



基于三明治结构的ZnO紫外光电探测器

杨翘楚, 孙赫阳, 张福隆, 王天枢

引用本文:

杨翘楚, 孙赫阳, 张福隆, 等. 基于三明治结构的ZnO紫外光电探测器[J]. *发光学报*, 2020, 41(9): 1153–1157.

YANG Qiao-chu, SUN He-yang, ZHANG Fu-long, et al. ZnO UV Photodetector Based on Sandwich Structure[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(9): 1153–1157.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/fgxb20204109.1153>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电极间距对ZnO基MSM紫外光电探测器性能的影响

Effect of Electrode Spacing on The Properties of ZnO Based MSM Ultraviolet Photodetector

发光学报. 2014, 35(10): 1172–1175 <https://doi.org/10.3788/fgxb20143510.1172>

氧化镓薄膜的制备及其日盲紫外探测性能研究

Preparation and Ultraviolet Detection Performance of Ga₂O₃ Thin Films

发光学报. 2015(8): 906–911 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153608.0906>

ZnO单晶和BeZnO合金的生长及其紫外探测器研究

Growth of ZnO Single Crystal and BeZnO Alloy and Ultraviolet Detector

发光学报. 2015, 36(11): 1233–1239 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153611.1233>

ZnO纳米棒的制备及紫外探测性能

Fabrication and Ultraviolet Detection of ZnO Nanorods

发光学报. 2018, 39(3): 369–374 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183903.0369>

GaN基p-i-n和肖特基紫外探测器的响应光谱及暗电流特性

Spectral Response and Dark Current of p-i-n Type and Schottky Barrier GaN-based Ultraviolet Detectors

发光学报. 2017, 38(10): 1327–1331 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173810.1327>

文章编号: 1000-7032(2020)09-1153-05

基于三明治结构的 ZnO 紫外光电探测器

杨翹楚*, 孙赫阳, 张福隆, 王天枢

(长春理工大学 空间光电国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022)

摘要: 采用射频磁控溅射方法制备了三三明治结构 ZnO 紫外光电探测器,即在传统金属-半导体-金属(MSM)单层 ZnO 紫外光电探测器的基础上再铺设一层 ZnO 薄膜,从而构建三明治器件结构。三明治结构 ZnO 紫外光电探测器响应度在 5 V 偏压下达到了 0.05 A/W,暗电流为 1.44×10^{-5} A,器件的整体性相比较传统单层 ZnO 紫外光电探测器得到了明显的改善。这主要归因于金属与半导体接触的耗尽区可以直接吸收入射光,提高了入射光的吸收效率,避免了传统上层电极对入射光的遮蔽作用。

关键词: 三明治结构; ZnO 紫外光电探测器; 响应度

中图分类号: O472.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/fgxb20204109.1153

ZnO UV Photodetector Based on Sandwich Structure

YANG Qiao-chu*, SUN He-yang, ZHANG Fu-long, WANG Tian-shu

(National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding Author, E-mail: 18686465338@163.com

Abstract: ZnO UV photodetector is fabricated with the sandwich structure by radio frequency magnetron sputtering, based on the traditional metal semiconductor metal(MSM) single-layer ZnO UV photodetectors, another layer of ZnO film is laid to construct the sandwich device structure. At 5 V bias, the responsivity of the photodetector is 0.05 A/W, and the dark current is 1.44×10^{-5} A. The integrity of the device is significantly improved compared with the traditional single-layer ZnO UV photodetector. This is mainly due to the fact that the depletion region of the metal semiconductor contact can directly absorb the incident light, improve the absorption efficiency of the incident light, and avoid the shielding effect of the traditional upper electrode to the incident light.

Key words: sandwich structure; ZnO UV photodetectors; responsivity

1 引 言

近年来,宽禁带半导体紫外光电探测器由于具有功耗少、响应速度快、虚警率低等优点,被广泛应用于火灾监测、导弹预警、环境监察、紫外通信、天文观测等领域。而宽禁带半导体材料 ZnO

由于具有高热稳定性、强抗辐射性能、无毒无害且为直接带隙等优点成为紫外光电探测器的优选材料^[1-6]。但由于其自身的 p 型问题没有得到很好的解决^[7],其紫外光电探测器的电极结构主要采用 MSM 结构。这种结构类型的器件由于无需 p 型材料,工艺简单且为平面结构,便于单片光电集

收稿日期: 2020-07-03; 修订日期: 2020-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61905022)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(61905022)

成,所以 MSM 结构的 ZnO 紫外光电探测器得到了长足的发展^[8-12]。

虽然 MSM 结构是 ZnO 紫外光电探测器的主流结构^[13-16],但由于金属电极是生长在薄膜的表面,而有效收集入射光的区域为金属与半导体接触的区域,主要位于金属电极的下方,这样入射光就会被半导体上层的金属电极所遮挡,降低了对入射光的吸收效率,进而影响了器件的性能。这成为了 MSM 结构紫外光电探测器不可避免的问题,限制了其性能的进一步提高。此外,MSM 电极结构主要采用刻蚀的方法获得,所以 ZnO 半导体表面势必会有一些的损伤,产生一定量的表面缺陷,对光生载流子造成复合,从而使器件的性能有所衰减。针对上述问题,我们将器件制备成三明治结构,即在原有的 MSM 电极结构上方再铺设一层 ZnO 薄膜,形成 ZnO/Au/ZnO 三明治器件结构的紫外光电探测器,这种器件结构具有如下优点:(1)将金属电极设计在薄膜中间,与传统的金属电极铺设在薄膜的上表面相比,可以最大限度地避免金属电极的遮光效应,进而提高对入射光的吸收效率;(2)三明治器件结构使得上层与下层的 ZnO 薄膜接触,减少了表面的不饱和键,降低了表面的复合中心密度;(3)将金属电极设计在薄膜的中间,可以起到对薄膜的固化作用,减少外界环境对金属电极、以及对金属电极与薄膜接触的影响。

本文采用射频磁控溅射方法在石英衬底上制备了 ZnO 薄膜,通过传统紫外光刻和湿法腐蚀的方法在 ZnO 薄膜表面制备 MSM 金属电极,之后在 MSM 金属电极表面再铺设一层 ZnO 薄膜,进而构建成三明治器件结构的 ZnO 紫外光电探测器,在提升器件响应度的同时,器件的暗电流也得到了明显的改善。

2 实 验

首先利用射频磁控溅射方法在石英衬底上生长第一层 ZnO 薄膜,其生长条件是衬底温度为 673 K,生长室的压强为 3 Pa,氩气与氧气的气体流量比为 45:15 mL/min,溅射功率为 120 W,生长时间为 2 h。之后采用传统紫外曝光和湿法腐蚀的方法在第一层 ZnO 薄膜上制备 MSM 电极结构,电极材料选用 Au,又指电极的长度为 500 μm ,宽度为 5 μm ,电极间距为 5 μm ,如图 1(a)所

示。之后再在电极表面覆盖一层 ZnO 薄膜,生长时间为 3 h,其他生长条件与第一层 ZnO 薄膜一致,构建的 ZnO/Au/ZnO 三明治器件结构如图 1(b)所示。

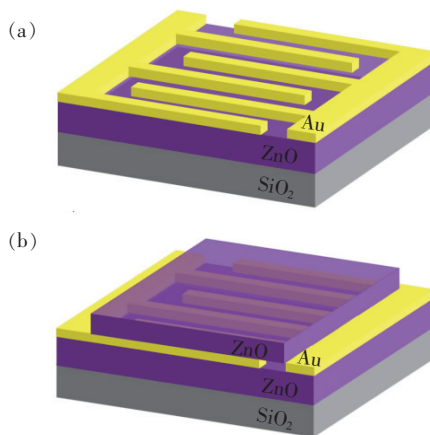


图 1 (a)单层 ZnO 薄膜 MSM 结构紫外光电探测器结构示意图;(b)三明治结构 ZnO 紫外光电探测器结构示意图。

Fig. 1 (a) Structure diagram of MSM structured UV photodetector based on single-layer ZnO film. (b) Structure diagram of UV photodetector based on sandwich ZnO film.

X 射线衍射 (XRD) 采用的设备为日本岛津 Rigaku Ultima VI X 射线衍射仪,吸收曲线选用的是 PerkinElmer Lambda 950 紫外可见分光光度计,暗电流测试系统为安捷伦 B1500A 半导体设备测试分析仪,光响应度采用的是卓立汉光的 Zolix DR800-CUST 的测试分析仪。

3 结果与讨论

图 2 为单层 ZnO 及三明治结构 ZnO 的 XRD 图谱。从图中我们可以看到,相比较单层 ZnO 薄膜而言,三明治结构 ZnO 的衍射峰强度有所增强,并且(002)衍射峰的半高宽有所收窄,这和晶体质量的提高有一定的关系。图 3 为单层及三明治结构 ZnO 的吸收光谱,很明显吸收得到了一定程度的增强,这与 XRD 结果是一致的。

图 4 为单层 ZnO 与三明治结构 ZnO 两种结构紫外光电探测器的暗电流曲线。从图中可以看出两种器件的暗电流均具有明显的整流特性,没有出现击穿线型。器件的暗电流曲线均为对称式线型,说明在湿法刻蚀中 MSM 电极保持了很好的对称性。在 5 V 偏压下,单层 ZnO 紫外光电探测

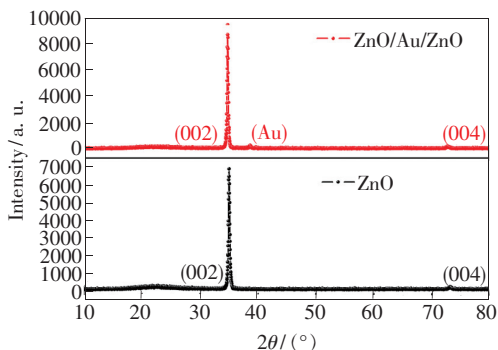


图 2 单层及三明治结构 ZnO 薄膜的 XRD 谱

Fig. 2 XRD spectra of single-layer and sandwich ZnO films

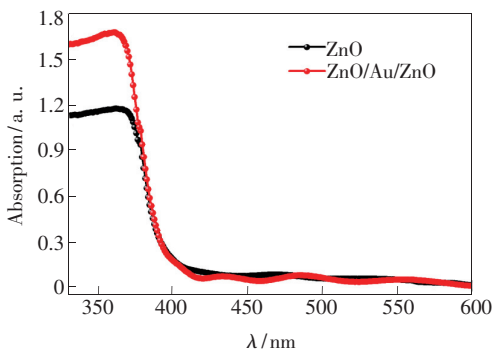


图 3 单层及三明治结构 ZnO 薄膜的吸收光谱

Fig. 3 Absorption spectra of single-layer and sandwich ZnO films

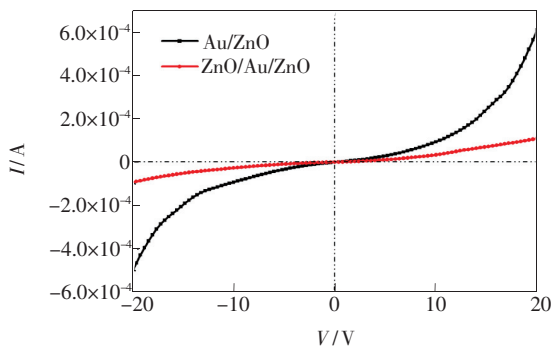


图 4 单层 ZnO 及三明治结构 ZnO 紫外光电探测器的暗电流曲线

Fig. 4 Dark current curves of ZnO UV photodetectors with single-layer and sandwich structures

器的暗电流为 3.42×10^{-5} A, 三明治结构 ZnO 紫外光电探测器的暗电流为 1.44×10^{-5} A, 下降了近 58%。这主要归因于上层 ZnO 的铺设, 降低了由湿法刻蚀所带来的下层 ZnO 表面的复合中心密度。

图 5(a) 为三明治结构 ZnO 紫外光电探测器在不同偏压下的响应度曲线, 为了更明显地体现出其结构优势, 将单层结构的 ZnO 紫外光电探测

器作为对比, 如图 5(b) 所示。对于三明治结构的 ZnO 紫外光电探测器, 在 5 V 偏压下, 器件的光响应度峰值达到了 0.05 A/W, 截止边位于 375 nm, 并没有出现拖尾现象, 这与吸收曲线的吸收边相互对应。其次, 光响应度紫外与可见的抑制比达到了 3 个数量级, 可以有效地提高器件的信噪比。并且器件的响应度随着偏压的增加而增大, 并没有出现饱和现象。而与之相对应的单层 ZnO 紫外光电探测器, 在 5 V 偏压下器件的峰值响应度仅为 0.002 6 A/W。可见, 三明治结构 ZnO 紫外光电探测器的响应度在 5 V 偏压下提升了 19.23 倍。图 6 为不同偏压下两种器件结构的光响应度的峰值曲线。两种结构器件的响应度虽然与偏压均呈现了明显的线性关系, 但是相当明显的倍数差异不是三明治结构吸收增强所能予以解释的, 下面我们对其具体的物理机制进行解释。

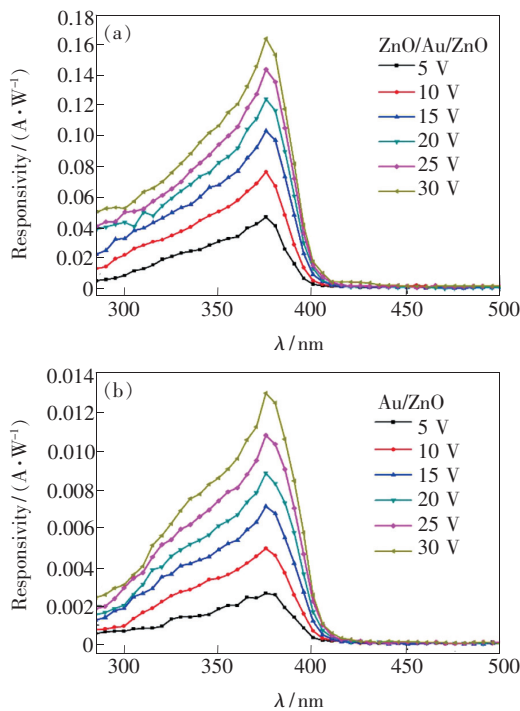


图 5 (a) 三明治结构 ZnO 紫外光电探测器不同偏压下的响应度曲线; (b) 单层 ZnO 紫外光电探测器不同偏压下的响应度曲线。

Fig. 5 (a) Response curves of ZnO photodetectors with sandwich structure under different bias voltage. (b) Response curves of ZnO photodetectors with single-layer structure under different bias voltage.

图 7 为单层及三明治结构 ZnO 紫外光电探测器的器件剖面图。对于单层 ZnO 器件结构的剖面图而言, 其有效的收集和分离光生载流子的

区域为耗尽区,而耗尽区的主要位置则是位于电极与半导体的金半接触区域,正好位于电极的下方。当紫外光入射时,金属电极由于在半导体的上方,所以对入射光起到了一定的遮蔽效应,降低了入射光的吸收效率,因而限制了器件的光响应度。而三明治结构的器件恰好弥补了单层即传统类型器件的缺点。如图 7 所示,三明治结构器件主要吸收入射光的区域为金半接触的电极上部,以及电极与电极之间的半导体部分,金半接触的电极下部则不是主要部分。可见,这种三明治器件结构很好地规避了金属电极对入射光的遮蔽,使得主要的耗尽区域暴露出来,可以直接接收照

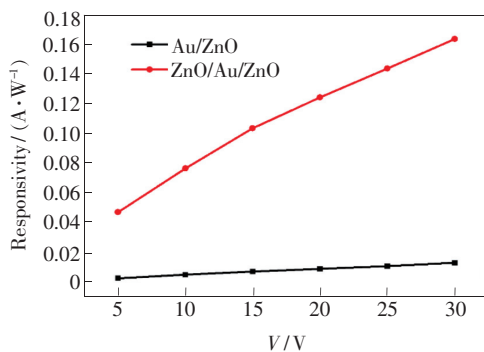


图 6 单层及三明治结构 ZnO 紫外光电探测器响应峰值与偏压的对应关系

Fig. 6 Relationship between the peak response and bias voltage of ZnO photodetectors with single-layer and sandwich structures

参 考 文 献:

- [1] WANG X, LIU K W, CHEN X, *et al.*. Highly wavelength-selective enhancement of responsivity in Ag nanoparticle-modified ZnO UV photodetector [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, 9(6):5574-5579.
- [2] ZHU H, SHAN C X, YAO B, *et al.*. High spectrum selectivity ultraviolet photodetector fabricated from an n-ZnO/p-GaN heterojunction [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2008, 112(51):20546-20548.
- [3] PEI J A, JIANG D Y, ZHAO M, *et al.*. Controlled enhancement range of the responsivity in ZnO ultraviolet photodetectors by Pt nanoparticles [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2016, 389:1056-1061.
- [4] LAI W C, CHEN J T, YANG Y Y. ZnO-SiO₂ solar-blind photodetectors on flexible polyethersulfone substrate with organosilicon buffer layer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(19):191115-1-4.
- [5] HUANG Y, ZHANG L C, WANG J B, *et al.*. Enhanced photoresponse of n-ZnO/p-GaN heterojunction ultraviolet photodetector with high-quality CsPbBr₃ films grown by pulse laser deposition [J]. *J. Alloys Compd.*, 2019, 802:70-75.
- [6] HUANG G Z, ZHANG P P, BAI Z M. Self-powered UV-visible photodetectors based on ZnO/graphene/CdS/electrolyte heterojunctions [J]. *J. Alloys Compd.*, 2019, 776:346-352.
- [7] 申德振, 梅增霞, 梁会力, 等. 氧化锌基材料、异质结构及光电器件 [J]. *发光学报*, 2014, 35(1):1-60.
SHEN D Z, MEI Z X, LIANG H L, *et al.*. ZnO-based material, heterojunction and photoelectric device [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014, 35(1):1-60. (in Chinese)

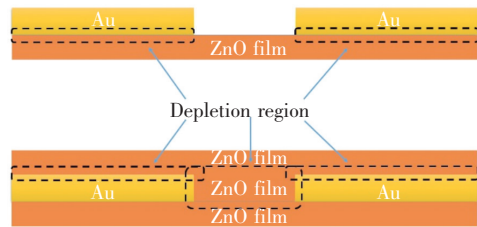


图 7 单层及三明治结构 ZnO 紫外光电探测器的截面示意图

Fig. 7 Cross section diagram of ZnO UV photodetectors with single-layer and sandwich structures

射的入射光,进而提高入射光的吸收效率,增强了光生载流子的收集与分离,所以器件的响应度能够得到明显的提高。

4 结 论

我们采用射频磁控溅射方法制备得到了三明治结构 ZnO 紫外光电探测器。相比较传统的单层 ZnO 紫外光电探测器,在 5 V 偏压下器件的响应度提高了 19.23 倍,这主要归因于三明治结构 ZnO 紫外光电探测器的有效收集区域可以直接收集入射光,很好地规避了传统探测器电极对入射光的遮挡作用。此外,这种类型探测器的暗电流也在一定程度上有所降低,这主要是由于上层 ZnO 薄膜的铺设可以降低下层 ZnO 薄膜上表面的复合中心密度。可见,三明治结构 ZnO 紫外光电探测器有望为高性能的紫外光电探测器提供可行的技术保障。

- [8] TIAN C G,JIANG D Y,LI B Z,*et al.* . Performance enhancement of ZnO UV photodetectors by surface plasmons [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2014,6(3):2162-2166.
- [9] SUN L,JIANG D Y,ZHANG G Y,*et al.* . Responsivity enhancement of ZnO/Pt/MgZnO/SiO₂ and MgZnO/Pt/ZnO/SiO₂ structured ultraviolet detectors by surface plasmons in Pt nanoparticles [J]. *J. Appl. Phys.*, 2016,119(4):044508-1-5.
- [10] FATHIMA N,PRADEEP N,BALAKRISHNAN J. Investigations of the effects of electrode geometry and mechanical stress on antimony doped zinc oxide nanostructures based MSM UV photodetectors fabricated on flexible substrates [J]. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2019,194:207-214.
- [11] INAMDAR S I,RAJPURE K Y. High-performance metal-semiconductor-metal UV photodetector based on spray deposited ZnO thin films [J]. *J. Alloys Compd.*, 2014,595:55-59.
- [12] ZHAO M,WANG X,YANG G,*et al.* . Bias induced cutoff redshift of photocurrent in ZnO ultraviolet photodetectors [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2015,359:432-434.
- [13] DU X L,MEI Z X,LIU Z L,*et al.* . Controlled growth of high-quality ZnO-based films and fabrication of visible-blind and solar-blind ultra-violet detectors [J]. *Adv. Mater.*, 2009,21(45):4625-4630.
- [14] JU Z G,SHAN C X,JIANG D Y,*et al.* . Mg_xZn_{1-x}O-based photodetectors covering the whole solar-blind spectrum range [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008,93(17):173505-1-3.
- [15] ZHOU X,JIANG D Y,ZHAO M,*et al.* . Polarization induced two-dimensional electron gas in ZnO/ZnMgO heterointerface for high-performance enhanced UV photodetector [J]. *J. Alloys Compd.*, 2020,820:153416-1-7.
- [16] DUAN Y H,CONG M Y,JIANG D Y,*et al.* . ZnO thin film flexible UV photodetectors:regulation on the ZnO/Au interface by piezo-phototronic effect and performance outcomes [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2020,6(16):1900470-1-8.



杨翘楚(1992 -),男,吉林长春人,博士研究生,2015年于长春工业大学获得学士学位,主要从事涡旋通信、紫外及红外光电探测领域的研究。

E-mail: 18686465338@163.com