

文章编号: 1000-7032(2015)02-0200-06

## Au 电极厚度对 MgZnO 紫外探测器性能的影响

孙华山<sup>1,2</sup>, 刘可为<sup>1\*</sup>, 陈洪宇<sup>1</sup>, 范明明<sup>1,2</sup>, 陈 星<sup>1</sup>, 李炳辉<sup>1</sup>, 申德振<sup>1</sup>

(1. 发光学及应用国家重点实验室 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 利用分子束外延设备(MBE)制备了 MgZnO 薄膜。X 射线衍射谱、紫外-可见透射光谱和 X 射线能谱表明薄膜具有单一六角相结构,吸收边为 340 nm,Zn/Mg 组分为 62:38。采用掩膜方法使用离子溅射设备,在 MgZnO 薄膜上制备了 Au 电极,并实现了 Au-MgZnO-Au 结构的紫外探测器。通过改变溅射时间,得到具有不同 Au 电极厚度的 MgZnO 紫外探测器。研究结果表明:随着 Au 电极厚度的增加,导电性先缓慢增加,再迅速增加,最后缓慢增加并趋于饱和;而 Au 电极的透光率则随厚度的增加呈线性下降。此外,随着 Au 电极厚度的增加,器件光响应度先逐渐增大,在 Au 电极厚度为 28 nm 时达到峰值,之后逐渐减小。

**关键词:** MgZnO; 紫外探测器; Au 电极; 厚度

中图分类号: O484.4; O472.8

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20153602.0200

## Effect of Au Electrode Thickness on The Performance of MgZnO UV Detector

SUN Hua-shan<sup>1,2</sup>, LIU Ke-wei<sup>1\*</sup>, CHEN Hong-yu<sup>1,2</sup>,

FAN Ming-ming<sup>1,2</sup>, CHEN Xing<sup>1</sup>, LI Bing-hui<sup>1</sup>, SHEN De-zhen<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding Author, E-mail: liukw@ciomp.ac.cn

**Abstract:** MgZnO films were prepared by RF MBE equipment. X-ray diffraction, UV-visible transmission spectroscopy and X-ray energy dispersive spectroscopy indicated that MgZnO films had a single hexagonal phase structure with a sharp absorption edge at ~340 nm, and the composition ratio of Zn and Mg was 62:38. Au electrodes were deposited on MgZnO thin films by an ion sputtering apparatus with a mask and Au-MgZnO-Au UV detectors were fabricated. Au electrodes thicknesses could be modified by changing the sputtering time. With the increasing of Au electrode thickness, the conductivity of Au films increased slowly at first, then increased rapidly, and slowly to saturation finally. As for the transmittance of Au films, it decreased nearly linearly with the increasing of Au electrode thickness. In addition, with the increasing of Au electrodes thickness, the responsivity of MgZnO UV photodetectors gradually increased at first, and then decreased. When the thickness of Au electrode was 28 nm, the device has the best responsivity.

**Key words:** MgZnO; UV detectors; Au electrode; thickness

收稿日期: 2014-09-02; 修订日期: 2014-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(61475153, 10974197, 11134009); 国家“973 计划”(2011CB302006); 中科院“百人计划”资助项目

## 1 引言

紫外探测技术是继红外和激光探测之后发展起来的又一军民两用的探测技术。紫外探测器已被广泛应用于导弹预警、空间保密通讯、火灾监测和环境监测等诸多领域。ZnO 是一种典型的直接宽带隙半导体材料,其禁带宽度约为 3.37 eV。ZnO 基材料具有缺陷密度低、抗辐射能力强、饱和电子漂移速率大以及热稳定性好等诸多优点,且可通过 Mg 的掺入使其带隙从 3.3 eV 到 7.8 eV 连续可调<sup>[1-4]</sup>,因此被认为是制备紫外探测器的理想材料之一<sup>[5]</sup>。此外,丰富的原材料资源和低廉的价格更使 ZnO 基材料在紫外探测领域具有巨大的现实应用价值和广阔的潜在市场。截至目前,研究者已通过各种不同方法制备了不同结构的 ZnO 基紫外探测器件<sup>[6-11]</sup>,其探测范围可覆盖 UVA、UVB 和 UVC 等波段。众所周知,金属电极作为紫外探测器的重要组成部分对器件的性能有着重要的影响。一方面,通过电极可以对器件施加偏压并收集光电信号;另一方面,电极自身对紫外光有着强烈的吸收,到达光敏区的光子数就会减少,进而降低器件的外量子效率。因此,选择合适的电极材料、结构和厚度是实现高性能紫外探测器的关键因素。过去的报道主要集中于研究电极材料和结构对 ZnO 基紫外探测器性能的影响,而有关电极厚度和器件性能的关系却鲜有研究。我们知道,在电极材料和结构确定的前提下,电极的导电性和透光性与其厚度直接相关:薄的电极透光性好但是导电性不好,厚的电极拥有较高的电导率但是透光性不好<sup>[12-14]</sup>。如前所述,电极的导电性和透光性会直接影响紫外探测器件的性能,因此,通过调整金属电极的厚度,优化其导电性和透光性,可以有效提高紫外探测器件的探测性能。

本文制备了具有不同 Au 电极厚度的 MgZnO 紫外探测器件,研究了紫外探测器的光响应性能与 Au 电极厚度之间的关系,为实现高性能 MgZnO 紫外探测器件提供了实验和理论基础。

## 2 实验

实验采用英国 VG 公司生产的 V80H 型分子束外延设备(MBE)在  $\alpha$  面蓝宝石衬底上生长六角相 MgZnO 薄膜。在生长 MgZnO 薄膜之前, $\alpha$  面

蓝宝石衬底分别用三氯乙烯、丙酮、乙醇超声清洗 10,5,5 min 后,用去离子水冲洗 5 遍,干燥  $N_2$  吹干。然后,依次移入预处理室、生长室,准备开始生长。生长 MgZnO 薄膜时,用纯度分别为 99.9999% 和 99.999% 的高纯金属 Zn 和 Mg,以及纯度为 99.999% 的  $O_2$  作为原材料, $O_2$  流量为  $1.0 \text{ cm}^3/\text{min}$ 。射频等离子体功率为 300 W,生长时间 3 h。在所得到的 MgZnO 薄膜上,使用小型离子溅射仪,采用掩膜的方式制备了 Au 电极,从而实现 Au-MgZnO-Au 结构的紫外探测器,图 1 为 MgZnO 器件结构示意图。实验中采用的小型离子溅射仪是北京和同创业科技有限责任公司产品,型号为 JS-1600,其离子电流表所允许的最大电流为 50 mA,定时器允许最长时间为 900 s。在电极溅射时,真空度严格控制在 20 Pa,蒸发电流为 2 mA,通过改变溅射时间来获得不同厚度的 Au 电极。

对 MgZnO 外延薄膜分别采用 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、透射光谱以及能量弥散 X 射线谱(EDS)等进行测试分析。器件的光谱响应曲线、暗态  $I-V$  曲线等数据用紫外光电测试系统(卓立汉光)和半导体分析测试仪(安捷伦 B1500A)测试得到。此外,我们还在  $\alpha$  面蓝宝石衬底上直接溅射了 Au 薄膜,用以测试不同厚度 Au 薄膜对光的吸收特性。



图1 Au-MgZnO-Au 紫外探测器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Au-MgZnO-Au ultraviolet photodetector

## 3 结果与讨论

我们对生长得到的 MgZnO 薄膜进行了表征。图 2(a) 是样品的 X 射线衍射图。从图中可见, XRD 的衍射峰有两个,其中位于  $37.78^\circ$  的峰属于  $\alpha$  面蓝宝石衬底的  $(11\bar{2}0)$  峰,另一个位于  $34.58^\circ$  的峰来自六角相结构 MgZnO 的  $(0002)$  衍射峰。XRD 结果说明:制备得到的 MgZnO 薄膜为单一六角相结构,沿  $(0002)$  取向择优生长。此外,衍射峰的半高宽为  $0.33^\circ$ ,表明薄膜具有较好的结

晶质量。为了研究样品在紫外和可见波段的光吸收情况和吸收截止边,我们对样品进行了紫外-可见透射光谱研究,如图 2(b)所示。从图中可以看出 MgZnO 薄膜对 400 nm 以上波段的光吸收很少,透射率保持在 90% 以上;而对于波长低于 300 nm 的紫外光则呈现了强烈的吸收。MgZnO 薄膜的吸收边在 340 nm 附近,并且非常陡峭,表明制备得到的 MgZnO 薄膜适合制备紫

外探测器件。图 2(c)是样品的表面扫描电镜图,图 2(d)是样品的断面扫描电镜图。从图中可以看出 MgZnO 薄膜表面较为平整,膜厚约为 400 nm。图 2(e)是样品的能量弥散 X 射线谱,结果表明 Zn/Mg 组分的量比为 62:38。根据之前的报道<sup>[7]</sup>,当 Mg 摩尔分数小于 37% 时,MgZnO 合金一般为六方纤锌矿结构,与我们所得到的结果基本一致。

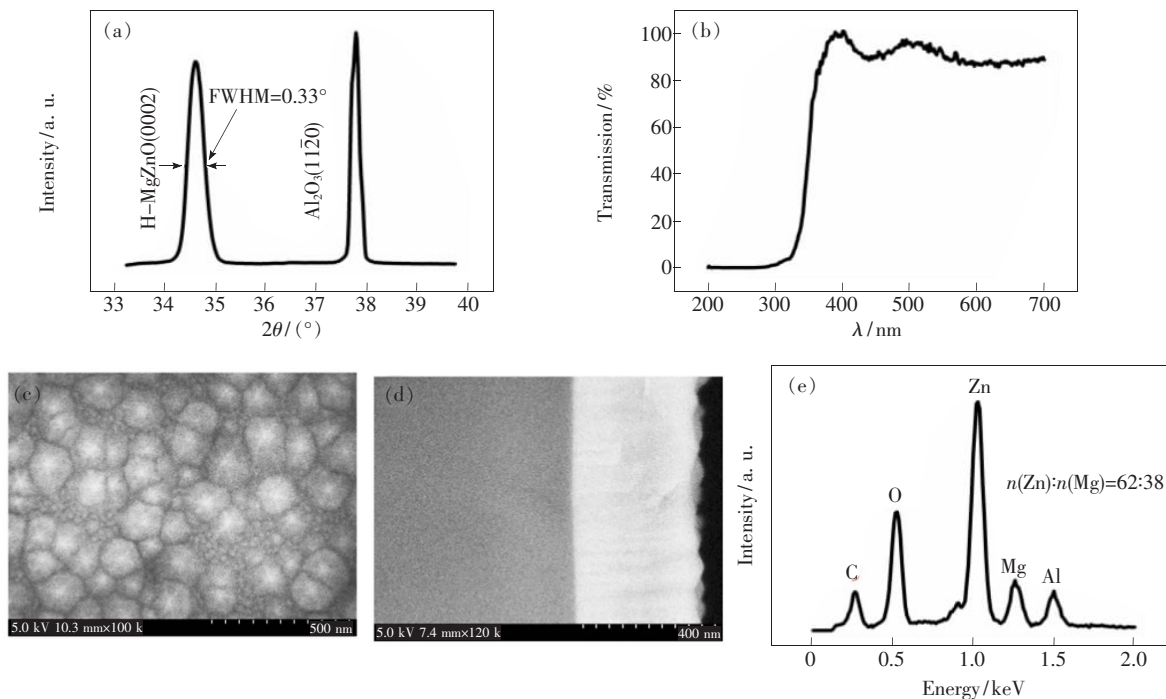


图 2 MgZnO 薄膜的性质表征。(a) XRD;(b) 透射光谱;(c) 表面 SEM 照片;(d) 断面 SEM 照片;(e) 能量弥散 X 射线谱。

Fig. 2 Characterization of MgZnO films. (a) XRD. (b) Transmission spectrum. (c) SEM image of the surface. (d) SEM image of the cross section. (e) Energy-dispersive X-ray spectroscopy.

图 3 是 Au 电极厚度随溅射时间变化的关系曲线。需要指出的是,为了获得准确的 Au 电极

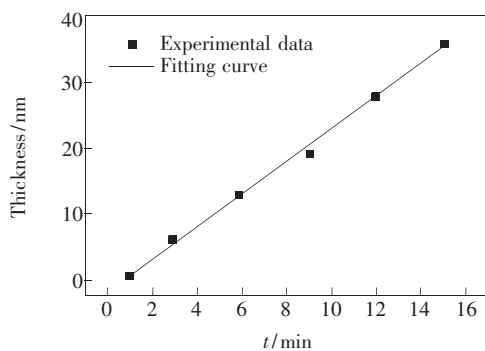


图 3 Au 电极厚度随溅射时间的变化曲线

Fig. 3 Thickness of Au electrode as a function of sputtering time

厚度,我们对不同厚度 Au 电极的 MgZnO 薄膜进行了断面扫描电镜测试(图未给出),通过测量每一个样品的 10 个不同位置的断面厚度再计算出其平均值,即为该 Au 电极的厚度。当溅射时间为 1,3,6,9,12,15 min 时,计算得到的膜厚分别为 1,6,13,19,28,36 nm。从图中可以看出 Au 电极厚度随时间的增长大致是一个线性关系。此外,随着 Au 薄膜厚度的增大,其形貌也从准连续膜向连续膜转变。

图 4(a)给出了不同厚度的 Au 电极的透射光谱。从图中可以看到:当 Au 电极厚度小于 19 nm 时,对 280 ~ 400 nm 波段的紫外光具有较高的透过率,并且随波长变化不大;随着 Au 电极厚度的

增大,透光率逐渐下降;当 Au 电极厚度大于 28 nm 时,其平均透过率不超过 60%,并且随波长减小而明显降低。根据所得的 MgZnO 薄膜的吸收边,我们重点研究了 Au 电极对于 340 nm 波长的紫外光的吸收情况。图 4(b)是波长为 340 nm 的紫外光的透过率随 Au 电极厚度变化的曲线,可以看出薄膜的透光性随 Au 电极厚度的增大呈现近线性的降低。

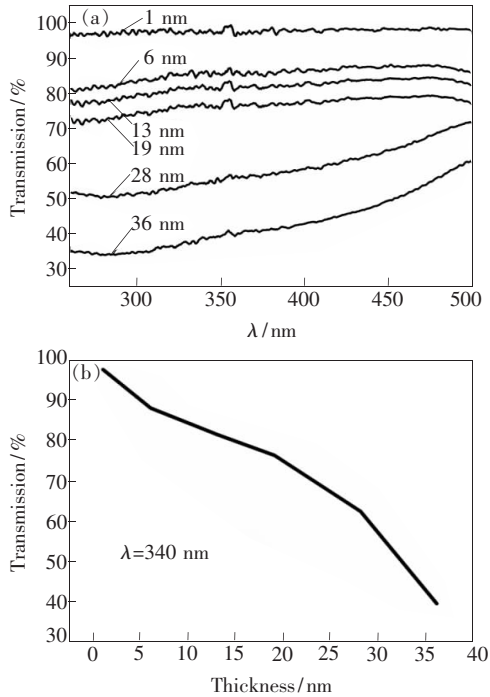


图 4 (a) Au 电极厚度对透光性的影响;(b) 波长为 340 nm 的紫外光的透过率随电极厚度变化的曲线。

Fig. 4 (a) Effect of Au electrode thickness on the transmission. (b) Transmission of Au at the wavelength of 340 nm as a function of Au electrode thickness.

图 5(a)是具有不同 Au 电极厚度的 MgZnO 紫外探测器件的暗态  $I$ - $V$  曲线。可以看出器件在暗态下的电流与外加偏压成明显的线性关系,说明 Au 电极与 MgZnO 薄膜之间是良好的欧姆接触。图 5(b)是器件在 10 V 偏压下的暗电流随 Au 电极厚度变化的曲线。当 Au 电极厚度在 0 ~ 20 nm 范围内增大时,器件暗电流随电极厚度的增大而缓慢变大;当 Au 电极厚度增加到 20 nm 以上时,器件暗电流迅速增大;当 Au 电极厚度达到 30 nm 以上时,器件暗电流缓慢增大并趋于饱和。当电极厚度过薄时,Au 薄膜处于非连续或者准连续状态,不能形成连续的导电薄膜导致其导电性极差。随着电极厚度的增大,Au 薄膜连续性

增加,导电性也随之缓慢增大。之后,随着厚度的继续增大,Au 薄膜由准连续态转变为连续态,此时薄膜已经具有体材料的特性,因此其导电性不但不会有显著变化,反而有饱和的趋势。

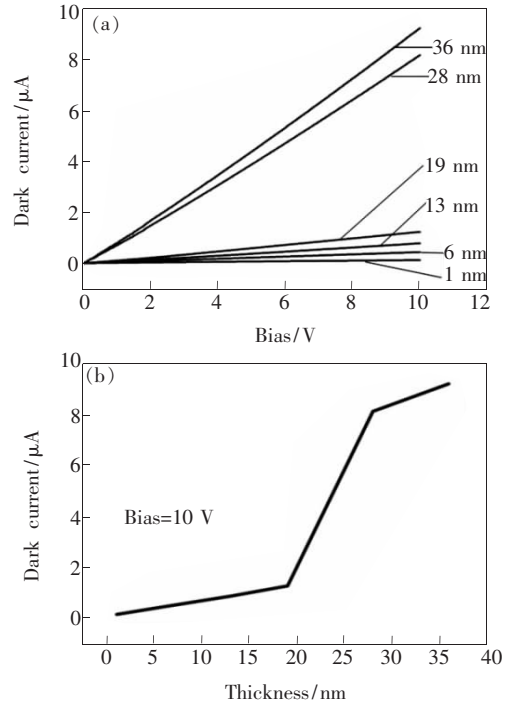


图 5 (a) 不同 Au 电极厚度的 MgZnO 紫外探测器暗态  $I$ - $V$  特性;(b) 10 V 偏压下,器件暗电流随电极厚度变化的曲线。

Fig. 5 (a)  $I$ - $V$  curves of MgZnO UV photodetectors with different Au electrode thicknesses in dark. (b) Dark current of MgZnO UV photodetectors as a function of Au electrode thickness at 10 V bias.

图 6(a)是具有不同 Au 电极厚度的 MgZnO 紫外探测器件在 10 V 偏压下的光响应特性曲线。从图中可以看出,随着 Au 电极厚度的增大,器件的响应度逐渐变大;当电极厚度为 28 nm 时,器件的响应度达到最高;再继续增加 Au 电极厚度,器件的响应度开始降低。图 6(b)给出了器件在 340 nm 处的光响应度与 Au 电极厚度的关系曲线。当 Au 电极厚度为 28 nm 时,器件光响应度达到最高,约为 130 mA/W。

上述现象与 Au 电极的导电性和透光性直接相关。当 Au 电极较薄时,电极有较好的透光性,入射光子可以到达光敏区,器件外量子效率较高;但是电极的导电性差,载流子的分离和收集效率不高,所以此时的光响应度较低。当 Au 电极厚度在 0 ~ 13 nm 范围逐渐增大时,Au 电极导电性



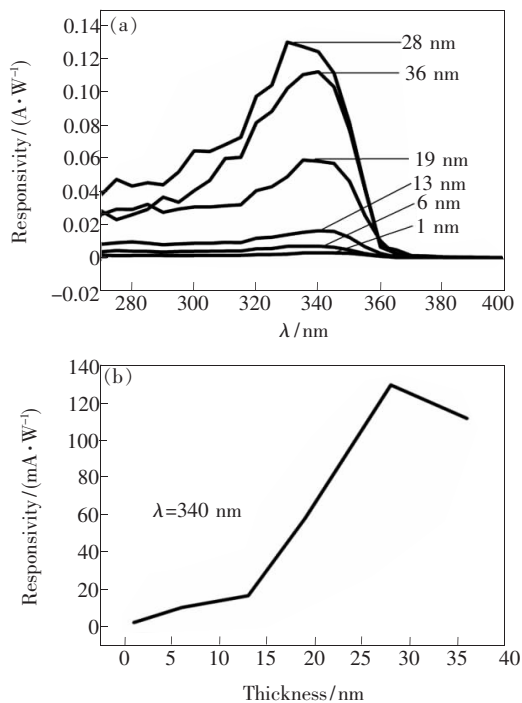


图 6 (a) 具有不同电极厚度的 Au-MgZnO-Au 紫外探测器件在 10 V 偏压下的光响应曲线;(b) 器件在 340 nm 波长的响应度随 Au 电极厚度变化的曲线。

Fig. 6 (a) Responsivity of Au-MgZnO-Au UV photodetectors with different Au electrode thickness at 10 V bias. (b) Responsivity of the device at 340 nm as a function of Au electrode thickness.

增加,有利于光生载流子的分离和收集,尽管 Au 电极透光性也在逐渐降低,不利于光敏层对光子的吸收,但是导电性的有利影响占主导,故光响应

度增加。当 Au 电极厚度在 13 ~ 28 nm 范围增大时,仍然是导电性的有利影响占主导,而且由于 Au 电极由准连续膜变为连续膜,导电性增加较快,使得器件的光响应快速增加。当 Au 电极厚度在 28 nm 左右时,器件的响应度最高。继续增加 Au 电极厚度,Au 电极对光的吸收持续增加,到达光敏区的光子持续减少,而导电性趋于饱和,所以光响应度开始降低。因此,只有当 Au 电极厚度处于某一个特定值时,器件的探测性能才能得到有效提高。而本实验的目的也正是为了寻找最佳电极厚度,使器件的光响应信号达到最强,为今后的实验提供理论和实验依据。

## 4 结 论

利用射频 MBE 设备制备了高质量的六角相 MgZnO 合金薄膜,并利用小型离子溅射仪在其上面制备了不同厚度的 Au 电极,实现了 Au-MgZnO-Au 金属-半导体-金属结构紫外探测器。结果表明:当 Au 电极厚度在 0 ~ 20 nm 范围内逐渐增加时,Au 薄膜的导电性缓慢增加;当电极厚度增大到 20 nm 以上时,Au 薄膜导电性迅速增长;而当厚度达到 30 nm 时,Au 薄膜导电性缓慢增加并趋于饱和。与此同时,Au 薄膜的透光性则随着电极厚度的增加而线性降低。此外,随着 Au 厚度的增加,器件光响应强度先逐渐增大,后逐渐减小,在 Au 电极厚度为 28 nm 时达到最大值 130 mA/W。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Liu K W, Sakurai M, Aono M. ZnO-based ultraviolet photodetectors [J]. *Sensors*, 2010, 10:8604-8634.
- [ 2 ] Zheng J, Zhang Z Z, Wang L K, *et al.* Controlled growth of pure cubic  $Mg_{0.3}Zn_{0.7}O$  thin films on *c*-plane sapphire by introducing graded buffer layer [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2014, 35(9):1040-1045 (in Chinese).
- [ 3 ] Yang W, Vispute R, Choopun S, *et al.* Ultraviolet photoconductive detector based on epitaxial  $Mg_{0.34}Zn_{0.66}O$  thin films [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78(18):2787-2789.
- [ 4 ] Xie X H. The Fabrication and Internal Gain Properties of MgZnO-based Heterostructures Ultraviolet Detectors [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014 (in Chinese).
- [ 5 ] Zhao C Y. The Growth of ZnO Films by MOCVD and The Study of Photodetectors Fabricated on ZnO Films [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009 (in Chinese).
- [ 6 ] Takeuchi I, Yang W, Chang K S, *et al.* Monolithic multichannel ultraviolet detector arrays and continuous phase evolution in  $Mg_xZn_{1-x}O$  composition spreads [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 94:7336-7340.
- [ 7 ] Yang W, Hullavarad S, Nagaraj B, *et al.* Compositionally-tuned epitaxial cubic  $Mg_xZn_{1-x}O$  on Si(100) for deep ultraviolet photodetectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82:3424-3426.

