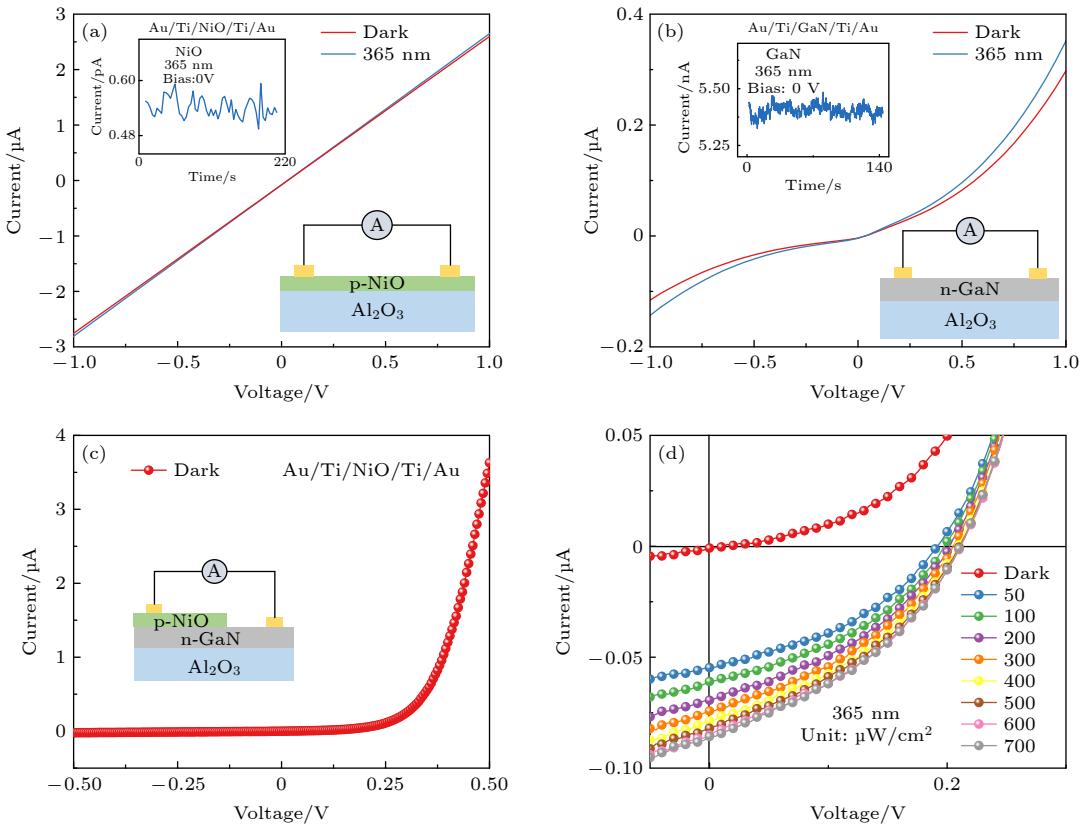


图 2 (a) 在 365 nm 光照下和黑暗中的 NiO MSM 结构的 I - V 曲线, 插图为 NiO MSM 结构示意图和 0 V 下的 I - T 曲线; (b) 在 365 nm 光照下和黑暗中的 GaN MSM 结构的 I - V 曲线, 插图为 GaN MSM 结构示意图和 0 V 下的 I - T 曲线; (c) 黑暗中 NiO/GaN p-n 结的 I - V 特性, 插图为 NiO/GaN p-n 结器件结构示意图; (d) 不同强度的 365 nm 光照下 NiO/GaN p-n 结的 I - V 特性
Fig. 2. (a) I - V curves of the NiO MSM structure in dark and under 365 nm light illumination, (insert) diagram of the NiO MSM structure and I - T curve under zero bias; (b) I - V curves of the GaN MSM structure in dark and under 365 nm light illumination, (insert) diagram of the GaN MSM structure and I - T curve under zero bias; (c) I - V curve of the NiO/GaN p-n junction in dark, (insert) diagram of the device based on NiO/GaN p-n junction; (d) I - V curves of the NiO/GaN p-n junction under 365 nm light with various light intensities.

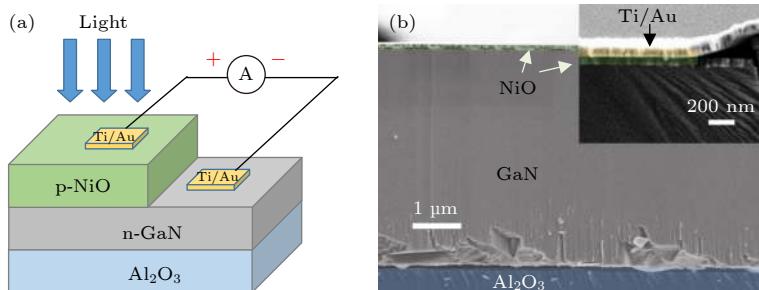


图 3 (a) 基于 NiO/GaN p-n 结的光电探测器结构示意图; (b) NiO/GaN p-n 结的截面 SEM 图, 插图为镀有电极的 p-n 结截面 SEM 放大图
Fig. 3. (a) Schematic illustration of the fabricated prototype NiO/GaN p-n junction photodetector; (b) cross-sectional SEM image of the NiO/GaN p-n junction, where the insert is the enlargement cross-sectional SEM image of p-n junction with electrode plating.

$$\Delta E_V = E_{g\text{GaN}} - E_{g\text{NiO}} + \Delta E_C = 2.52 \text{ eV}, \quad (3)$$

其中较大的势垒差有利于光生载流子的分离并抑制复合, 从而增大了光电流并降低了暗电流。另外势垒差还有助于载流子的输运, 加快了光响

应速度。不同偏压下探测器对 365 nm 的 I - T 响应如图 4(d) 所示, 随着反向偏压的增大, 暗电流首先增大, 这是因为在电场的作用下, 释放出了氧空位所捕获的载流子, 光电流增大的更加明显, 是

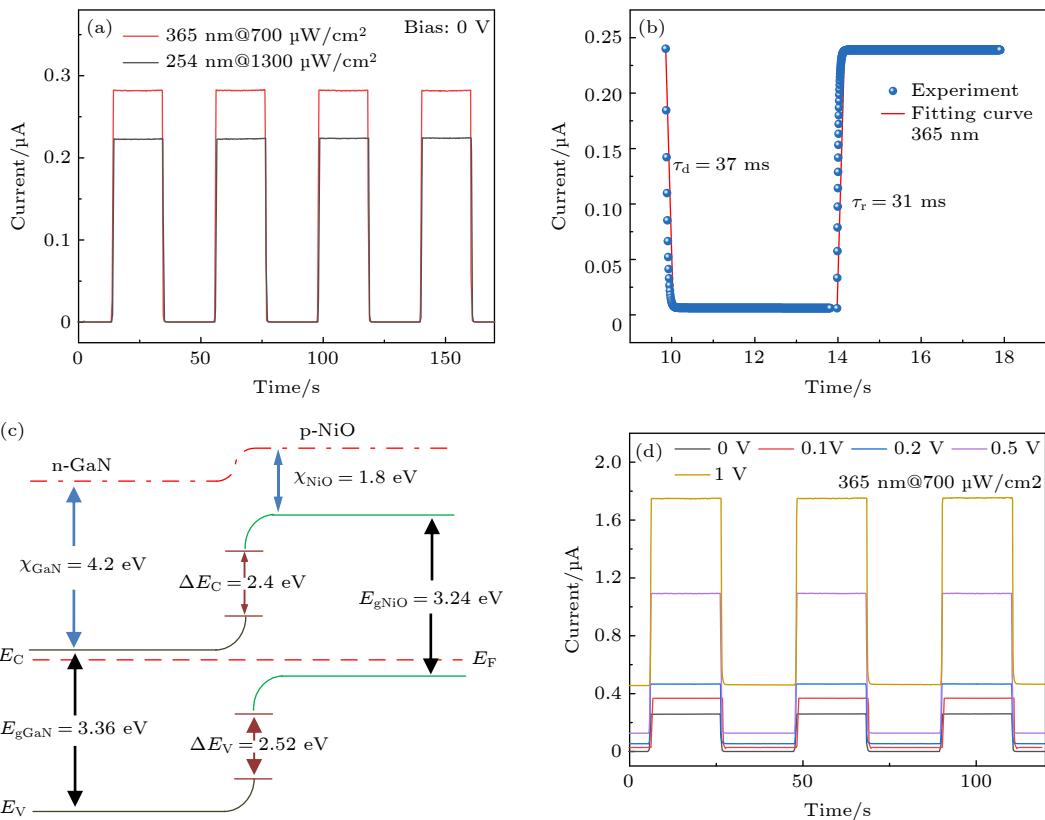


图 4 (a) 0 V 电压下探测器对 254 和 365 nm 光照的 I - T 响应; (b) 对 365 nm 的光响应速度拟合; (c) NiO/GaN p-n 结的能带图; (d) 不同偏压下探测器对 365 nm 光照的 I - T 响应

Fig. 4. (a) I - T curves of the photodetector under a zero bias at 254 and 365 nm illumination; (b) enlarged view of the rise/decay edges and the corresponding exponential fitting; (c) energy band diagrams of NiO/GaN p-n junction; (d) I - T curves of the photodetector under various biases with a 365 nm light illumination.

表 1 基于 GaN 的自供电探测器件性能参数比较

Table 1. Self-powered device parameters comparison of photodetectors based on GaN from previous works and this work.

Photodetector	Wavelength	Responsivity/(mA·W ⁻¹)	Detectivity/Jones	Rise/Decay time/ms	Ref.
GaN/ZnO	350 nm	95.8	2.9×10^{12}	730/50	[22]
GaN/r-GO:Ag NPs	360 nm	266	2.62×10^{11}	680/700	[23]
GaN/NiO	365 nm	150	—	—	[20]
GaN/Ga ₂ O ₃	365 nm	54.49	—	—	[24]
r-GO/GaN	350 nm	1.54	1.45×10^{11}	60/267	[25]
ZnO nanoarrays/CdS/GaN	300 nm	176	2.5×10^{12}	350	[26]
NiO/GaN	365 nm	272.3	2.83×10^{14}	31/37	This work

因为施加的电场促进了光生载流子的有效分离。在外加偏压的条件下，探测器依然显示出良好的稳定性。

随着 365 nm 光照强度的增加，探测器的光电流明显增加，从 50 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 强度下的 82 nA 增加到 700 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 强度下的 275 nA (如图 5(a) 和图 5(b) 所示)。同时可以看到，随着光强的增加，光响应度 (R) 逐渐降低 (图 5(b))，计算公式为 $R = I_{\text{ph}} / (PS)$ ，其中 I_{ph} 为光电流， P 为光强， S 为有效面

积。光强为 50 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时光响应度 (R) 达到最大值 (273.2 mA/W)。探测率 (D) 是评价器件灵敏度的一项重要指标，计算公式为 $D = RS^{1/2} / (2eI_{\text{dark}})^{1/2}$ ，图 5(c) 显示了探测率随光强变化的函数关系图像。随着光强的增大，探测率逐渐降低，在 50 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时达到最大值 2.83×10^{14} Jones。将本文制备的 NiO/GaN p-n 紫外探测器与最近报道的其他在 0 V 下工作的探测器进行比较 (表 1)，结果表明本文制备的探测器具有优异的性能。

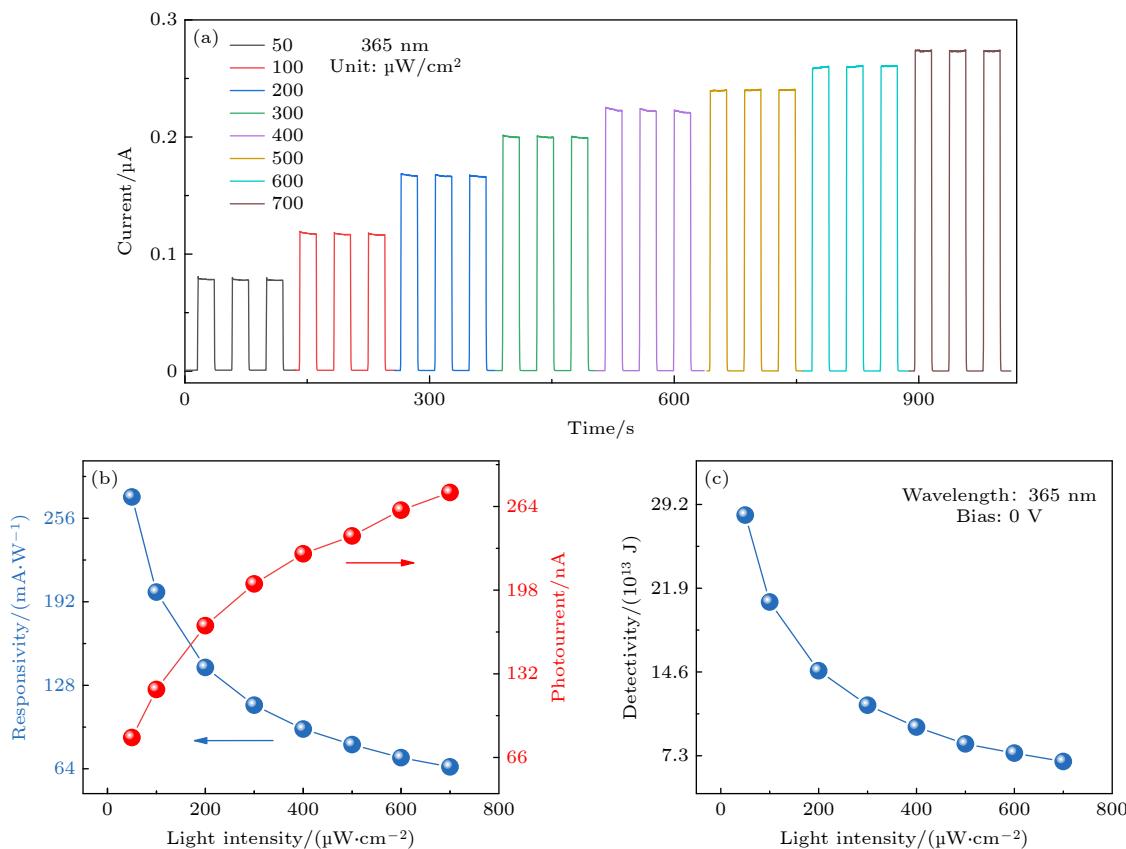


图 5 (a) 0 V 偏压下探测器对不同光强的 365 nm 光照的 I-T 响应; (b) 光电流与响应度随光强的变化; (c) 探测率随光强的变化

Fig. 5. (a) Time-dependent photoresponse of the photodetector under zero bias and a 365 nm light with various light intensities; (b) photocurrent and responsivity as a function of light intensity; (c) detectivity as a function of light intensity.

4 结 论

本文通过磁控溅射的方法在蓝宝石衬底以及 n-GaN 厚膜衬底上沉积了 NiO 薄膜, XRD 结果显示制备的薄膜具有良好的结晶性能, SEM 测得薄膜厚度约为 70 nm。在 n-GaN 厚膜衬底上成功制备了 NiO/GaN p-n 结并以此构建了紫外探测器。p-n 结在黑暗中表现出典型的整流特性。由于内建电场的存在, 探测器可以在没有外加偏压的条件下工作。在 0 V 偏压下, 探测器对 365 nm 紫外光显示出高达 2.83×10^{14} Jones 的探测率, 同时光响应度达到 272.3 mA/W, 响应速度达到 31 ms。本文研究结果表明, NiO/GaN p-n 结在紫外探测器领域有着广阔的应用前景, 为自供电探测技术的发展提供了新的思路。

参考文献

- [1] Guo D, Chen K, Wang S, Wu F, Liu A, Li C, Li P, Tan C, Tang W 2020 *Phys. Rev. Appl.* **13** 024051
- [2] Guo D Y, Li P G, Chen Z W, Wu Z P, Tang W H 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 078501 (in Chinese) [郭道友, 李培刚, 陈政委, 吴真平, 唐为华 2019 物理学报 **68** 078501]
- [3] Wu C, He C, Guo D, Zhang F, Li P, Wang S, Liu A, Wu F, Tang W 2020 *Mater. Today Phys.* **12** 100193
- [4] Guo D, Guo Q, Chen Z, Wu Z, Li P, Tang W 2019 *Materials Today Physics* **11** 100157
- [5] Strite S, Morkoç H 1992 *J. Vac. Sci. Technol., B* **10** 1237
- [6] Li J, Xi X, Lin S, Ma Z, Li X, Zhao L 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 11965
- [7] Wang W, Zheng Y, Li X, Li Y, Huang L, Li G 2018 *J. Mater. Chem. C* **6** 3417
- [8] Lee J H, Lee W W, Yang D W, Chang W J, Kwon S S, Park W I 2018 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10** 14170
- [9] Xiao Y, Zhang W G, Tan Z T, Pan G B, Peng Z 2020 *Chem. Phys. Lett.* **739** 136981
- [10] Zhuo R, Wang Y, Wu D, Lou Z, Shi Z, Xu T, Xu J, Tian Y, Li X 2018 *J. Mater. Chem. C* **6** 299
- [11] Guo D, Su Y, Shi H, Li P, Zhao N, Ye J, Wang S, Liu A, Chen Z, Li C, Tang W 2018 *ACS Nano* **12** 12827
- [12] De Vittorio M, Potì B, Todaro M, Frassanito M, Pomarico A, Passaseo A, Lomascolo M, Cingolani R 2004 *Sens. Actuators, A* **113** 329
- [13] Guo X, Williamson T, Bohn P 2006 *Solid State Commun.* **140** 159
- [14] Su L, Zhang Q, Wu T, Chen M, Su Y, Zhu Y, Xiang R, Gui X, Tang Z 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 072106

- [15] Zhu Y, Liu K, Ai Q, Hou Q, Chen X, Zhang Z, Xie X, Li B, Shen D 2020 *J. Mater. Chem. C* **8** 2719
- [16] Wang Y, Wu C, Guo D, Li P, Wang S, Liu A, Li C, Wu F, Tang W 2020 *ACS Appl. Electron. Mater.* **2** 2032
- [17] Koike K, Goto T, Nakamura S, Wada S, Fujii K 2018 *MRS Commun.* **8** 480
- [18] Wang H, Zhang B L, Wu G G, Wu C, Shi Z F, Zhao Y, Wang J, Ma Y, Du G T, Dong X 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 107304
- [19] Yu N, Li H, Qi Y 2018 *Opt. Mater. Express* **9** 26
- [20] Li L, Liu Z, Wang L, zhang B, Liu Y, Ao J P 2018 *Mater.* *Sci. Semicond. Process.* **76** 61
- [21] Davis E, Mott N 1970 *Philos. Mag.* **22** 903
- [22] Mishra M, Gundimeda A, Garg T, Dash A, Das S, Vandana, Gupta G 2019 *Appl. Surf. Sci.* **478** 1081
- [23] Sarkar K, Hossain M, Devi P, Rao K D M, Kumar P 2019 *Adv. Mater. Interfaces* **6** 1900923
- [24] Li P, Shi H, Chen K, Guo D, Cui W, Zhi Y, Wang S, Wu Z, Chen Z, Tang W 2017 *J. Mater. Chem. C* **5** 10562
- [25] Prakash N, Singh M, Kumar G, Barvat A, Anand K, Pal P, Singh S P, Khanna S P 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 242102
- [26] Zhou H, Gui P, Yang L, Ye C, Xue M, Mei J, Song Z, Wang H 2017 *New J. Chem.* **41** 4901

NiO/GaN p-n junction ultraviolet photodetector and self-powered technology*

Wang Shun-Li¹⁾²⁾ Wang Ya-Chao¹⁾ Guo Dao-You^{1)2)†}
Li Chao-Rong¹⁾ Liu Ai-Ping^{1)2)‡}

1) (*Zhejiang Key Laboratory of Light Field Control Technology, Center for Optoelectronics Materials and Devices, Department of Physics, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China*)

2) (*Jinhua Zixin Technology Co., Ltd., Jinhua 321015, China*)

(Received 22 January 2021; revised manuscript received 7 February 2021)

Abstract

Ultraviolet photodetector plays an important role in fire warning, missile tracking and dose detecting of ultraviolet sterilization and disinfection, which is closely related to human lives. With the development of integrated detection system, the requirements for the size and energy consumption of the detector are becoming more and more stringent. Traditional detector that requires an external power supply can no longer meet these requirements. Moreover, a traditional ultraviolet detector is mainly composed of first-generation semiconductors and second-generation semiconductors. These semiconductors have small band gaps and large cut-off wavelengths, and are more suitable for infrared detection. When used for implementing the ultraviolet detection, an additional layer is often required, which increases not only the volume but also the cost.

Gallium nitride (GaN), as a third-generation semiconductor, has a band gap of 3.4 eV and a corresponding absorption edge of 365 nm. It is a natural ultraviolet detection material. At the same time, the excellent physical and chemical properties make the devices prepared by GaN have high stability. In recent years, some studies have shown that the GaN-based ultraviolet photodetectors have excellent responsiveness, but each of these detectors usually requires an external bias and has a slow response speed. Here, we propose a high responsivity, fast response speed and self-powered ultraviolet photodetector based on NiO/GaN p-n junction. By using the magnetron sputtering, a layer of 70 nm thick p-NiO film is deposited on a high-quality n-GaN film that has been grown on a sapphire substrate by the metal-organic chemical vapor deposition. The fabricated p-n junction shows obvious rectification characteristics at ± 0.5 V. Due to the existence of the built-in electric field, the device can work without externally applied bias. Under zero bias, the detector shows a responsivity of 272.3 mA/W for 365 nm ultraviolet light while the intensity is 50 μ W/cm², and has a detectivity as high as 2.83×10^{14} Jones. This indicates that the detector has a high sensitivity even for very weak light. Owing to the good crystallinity of the film, the dark current is as low as 10^{-10} A, the switching ratio is $> 10^3$, and the response speed reaches 31 ms. These excellent properties show the broad application prospects of the devices based on NiO/GaN p-n junctions in the field of self-powered ultraviolet detection, and thus providing new ideas for the future development of intelligent integration.

Keywords: ultraviolet photodetector, self-powered technology, GaN, NiO

PACS: 85.30.-z, 85.60.Gz, 78.66.-w, 42.70.Qs

DOI: 10.7498/aps.70.20210154

* Project supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. LY20F040005) and the Scientific Research Starting Foundation of Zhejiang Sci-Tech University, China (Grant No. 20062224-Y).

† Corresponding author. E-mail: dyguo@zstu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: liuiping1979@gmail.com

ACTA PHYSICA SINICA

Vol. 70, No. 12, June 20, 2021

CONTENTS

SPECIAL TOPIC—Two-dimensional magnetic materials

- 120101 Preface to the special topic: Two-dimensional magnetic materials
Nie Tian-Xiao Shao Qi-Ming

REVIEW

- 127301 Research progress of preparation of large-scale two-dimensional magnetic materials and manipulation of Curie temperature
Wang Hai-Yu Liu Ying-Jie Xun Lu-Lu Li Jing Yang Qing Tian Qi-Yun Nie Tian-Xiao Zhao Wei-Sheng

- 127302 Physical problems and experimental progress in layered magnetic topological materials
Sun Hui-Min He Qing-Lin

- 127303 Berry curvature-induced emerging magnetic response in two-dimensional materials
Liu Yu-Ting He Wen-Yu Liu Jun-Wei Shao Qi-Ming

- 127501 Research progress of spin-orbit torques based on two-dimensional materials
He Cong-Li Xu Hong-Jun Tang Jian Wang Xiao Wei Jin-Wu Shen Shi-Peng Chen Qing-Qiang Shao Qi-Ming Yu Guo-Qiang Zhang Guang-Yu Wang Shou-Guo

- 127503 Recent development in two-dimensional magnetic materials and multi-field control of magnetism
Xiao Han Mi Meng-Juan Wang Yi-Lin

- 127504 Probe and manipulation of magnetism of two-dimensional CrI₃ crystal
Zhang Song-Ge Chen Yu-Tong Wang Ning Chai Yang Long Gen Zhang Guang-Yu

- 127801 Study on physical properties and magnetism controlling of two-dimensional magnetic materials
Jiang Xiao-Hong Qin Si-Chen Xing Zi-Yue Zou Xing-Yu Deng Yi-Fan Wang Wei Wang Lin

ARTICLE

- 127502 Properties of axion insulator candidate layered Eu_{1-x}Ca_xIn₂As₂
Yi En-Kui Wang Bin Shen Han Shen Bing

- 129101 Efficient spin injection in Fe₃GeTe₂/h-BN/graphene heterostructure
Yang Wei Han Jiang-Chao Cao Yuan Lin Xiao-Yang Zhao Wei-Sheng

SPECIAL TOPIC—Terahertz biophysics

- 128201 Terahertz physical mechanism of arsenic (III) restoring p53 mutant protein activity
Tang Chao Zhang Guang-Xu Hu Jun Lü Jun-Hong

REVIEW

- 123201 Ultra-cold long-range Rydberg-ground molecules
Bai Su-Ying Bai Jing-Xu Han Xiao-Xuan Jiao Yue-Chun Zhao Jian-Ming

- 128804 Research progress of organic solar cells based on photonic crystals
Lan Wei-Xia Gu Jia-Lu Gao Xiao-Hui Liao Ying-Jie Zhong Song-Yi Zhang Wei-Dong Peng Yan Sun Yu Wei Bin

GENERAL

- 120201 Nonlinear frictional contact behavior of porous polymer hydrogels for soft robot
Chen Kang Shen Yu-Nian

(Continued)

- 120301 Fast generation of three-atom singlet state with Rydberg superatom
Ji Yan-Qiang Wang Jie Liu Ying-Li Zhang Da-Wei Xiao Rui-Jie Dong Li Xiu Xiao-Ming
- 120302 Cascaded Hong-Ou-Mandel interference of entangled photon pairs and its application in multiple delay parameters measurement
Zhai Yi-Wei Dong Rui-Fang Quan Run-Ai Xiang Xiao Liu Tao Zhang Shou-Gang
- 120501 Dynamics of mixed bursting in coupled pre-Bötzinger complex
Zhao Ya-Qi Liu Mou-Tian Zhao Yong Duan Li-Xia

NUCLEAR PHYSICS

- 122101 Experimental observation and theoretical analysis of spontaneous magnetic moment of Rb atom clusters
Di Shu-Hong Zhang Yang Yang Hui-Jing San Xing-Yuan Liu Hui-Yuan Zhang Su-Heng Li Fan-Lin Tai Jun-Jun Zhou Chun-Li
- 122801 Effects of Th doping on mechanical properties of $U_{1-x}Th_xO_2$: An atomistic simulation
Xin Yong Bao Hong-Wei Sun Zhi-Peng Zhang Ji-Bin Liu Shi-Chao Guo Zi-Xuan Wang Hao-Yu Ma Fei Li Yuan-Ming

ATOMIC AND MOLECULAR PHYSICS

- 123101 Calculation and analysis of interaction between characteristic functional group of persimmon tannin and metal ions
Liu Zhi-Gao Chen Tao Hu Chao-Hao Wang Dian-Hui Wang Zhong-Min Li Gui-Yin
- 123102 Theoretical study of optical and electronic properties of silicether/graphether heterostructure
Zhang Ying Liu Chun-Sheng

ELECTROMAGNETISM, OPTICS, ACOUSTICS, HEAT TRANSFER, CLASSICAL MECHANICS, AND FLUID DYNAMICS

- 124201 Design and simulation of polarization-insensitive ring resonator based on subwavelength grating and sandwiched structure
Wang Jing-Li Zhang Jian-Zhe Chen He-Ming
- 124301 Dynamic analysis of bubble in liquid cavity wrapped by viscoelastic medium
Zhang Tao-Ran Mo Run-Yang Hu Jing Chen Shi Wang Cheng-Hui Guo Jian-Zhong
- 124302 Doppler-warping transform and its application to estimating acoustic target velocity
Gao De-Yang Gao Da-Zhi Chi Jing Wang Liang Song Wen-Hua
- 124501 Modeling and solution method of gas-liquid-solid three-phase flow mixing
Fan Xing-Hua Tan Da-Peng Li Lin Yin Zi-Chao Wang Tong
- 124601 Negative Schoch displacement of two-dimensional acoustic metamaterials with near-zero refractive index
Liu Xiang-Dong Wu Fu-Gen Yao Yuan-Wei Zhang Xin
- 124701 Molecular dynamics simulation on shear thinning characteristics of non-Newtonian fluids
Yang Gang Zheng Ting Cheng Qi-Hao Zhang Hui-Chen
- 124702 Effect and relational analysis of physical parameters on coalescence-induced self-propelled jumping of droplets
Wang Yu-Hang Yuan Meng Ming Ping-Jian

CONDENSED MATTER: STRUCTURAL, MECHANICAL, AND THERMAL PROPERTIES

- 126101 Effects of base angle and wettability of nanostructures on droplet wetting behaviors
Li Wen Ma Xiao-Jing Xu Jin-Liang Wang Yan Lei Jun-Peng
- 126102 Relationship between ion track characteristics and single event transients in nanometer inverter chain
Zhao Wen Chen Wei Luo Yin-Hong He Chao-Hui Shen Chen

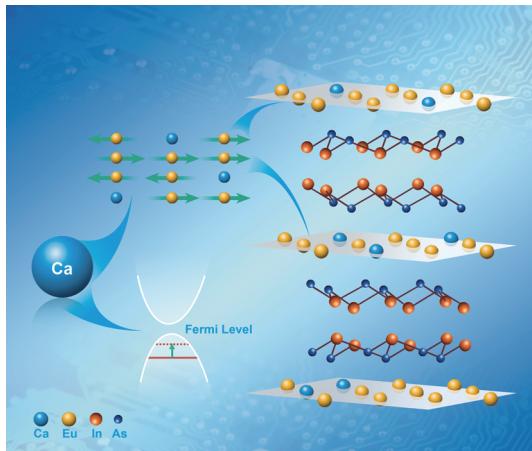
(Continued)

- 126401 Microscopic theory for elastic modulus of colloidal polymers: Effect of bond length
Zhang Bo-Kai
- CONDENSED MATTER: ELECTRONIC STRUCTURE, ELECTRICAL,
MAGNETIC, AND OPTICAL PROPERTIES**
- 127505 First-principles study of ultrafast spin dynamics in Fe_mB_{20} ($m = 1, 2$) clusters
Lu Xin Xie Meng-Lin Liu Jing Jin Wei Li Chun Georgios Lefkidis Wolfgang Hübner
- 127701 Phase diagram and dielectric properties of orientation-dependent $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$ epitaxial films
Bai Gang Lin Cui Liu Duan-Sheng Xu Jie Li Wei Gao Cun-Fa
- 127702 First-order reversal curve diagram and its application in investigation of polarization switching behavior of HfO_2 -based ferroelectric thin films
Shi Zhi-Xin Zhou Da-Yu Li Shuai-Dong Xu Jin Uwe Schröder
- 127901 Experimental study of multipactor on dielectric of penetration flange for vacuum chamber
Wang Xin-Bo Bai He Sun Qin-Fen Yin Xin-She Zhang Hong-Tai Cui Wan-Zhao
- INTERDISCIPLINARY PHYSICS AND RELATED AREAS OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY**
- 128101 A four-band perfect absorber based on high quality factor and high figure of merit of monolayer molybdenum disulfide
Jiang Li-Ying Yi Ying-Ting Yi Zao Yang Hua Li Zhi-You Su Ju Zhou Zi-Gang Chen Xi-Fang Yi You-Gen
- 128401 Phase structure and thermoelectric properties of $\text{Cu}_{1.8-x}\text{Sb}_x\text{S}$ thermoelectric material
Zhao Ying-Hao Zhang Rui Zhang Bo-Ping Yin Yang Wang Ming-Jun Liang Dou-Dou
- 128501 A second-order gradiometric superconducting quantum interference device current sensor with cross-coupled structure
Xu Da Zhong Qing Cao Wen-Hui Wang Xue-Shen Wang Shi-Jian Li Jin-Jin Liu Jian-She Chen Wei
- 128502 NiO/GaN p-n junction ultraviolet photodetector and self-powered technology
Wang Shun-Li Wang Ya-Chao Guo Dao-You Li Chao-Rong Liu Ai-Ping
- 128801 Influences of space charge layer effect on oxygen vacancy transport adjacent to three phase boundaries within solid oxide fuel cells
Xu Han Zhang Lu
- 128802 Bandgap grading of $\text{Sb}_2(\text{S},\text{Se})_3$ for high-efficiency thin-film solar cells
Cao Yu Jiang Jia-Hao Liu Chao-Ying Ling Tong Meng Dan Zhou Jing Liu Huan Wang Jun-Yao
- 128803 Performance of 2-bromoterephthalic acid passivated all-inorganic perovskite cells
Lin Ming-Yue Ju Bo Li Yan Chen Xue-Lian

Color figures can be viewed in the online issue.



Online issue



轴子拓扑绝缘体候选材料层状 $\text{Eu}_{1-x}\text{Ca}_x\text{In}_2\text{As}_2$ 的物性研究
[易恩魁, 王彬, 沈韩, 沈冰 2021 物理学报 70 127502]

公 告

为实现录用稿件的提前在线全文出版, 我刊采用单篇论文给定编码的目录方案, 编码的设定规则是: 期号 + 文章第一个 PACS 代码的前两位数字 + 序号 (按同一类代码文章录用时间的先后排序)。

《物理学报》已加入“中国知网”优先数字出版, 录用文章将先于印刷版期刊在中国知网 www.cnki.net 在线优先发布, 如果作者不愿优先出版可在版权协议里补充说明, 如无补充说明, 编辑部将视为同意授权。

《物理学报》编辑部

物理 学 报 (WULI XUEBAO)

(半月刊, 1933 年创刊)

2021 年 6 月 20 日 第 70 卷 第 12 期

版 权 所 有

编 辑 出 版 《物理 学 报》编 辑 部
(北京 603 信箱 邮政编码 100190)

主 编 高 鸿 钧

主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 物 理 学 会
中国科学院物理研究所
(北京 603 信箱 邮政编码 100190)

印 刷 装 订 北京科信印刷有限公司

总 发 行 处 北京 报 刊 发 行 局

订 购 处 全 国 各 邮 电 局
国 外 总 发 行 处 中国 国际 图书 贸易 总公司
(北京 399 信箱 邮政编码 100044)

ACTA PHYSICA SINICA
(Semimonthly, First Published in 1933)

Vol. 70 No. 12 June 20, 2021

© 2021 Chinese Physical Society

Edited by the Editorial Office of
ACTA PHYSICA SINICA
Editor-in-Chief: Gao Hong-Jun
Published by Chinese Physical Society
and Institute of Physics,
Chinese Academy of Sciences
Distributed by China International
Book Trading Corporation
P.O. Box 399, Beijing 100044, China
Editorial Office:
P.O. Box 603, Beijing 100190, China
E-mail: apsoffice@iphy.ac.cn
<http://wulixb.iphy.ac.cn>

ISSN 1000-3290
CN 11-1958/O4

国内邮发代号: 2-425
国外发行代号: M52 定价: 120 元

公 开 发 行

