

基于高阻 ZnO 薄膜的光电导型紫外探测器

祁晓萌 彭文博 赵小龙 贺永宁

Photoconductive UV detector based on high-resistance ZnO thin film

Qi Xiao-Meng Peng Wen-Bo Zhao Xiao-Long He Yong-Ning

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 198501 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.198501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.198501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于垂直晶体管结构的低电压并五苯光电探测器

Low-voltage pentacene photodetector based on a vertical transistor configuration

物理学报.2015, 64(10): 108503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.108503>

高速高饱和单行载流子光探测器的设计与分析

Design and analysis of high speed and high saturation uni-traveling-carrier photodetector

物理学报.2014, 63(20): 208502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.208502>

基于内聚区模型的 InSb 面阵探测器分层研究

Delamination study of InSb infrared focal plane arrays using a cohesive zone model

物理学报.2014, 63(11): 118503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.118503>

基于表面等离子体共振增强的硅基锗金属-半导体-金属光电探测器的设计研究

Design of silicon based germanium metal-semiconductor-metal photodetector enhanced by surface plasmon resonance

物理学报.2013, 62(17): 178502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.178502>

超导纳米线多光子响应特性研究

Response properties of NbN superconductor nanowire for multi-photon

物理学报.2012, 61(20): 208501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.208501>

基于高阻 ZnO 薄膜的光电导型紫外探测器*

祁晓萌 彭文博 赵小龙 贺永宁†

(西安交通大学, 电子与信息工程学院, 西安 710049)

(2015年2月6日收到; 2015年5月29日收到修改稿)

本文通过射频磁控溅射法在玻璃衬底上沉积一层 ZnO 薄膜, 制备了 Al-ZnO-Al 结构光电导型紫外探测器件, 并在室温下测试了所制备器件的暗场特性及其对紫外线的响应特性. 暗场条件下器件电流特性测试结果表明所制备的 ZnO 薄膜电阻率达到了 $3.71 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$, 是一种高阻薄膜. 在波长 365 nm, 光强 $303 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的紫外线照射下, 薄膜的电阻率为 $7.20 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$, 探测器明暗电流比达到了 516. 40 V 偏置电压条件下周期性开关紫外线照时, 探测器的上升和下降时间分别为 199 ms 和 217 ms, 响应速度快且重复性好, 并利用 ZnO 半导体表面复合慢过程和体复合快过程对瞬态响应过程进行了理论拟合分析. 本文研究结果表明, 高阻 ZnO 薄膜紫外探测器具有良好的紫外光电响应特性.

关键词: 高阻 ZnO 薄膜, 紫外探测, 快速响应

PACS: 85.60.Gz, 07.07.Df, 68.55.-a, 81.05.Dz

DOI: 10.7498/aps.64.198501

1 引言

ZnO 是一种宽禁带的半导体材料, 在发光二极管^[1,2]、激光二极管^[3,4]、传感器^[5,6]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、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紫外探测器^[7]. 目前, 人们对 ZnO 紫外探测器的研究主要集中在 MSM(金属-半导体-金属)结构方面, 包括以欧姆接触为基础的光电导型和以肖特基接触为基础的肖特基势垒型. 相对于肖特基接触型紫外探测器而言, 光电导型探测器具有光增益高、光响应强的优点^[8], 但由于其光电导弛豫以及 ZnO 的表面效应使其光响应速度慢, 响应时间长. 宋志明等^[9]利用横向生长的 ZnO 纳米线制备了 MSM 结构的光电导型紫外探测器, 测试结果显示器件的暗场电阻为 $1.56 \times 10^6 \Omega$, 20 V 偏置电压下响应度为 5 A/W, 上升和下降时间分别为 4 s 和 5 s. Inamdar

等^[10]采用化学喷雾热解技术通过改变衬底温度在玻璃衬底上生长出不同厚度的 ZnO 薄膜并制备出了 Ag-ZnO-Ag 结构紫外探测器, 测试结果显示暗场电阻为 $2.5 \times 10^5 \Omega$, 5 V 偏置电压下上升下降时间分别为 16 s 和 18 s. Xu^[11], Panda^[12], Kind^[13], Li^[14]等也对基于非高阻 ZnO 的紫外探测器做了报道, 结果显示探测器响应时间从几秒到几百秒变化. 较长的响应时间必然会使探测器的应用受到限制. 因此, 本文制备出了高阻 ZnO 薄膜, 并从实验和理论上研究了高阻 ZnO 半导体对紫外探测器性能的影响.

2 实验

2.1 高阻 ZnO 薄膜紫外探测器的制备

高阻 ZnO 薄膜的光电导紫外探测器的制备过程如图 1 所示. 首先用纯度为 99.99% 的 ZnO 靶通过射频磁控溅射的方法在玻璃衬底上溅射一层 ZnO 薄膜, 溅射条件为室温下, Ar 气流量 10 sccm、气压 1.0 Pa、射频功率 120 W, 溅射时间为 30 min.

* 中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: xkjc2014011)和国家自然科学基金(批准号: 60876038)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yongning@mail.xjtu.edu.cn

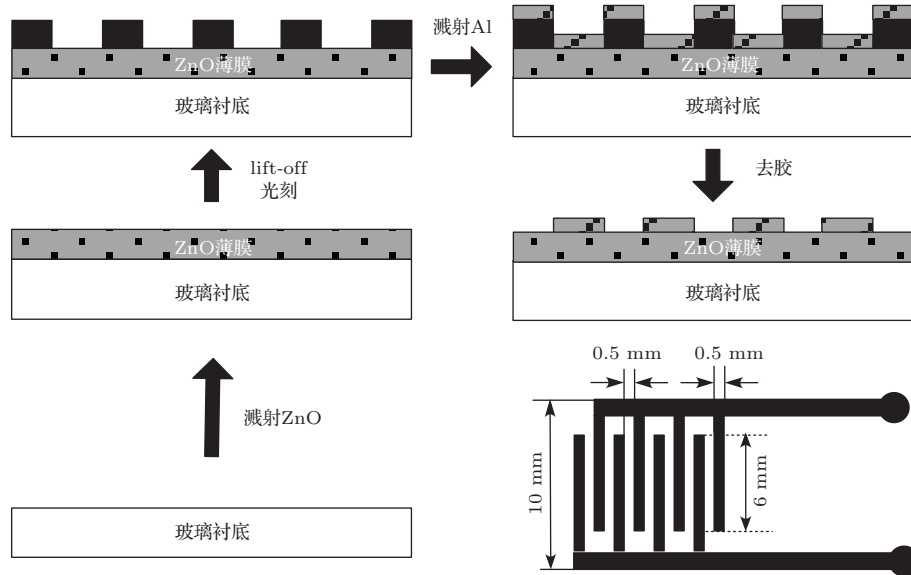


图1 紫外探测器件的制备流程及Al电极结构

Fig. 1. Preparation process of UV detector and the structure of Al electrodes.

然后在 ZnO 薄膜上涂覆一层较厚的负性 lift-off 光刻胶, 并通过曝光、显影将掩膜版上叉指电极的图形转移到光刻胶上. 接着用 Al 靶在图形化的光刻胶上溅射一层 Al 膜, 溅射条件为室温下, Ar 气流量 10 sccm、气压 1.2 Pa、射频功率 120 W, 溅射时间为 20 min. 最后用丙酮浸泡去胶可得到图 1 中所示叉指电极. 电极尺寸如图所示.

2.2 高阻 ZnO 薄膜的表征及探测器的测试

分别使用 S-4800 型扫描电子显微镜 (SEM) 和 D/MAX-2400 型 X 射线衍射仪 (XRD) 对 ZnO 薄膜的表面形貌和晶向进行表征. 使用紫外可见分光光度计 (SHIMADZU UV-2550) 测试 ZnO 薄膜的紫外可见透射谱 (UV-VIS). 由 ZF-8 型紫外线源提供波长 365 nm 的紫外线, 双通道源表 (Agilent B2902

A) 测量并保存探测器的电流值. 用氙灯 (LHX150) 和光谱仪 (LSP-X150), 测试器件对不同光波长的响应度.

3 结果与讨论

ZnO 薄膜的 SEM 和 XRD 表征结果如图 2(a) 所示, ZnO 薄膜晶粒分布均匀, 尺寸约为 90—140 nm, 膜厚约为 626 nm. XRD 图中所示该 ZnO 薄膜只在 (002) 晶面方向有很强的衍射峰, 说明制备出的 ZnO 薄膜具有良好的 c 轴取向. 图 2(b) 是 ZnO 薄膜的透射谱表征结果, ZnO 薄膜在光波长为 370—380 nm 附近有明显的吸收边, 波长为 365 nm 处的透射率仅为 0.47%, 说明该 ZnO 薄膜对波长为 365 nm 的紫外线有很强的吸收能力.

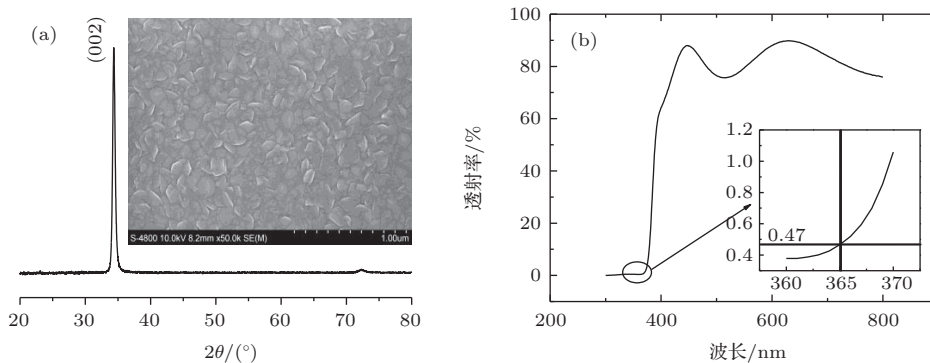


图2 ZnO 薄膜的表征结果 (a) ZnO 薄膜的 XRD 和 SEM(内插图) 图; (b) ZnO 薄膜的紫外可见透射谱

Fig. 2. Characterization of ZnO thin film: (a) XRD and SEM (insert) images; (b) UV-VIS transmission spectrum.

将紫外探测器置于暗场中一段时间, 测试器件的暗场电流-电压特性, 计算得到暗场电阻率为 $3.71 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$, 40 V 偏置电压下的暗电流为 66.1 pA, 说明通过射频磁控溅射法制备出了高阻 ZnO 薄膜, 该高阻薄膜的产生可能是因为薄膜生长过程中 Zn 与 O 的结合趋于化学配比, 薄膜中的载流子浓度较低^[15]. 将探测器放置在不同光强的 365 nm 紫外线下, 测得探测器的稳态电流-电压的关系如图 3(a) 所示, 不同紫外线强度下探测器的电流-电压曲线均呈线性, 说明 Al 电极与 ZnO 薄膜形成了良好的欧姆接触. 将探测器放置在光强为 $303 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的紫外线下, 偏置电压为 40 V 时光电

流为 34.1 nA, 光响应度为 0.15 mA/W. 与暗场测试结果相比, 明暗电流比达到 516, 光场电阻率为 $7.20 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$, 远小于暗场电阻率说明产生了明显的光电导现象. 探测器的紫外线开关响应过程如图 3(b), 探测器暴露在波长为 365 nm 的紫外线下, 紫外线的光子能量大于 ZnO 半导体的禁带宽度, 价带中的电子吸收光子能量后越过禁带宽度跃迁到导带中, 而在价带中留下空穴, 光生载流子浓度的增大必然导致光电导型探测器电流增大. 关闭紫外光源后, 由于光生载流子的复合使得探测器的电流减小并恢复至暗场水平.

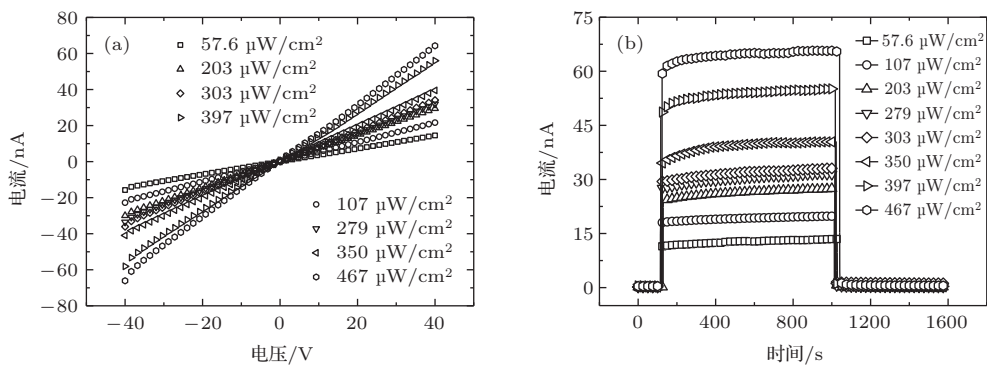


图 3 不同紫外线强度下探测器的响应特性 (a) I - V 特性; (b) I - t 特性

Fig. 3. The response characteristics of detectors under different UV intensity: (a) I - V characteristics; (b) I - t characteristics.

为了更准确地研究探测器的瞬态响应特性, 将器件放在光强 $303 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 波长 365 nm 的紫外线下, 调整双通道测试源表的采样周期, 在 40 V 偏置电压条件下测试探测器的开关响应特性曲线如图 4(a) 所示. 定义上升时间 t_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 t_f 为所加偏置电压下稳态光电流从 90% 下降到 10% 的时间. 40 V 偏置电压下探测器的上升时间为 199 ms, 下降时间为 217 ms. 图 4(b) 是空气中放置一段时间后探测器的测试结果, 当偏置电压从 5—40 V 变化时, 探测器的响应时间在 200—300 ms 左右, 其中偏置电压为 5 V 时, 探测器的上升时间为 286 ms, 下降时间为 290 ms, 与文献^[10]相比响应时间缩短到约 1/60. 可见该高阻 ZnO 薄膜光电导型紫外探测器具有较快的响应速度. 此外图 4 中所示紫外光源开启和关闭后电流的上升和下降均包含一个快过程和一个慢过程. ZnO 薄膜紫外探测

器处于暗场中时, 空气中的 O_2 分子夺取 ZnO 中的自由电子以 O_2^- 的形式吸附在 ZnO 表面并在 ZnO 表面形成耗尽层. 紫外线照射时, 由于 ZnO 的光吸收产生大量光生电子-空穴对, 使 ZnO 薄膜的电导率增大. 伴随着电子-空穴对的产生, 电子和空穴也伴随着复合过程. 除体复合过程外, 光生空穴在内建电势的作用下向 ZnO 表面移动, 与吸附的 O_2^- 结合以 O_2 形式释放到空气中, 这个过程叫做氧的解吸附过程^[16]. 上述两种复合机理中, 体复合过程是较快的过程而解吸附过程则是一个较慢的过程. 因此开启紫外光照后探测器电流的上升过程分为一个快过程和一个慢过程. 与此过程类似, 关闭紫外光照后, ZnO 半导体中不再产生光生电子-空穴对, 剩余电子会通过体复合过程及氧的再吸附过程发生复合, 关闭紫外线照后探测器电流的下降过程也分为一个快过程和一个慢过程.

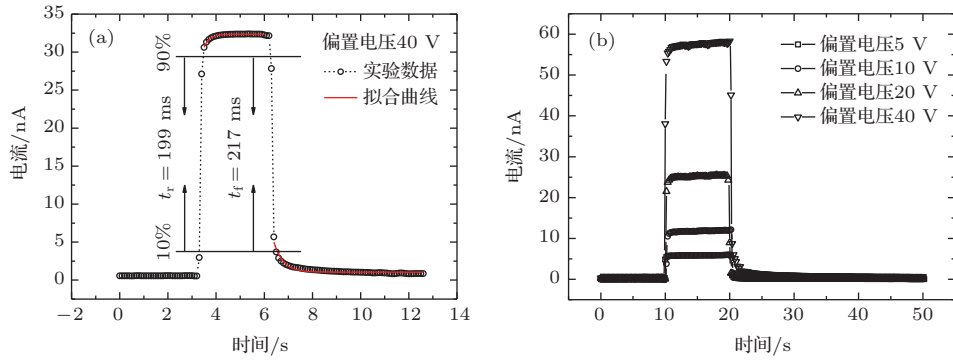


图4 (网刊彩色) 探测器的紫外开关响应特性 (a) 40 V 偏置电压下的响应特性; (b) 不同偏置电压下的响应特性
Fig. 4. (color online) Transient response of the detectors: (a) response characteristic with a bias voltage of 40 V; (b) response characteristics with different bias voltage.

由于 ZnO 中电子和空穴的体复合是快过程, 认为电子和空穴的产生及复合达到动态平衡, 则慢过程中载流子浓度的变化满足^[17]

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{1}{\sigma^0 D} \cdot \frac{d\theta}{dt}, \quad (1)$$

其中, σ^0 是一个氧吸附位置所占的面积, D 是 ZnO 薄膜的厚度, θ 是表面覆盖度, 表示吸附的 O_2^- 数占总可吸附位置的比例.

对 ZnO 的表面过程进行分析, θ 满足

$$\frac{d\theta}{dt} = K_2(1-\theta)n \cdot \exp\left(-\frac{V_s}{kT}\right) P_{O_2} - K_1\theta p \cdot \exp\left(\frac{V_s}{kT}\right), \quad (2)$$

其中, K_1, K_2 是常数, V_s 是表面势, P_{O_2} 是氧分压.

将 (2) 式代入 (1) 式可得

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{1}{\sigma^0 D} \cdot \left[K_2(1-\theta)n \cdot \exp\left(-\frac{V_s}{kT}\right) P_{O_2} - K_1\theta p \cdot \exp\left(\frac{V_s}{kT}\right) \right]. \quad (3)$$

对于本高阻 ZnO 薄膜, 单位面积悬挂键数目约为 $1.1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$, 载流子浓度约为 $1.7 \times 10^8/\text{cm}^3$, 由此可知表面覆盖度 $\theta \ll 1$. 对 (3) 式进行化简,

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{1}{\sigma^0 D} \cdot \left[K_2 n \cdot \exp\left(-\frac{V_s}{kT}\right) P_{O_2} - K_1 \theta p \cdot \exp\left(\frac{V_s}{kT}\right) \right]. \quad (4)$$

上式在表面覆盖度 $\theta \approx \theta_0$, 且表面势不变的近似条件下进一步化简得到

$$\frac{dn}{dt} = -\left[K_2' n P_{O_2} - K_1' \theta_0 \frac{g}{rn} \right], \quad (5)$$

其中,

$$K_2' = \frac{1}{\sigma^0 D} \cdot K_2 \cdot \exp\left(-\frac{V_s}{kT}\right),$$

$$K_1' = \frac{1}{\sigma^0 D} \cdot K_1 \cdot \exp\left(\frac{V_s}{kT}\right).$$

求解 (5) 式得

$$n^2 = n_s^2 + (n_0^2 - n_s^2) \cdot \exp(-2K_2' P_{O_2} t), \quad (6)$$

$$\text{其中, } n_s^2 = \frac{K_1' \theta_0 g}{K_2' P_{O_2} r}.$$

应用 (6) 式对响应的慢过程进行拟合, 图 4(a) 中实线即为拟合结果, 表明 (6) 式能够很好地对高阻 ZnO 的光电流瞬态上升和衰减过程进行准确的理论拟合. (6) 式表明在氧吸附与解吸附过程中, 饱和光电流不仅与光照强度有关, 还与 ZnO 表面的吸附量有关, ZnO 表面的氧吸附增加了器件的响应度, 但较慢的表面过程使载流子寿命增大, 响应速度变慢. 对于高阻 ZnO 薄膜, $\theta \ll 1$, 表面过程相对体复合过程所占比例很小, 响应过程中体复合过程起主要作用, 探测器的响应速度显著提高. 当探测器长时间放置在空气中时, ZnO 表面吸附水分子和 O_2 等, 吸附量的增大使得在相同测试条件下探测器的光电流增大, 响应时间变长. 这就能够说明图 4(b) 中稳定光电流增大且响应时间增加的现象.

为了研究探测器对不同波长的光响应, 从而验证该探测器的紫外可分辨性. 将探测器放在波长从 200—800 nm 变化的光源下, 探测器的电流以及单色仪的光谱曲线如图 5 所示. 由图中可以看出探测器对紫外线具有比对可见光波段更为显著的响应, 紫外光响应电流是可见光响应电流的 20 倍. 对可见光波段相对微弱的响应电流是由 ZnO 薄膜的深能级本征缺陷所致^[18]. 为了分析探测器瞬态响应的可重复性, 将探测器放置于波长 365 nm、不同光强的紫外线下 (偏置电压 40 V) 多次开关紫外光源

得到图 6 所示电流-时间关系曲线. 光源开启和关闭保持时间均为 5 min, 由图可知, 开启光源后探测器在短时间内达到稳定的光电流且光强越强稳定光电流越大, 关闭紫外光源后探测器迅速恢复至暗场水平, 多次重复此过程呈现良好的可重复性.

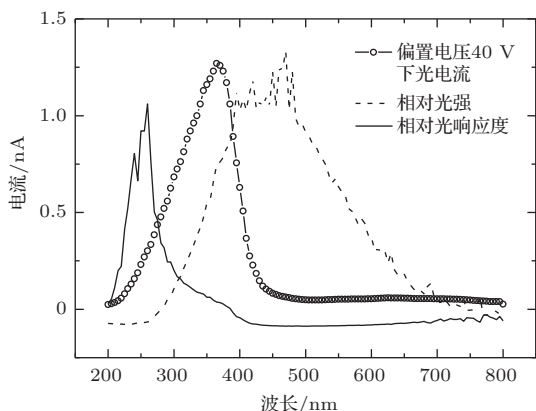


图 5 探测器对不同光波长的响应特性

Fig. 5. The response characteristics of the detector for different wavelengths.

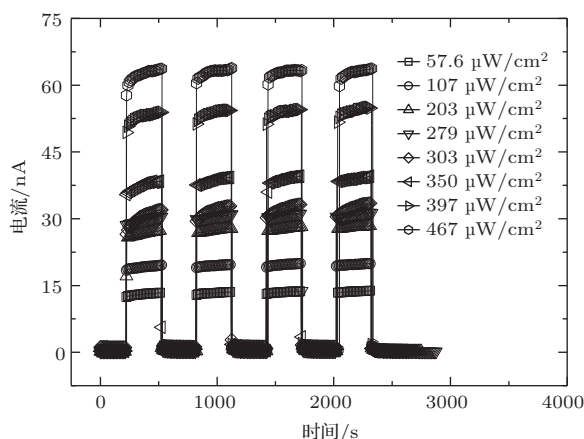


图 6 不同紫外线强度下探测器电流的周期性紫外开关响应特性

Fig. 6. The response characteristics of the detector for periodic switching UV light with different intensity.

4 结 论

本文通过射频磁控溅射法淀积 ZnO 薄膜并制备了 Al-ZnO-Al 结构光电导型紫外探测器件. 对所制备的探测器进行了稳态及瞬态特性测试, 结果表明所制备的 ZnO 薄膜电阻率为 $3.71 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$, 是高阻薄膜. 在 365 nm, $303 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的紫外线照和 40 V 偏置电压条件下探测器明暗电流比高达 516 且周期性开关紫外线照时上升和下降时间分别为 199 ms 和 217 ms. 利用 ZnO 表面吸附过程能很好

地对器件的响应机理进行解释, 理论分析表明, 高阻 ZnO 薄膜紫外探测器的响应过程中表面吸附过程的影响远小于体复合过程, 表面吸附过程得到抑制, 具有较快的响应速度. 该论文研究工作表明, 高阻 ZnO 薄膜能够用于制备具有快响应速度的高性能紫外探测器件.

参考文献

- [1] Wang X D, Summers C J, Wang Z L 2004 *Nano Lett.* **4** 423
- [2] Sun H, Zhang Q F, Wu J L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3479 (in Chinese) [孙晖, 张琦峰, 吴锦雷 2007 物理学报 **56** 3479]
- [3] Huang M, Mao S, Feick H, Yan H, Wu Y, Kind H, Weber E, Russo R, Yang P 2001 *Sci.* **292** 1897
- [4] Liu R B, Zou B S 2011 *Chin. Phys. B* **20** 047104
- [5] Yu C, Hao, Q, Saha S, Shi L, Yang X, Wang Z L 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 063101
- [6] Das S N, Moon K J, Kar J P, Choi J H, Xiong J J 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 022103
- [7] Wei M, Deng H, Wang P L, Li Y 2007 *Mater Rev.* **21** 1 (in Chinese) [韦敏, 邓宏, 王培利, 李阳 2007 材料导报 **21** 1]
- [8] Liu Y Y, Yuan Y Z, Li J, Gao X T 2007 *Mater Rev.* **21** 9 (in Chinese) [刘云燕, 袁玉珍, 李洁, 高绪团 2007 材料导报 **21** 9]
- [9] Song Z M, Zhao D X, Guo Z, Li B H, Zhang Z Z, Shen D Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 052901 (in Chinese) [宋志明, 赵东旭, 郭振, 李炳辉, 张振中, 申德振 2012 物理学报 **61** 052901]
- [10] Inamdar S I, Rajpure K Y 2014 *J. Alloys Compd.* **595** 55
- [11] Xu Q A, Zhang J W, Ju K R, Yang X D, Hou X 2006 *J. Cryst. Growth* **289** 44
- [12] Panda S K, Jacob C 2012 *Solid-State Electron.* **73** 44
- [13] Kind H, Yan H, Messer B, Law M, Yang P 2002 *Adv. Mater.* **14** 158
- [14] Li Y, Feng S W, Sun J Y, Xie X S, Yang J, Zhang Y Z, Lu Y C 2006 *2006 8th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology Proceedings Shanghai*, 23–26 Oct. 2006 p947
- [15] Ma Y 2004 *Ph. D. Dissertation* (Chongqing: Chongqing University) (in Chinese) [马勇 2004 博士学位论文 (重庆: 重庆大学)]
- [16] He Y, Zhang W, Zhang S, Kang X, Peng W, Xu Y 2012 *Sens. Actuators A* **181** 6
- [17] Zhao X L, Kang X, Chen L, Zhang Z B, Liu J L, Ouyang X P, Peng W B, He Y N 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 098502 (in Chinese) [赵小龙, 康雪, 陈亮, 张忠兵, 刘金良, 欧阳晓平, 彭文博, 贺永宁 2014 物理学报 **63** 098502]
- [18] Peng W, He Y, Zhao X, Liu H, Kang X, Wen C 2013 *J. Micromech. Microeng.* **23** 125008

Photoconductive UV detector based on high-resistance ZnO thin film*

Qi Xiao-Meng Peng Wen-Bo Zhao Xiao-Long He Yong-Ning[†]

(School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 6 February 2015; revised manuscript received 29 May 2015)

Abstract

As a wide bandgap semiconductor material, ZnO has huge potential in applications such as light emitting devices and sensors. Compared with GaN and SiC, ZnO has a bandgap of 3.37 eV and exciton binding energy of 60 meV at room temperature, indicating it is a promising candidate of UV detector. ZnO based metal-semiconductor-metal photoconductive ultraviolet detector has the advantages of high optical gain and strong responsivity. However, due to the photoconductive relaxation and surface effect of the ZnO material, a ZnO-based photoconductive UV detector has a slow response which is defective for practical application. The intrinsic defects typically generated during the synthesis of ZnO, e.g. oxygen vacancy, should be responsible for the slow response. Therefore, we have fabricated the high-resistive ZnO thin film based UV detector and studied its UV response characteristic. High resistance ZnO thin film is fabricated on glass by RF magnetron sputtering and followed by lift-off photolithography to form Al interdigital electrodes. SEM and XRD images show that the as-fabricated ZnO thin film grows with preferential orientation along *c*-axis. A linear *I*-*V* curve under UV illumination indicates the ohmic contact between Al and ZnO. From these results, we can calculate the resistivities to be $3.71 \times 10^9 \Omega\cdot\text{cm}$ and $7.20 \times 10^6 \Omega\cdot\text{cm}$ respectively when in the dark and under 365 nm UV light of $303 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. The light-to-dark current ratio is up to 516 with bias of 40 V. Besides, the ZnO thin film detector shows a stable, rapid, repeatable and reproducible response with a rise time of 199 ms and a fall time of 217 ms when exposed to periodically switched UV light illumination at a bias voltage of 40 V. Moreover, the detector has a high selectivity for 365 nm UV light and the responsivity is 0.15 mA/W with the intensity of $303 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Furthermore, the transient response process is analyzed using the theory of surface recombination and bulk recombination of ZnO semiconductor. For a high resistance ZnO thin film based UV detector, the surface recombination process is weakened ascribed to the decrease of intrinsic defects and the bulk recombination process plays a leading role, resulting in the fast response. Results show that high resistivity ZnO thin film based UV detectors have outstanding UV photoresponse characteristics for potential applications in UV/radiation detection.

Keywords: high-resistance ZnO thin film, ultraviolet detect, transient response

PACS: 85.60.Gz, 07.07.Df, 68.55.-a, 81.05.Dz

DOI: 10.7498/aps.64.198501

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (Grant No. xkjc2014011) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60876038).

[†] Corresponding author. E-mail: yongning@mail.xjtu.edu.cn