

文章编号: 1001-3806(2009)02-0159-03

光电探测器结构对光响应特性的影响

梁德春¹, 李清山^{1,2*}, 孙方华¹, 李新坤¹, 宗磊¹

(1. 曲阜师范大学 物理工程学院, 曲阜 273165; 2. 鲁东大学, 烟台 264025)

摘要: 为了研究不同结构光电探测器的光响应特性, 采用脉冲激光沉积技术在玻璃衬底上制备了 ZnO 基紫外探测器。X 射线衍射谱、扫描电子显微镜和光致发光光谱显示, ZnO 膜为多晶结构, 表面平整, 并具有良好的化学配比。比较平面结构探测器和夹层式探测器的光响应特性可知, 探测器结构对光电探测特性具有重要影响。结果表明, 平面结构探测器中的电极宽度引起响应时间和响应度之间的竞争, 而具有透明电极氧化铟锡的夹层式探测器则不存在这一问题。

关键词: 薄膜; 光电探测器; 脉冲激光沉积; 响应特性

中图分类号: O484.4⁺2; O482.7 **文献标识码:** A

The effect of photodetector configuration on the photoresponse properties

LIANG De-chun¹, LI Qing-shan^{1,2}, SUN Fang-hua¹, LI Xin-kun¹, ZONG Lei¹

(1. College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China; 2. Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract: In order to study the photoresponse properties of photodetectors with different configuration, the ultraviolet photodetectors were prepared on ZnO substrate by means of pulsed laser deposition (PLD) method. It could be seen that the ZnO film was heteromorphic and had good stoichiometric composition and uniform crystal size of 60nm, under the X-ray diffraction (XRD) pattern, the photoluminescence (PL) spectrum and the scanning electron microscopy (SEM), respectively. After comparing the photoresponse characteristics of the photodetectors with planar electrode configuration and sandwiched electrode configuration, a conclusion can be drawn that the photodetector configuration has a great effect on the response time. Considering the competition between response time and responsivity in planar electrode configuration photodetectors, the sandwiched electrode configuration photodetectors with transparent electrode are preferable.

Key words: thin film; photodetector; pulsed laser deposition; response characteristic

引言

近年来, ZnO 薄膜引起了世界各国的广泛重视, 它在光电设备中的应用得到了迅速发展, 已经研发出了光发射二极管和紫外光电探测器等^[1-2]。氧化锌是具有纤锌矿结构的直接宽带隙半导体材料, 室温带隙宽度约 3.37eV。它的激子束缚能(60meV)较其它半导体大, 可以提高光电探测灵敏度。迄今为止, 大多数光电探测设备采取平面叉指电极结构^[3,4], 各种紫外光电探测器的响应时间分布在几微秒到几千秒之间^[4-5]。研究表明, ZnO 基紫外探测器的光响应特性与氧化锌薄膜的结晶方向、晶粒大小、薄膜表面形态等有关^[6-7]。以往的研究主要集中于 ZnO 薄膜的自身特性, 而忽略了探测器结构

对探测特性的影响^[8]。要制备高性能的 MSM 型紫外光电探测器, 除了得到高质量的 ZnO 基材料外, 还与以下因素有关: 金属电极与半导体之间接触电阻的大小; 接触金属透过率的高低; 指宽和指间距的比例。由于氧化铟锡(indium tin oxides, ITO)具有高电导率、透明、吸收系数低等特点, 近年来, 被用于制备叉指电极。为了避开对金属透射率高的要求, 背光照也是一个不错的选择, 但是也带来其它诸如光刻对准、制造工艺等问题。

作者在玻璃衬底上制备了平面结构和夹层结构探测器, ZnO 膜在相同条件下生长。结果表明, 与平面结构探测器相比, 夹层结构探测器响应速度快, 响应度得到提高。

1 实验与测量

为便于比较, 样品 1、样品 2 为平面结构探测器, 样品 3 为夹层结构探测器, 结构示意图如图 1 所示。用电子束蒸发技术在玻璃衬底 3 上沉积 ITO 透明电

作者简介: 梁德春(1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事半导体发光材料的研究。

* 通讯联系人。E-mail: qsl@ytnu.edu.cn

收稿日期: 2007-12-04; 收到修改稿日期: 2008-01-05

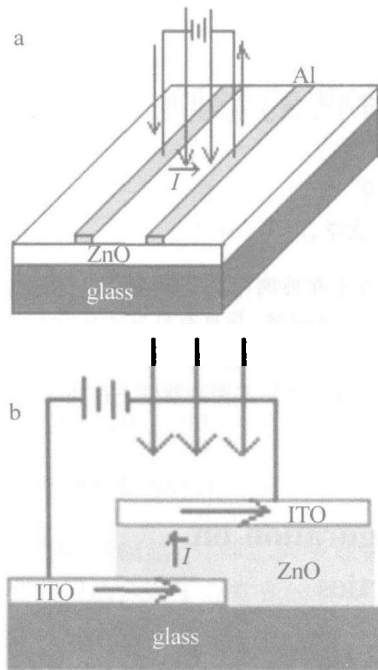


Fig. 1 Schematic diagrams for samples
a—samples 1 and 2 b—sample 3

极,将其与衬底 1、衬底 2 一并放入激光脉冲沉积 (pulsed laser deposition, PLD) 系统中沉积 ZnO 薄膜。在 PLD 系统中,采用德国 Tuilaser 公司生产的 Thin Film Star-20 型 KrF 准分子激光器熔融 ZnO 靶材(0.9999),激光波长 248nm,脉宽 20ns,激光能量密度约 $2\text{J}/\text{cm}^2$,工作频率 5Hz。系统的背底真空度为 10^{-5}Pa ,镀膜过程中,将高纯氧气(0.99999)通入反应室,气体压强保持为 10^{-2}Pa ,衬底温度控制在 400°C ,源基距 5cm。沉积 ZnO 膜后,用电子束蒸发技术在样品 1、样品 2 上沉积 Al 电极,并在 500°C 高温退火,电极间距分别为 0.2mm

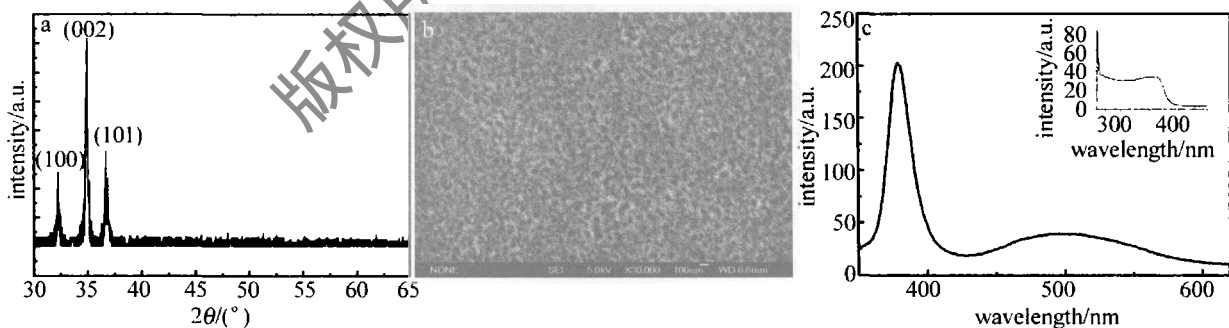


Fig. 3 a—XRD pattern b—surface SEM image c—PL spectrum of ZnO film

图 3b 为 ZnO 薄膜的扫描电镜照片。图中显示 ZnO 膜表面平整,颗粒均匀,尺寸大小约 60nm。用波长 $\lambda = 325\text{nm}$ 的 He-Ne 激光器作为激发光源,室温下 ZnO 膜的光源发光光谱示于图 3c。从图 3c 可见,光致发光光谱包括两个发光带,378nm 左右的带边 (near band edge, NBE) 发射带和位于 500nm 左右的深能级 (deep level, DL) 发射带。前者来自于自由激子发射和自由激子与光学声子复合发射;后者来自于 ZnO 膜的缺陷

和 0.05mm,在样品 3 上沉积 ITO 透明电极。最后,用银胶从 Al 电极和 ITO 电极引出导线制备光电探测器。探测器中电流方向示于图 1。

2 结果与分析

2.1 样品 I-V 特性

图 2 为样品 1、样品 2 在黑暗中的 I-V 特性曲线。

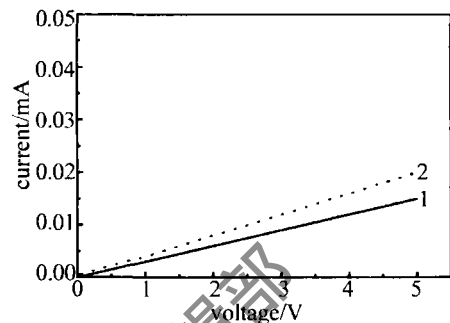


Fig. 2 The I-V curve for samples 1 and 2

图中所有 I-V 曲线都呈线性,说明 Al 电极与 ZnO 膜间形成了良好的欧姆接触。

2.2 ITO 顶部电极的透光率和方块电阻

样品 3 采用 ITO 作为顶部电极,ITO 具有较高的电导率。同时,ITO 具有高的透光率,保证入射光子透射到半导体材料上。衬底温度为 300°C 、氧压为 1.0Pa 时,ITO 的透光率较高,约 82%,方块电阻为 $150\Omega/\square \sim 160\Omega/\square$,厚度为 100nm。

2.3 ZnO 薄膜的 XRD 谱、扫描电镜图和 PL 谱

玻璃衬底上 ZnO 薄膜的 XRD 图示于图 3a。从图中可以看出(002)的强衍射峰和(100),(101)的弱衍射峰,这说明制备的 ZnO 薄膜具有(002)择优取向。

发射。NBE 发光强度远大于 DL 发光强度,说明 PLD 法制备的 ZnO 薄膜具有理想的化学配比。插图 为 ZnO 薄膜激发光谱,在 $360\text{nm} \sim 380\text{nm}$ 存在一个明显台阶,说明 ZnO 半导体禁带中缺陷能级少,载流子发生无辐射复合机率小。

2.4 不同结构探测器的光响应

图 4 中分别为样品 1、样品 2、样品 3 的光电流瞬态曲线。由图可见,光响应应包括上升和下降过程,这两

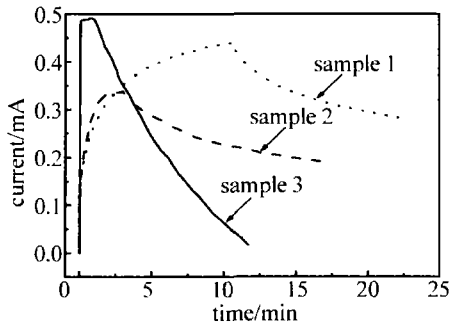


Fig. 4 The transient photocurrent

个过程均满足指数函数变化规律(样品3的响应时间小于测量设备的精度)。光照后,光电流迅速上升,光响应特性遵循指数函数 $\Delta\sigma = \Delta\sigma_s [1 - \exp(-t/\tau)]$ 规律,其中, $\Delta\sigma_s$ 为恒定光照下的定态光电导率; t 为光照时间; τ 为时间常数。样品1~样品3的时间常数分别为 $\tau = 68.4\text{s}$, $\tau = 16.6\text{s}$, $\tau < 1\text{ms}$; 撤掉光照,光电流下降,光响应特性遵循指数函数 $\Delta\sigma = \Delta\sigma_s \exp(-t/\tau)$ 规律,时间常数分别为 $\tau = 12.4\text{min}$, $\tau = 9.49\text{min}$, $\tau = 3.83\text{min}$ 。结果表明,上升时间缩短时,下降时间也相应缩短。样品2的响应时间比样品1有所缩短,但光电流值明显降低,样品3与样品1、样品2相比,响应速度大幅度提高,光电流增加,光电流与暗电流之比有所提高。样品1~样品3中 ZnO 的生长条件相同,薄膜具有相同的结构和性质,光响应特性具有如此大的差别,原因在于除 ZnO 薄膜本身特性外,还存在其它影响光响应特性的因素。

LI 认为:光照后,表面吸附的氧在空气中更容易达到平衡,光电流达到最大值所用时间较真空中所用时间短^[5]。LAW 等人报道^[9-10],撤掉光照后,空气中 ZnO 纳米结构的光电流下降时间远快于在真空中的下降过程,他们将其归因于空气中的水蒸气和氧气的作用。吸附的水蒸气在解吸过程中不但能捕获 ZnO 中的电子,也能捕获空穴,加快电子空穴的复合。同时,空气中的氧气也可以捕获电子,氧化薄膜中的 Zn 填隙,弥补氧空缺,进一步减小光电流下降时间。样品3上表面的透明 ITO 电极将 ZnO 薄膜与空气隔绝,减小了空气中水蒸气和氧的影响。图4中可见,与样品1,2的光响应特性相比,样品3的响应时间并没有延长,相反,响应时间明显缩短,可归因于探测器结构的影响。

2.5 探测器结构对光响应影响的原理分析

将电极两端引出的导线接上电源,受入射光激发产生的光生载流子在外加电场作用下,定向运动,达到电极形成电流后才能在外电路探测出来,由入射光转变为光电流所需要的时间称为响应时间。影响响应时间的因素有:由电容电阻引起的 RC 时间常数;耗尽层外面的载流子扩散时间;耗尽层中光生载流子从一个电极漂移到另一个电极所用时间,又称渡越时间。其

中,渡越时间起主要作用。渡越时间 $t_t = L/v_d$, 又 $|E| = |U|/L, v_d = \mu |E|$, 故 $t_t = L^2/\mu |U|$, 其中, v_d 是电子漂移速率; L 为电极间距; E 为电场强度矢量; U 为两电极间电压; μ 是电子迁移率。可见,电极间距越小,渡越时间越短,响应越快。样品1、样品2、样品3电极间距分别为 0.2mm , 0.05mm , $0.83\mu\text{m}$, 电极间距减小,响应速度相应提高。

对于探测器,除响应时间外,响应度也是一个重要参量。决定探测器响应度的主要因素是内量子效率和外量子效率,薄膜质量决定内量子效率,外量子效率与探测器结构相关。对于平面结构探测器,电极的阴影比例决定外量子效率,只有那些没被电极遮盖的部分才能接受光照,电极间距越小,外量子效率越低,响应度越小。在平面结构探测器中,电极间距引起响应时间和响应度之间的相互竞争,从图4a、图4b中可以得到相同的结论。为了解决这一问题,就要求接触金属电极具有高的透射率。SU 等人^[11]利用 ITO、金属 Ni、Au、Pt 作为电极,结果发现 ITO 的透射率最高,但是相对其它金属电极探测器,ITO 电极探测器响应速度相对较慢。他们认为这可能是由于光照下的光电导增益造成的,作者认为这也可能是由于 ITO 具有高的电导率和透射率,大量光子通过透明电极 ITO 入射到半导体层,使得半导体层中产生的大量光生电子不是在两电极最近邻边之间的传输,实际电极间距不是叉指间距 d , 而是有所增大,从而光响应时间相应延长。利用 ITO 制备夹层式探测器,则不存在这一问题。在夹层式探测器中,电极间距(即 ZnO 膜的厚度)小且容易控制,可以提高探测器响应速度。同时,由于 ITO 具有高的透射率,大部分光子透射到半导体层,外量子效率得到提高,解决了响应时间与响应度之间的竞争问题。

3 结论

研究了不同结构的 ZnO 基紫外探测器光响应特性。结果表明,除 ZnO 自身性质外,探测器结构也对光响应特性有重要影响。对平面电极探测器,工艺水平要求高,而且要综合考虑响应时间与响应度两个因素。具有 ITO 透明电极的夹层式结构探测器,工艺简单,电极间距小且容易控制,无须考虑响应时间与响应度之间的竞争,既可以缩短响应时间,也可以增强对入射光的吸收,提高响应度。

参考文献

- [1] YE Z Z, LU J G, ZHANG Y Z, et al. ZnO light-emitting diodes fabricated on Si substrates with homobuffer layers [J]. A P L, 2007, 91 (11): 113503/1-113503/3.

(下转第216页)

曲面重建的质量。本文中重点讨论的是引进灰度图像处理中改进的2维中值滤波算法对点云扫描线数据进行去噪处理。经实验证明,该方法速度明显得到改进,滤波也达到预期的效果。

参 考 文 献

- [1] LÜ Ch F, DU Zh Ch. Chassis positioning system based on the laser radar survey technology [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(6): 596-601 (in Chinese).
- [2] ZHONG Zh Q, ZHOU J, SUN D S, *et al.* The research of error analysis and simulation of aerosol detected by MPL [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(3): 232-235 (in Chinese).
- [3] SUN Zh B, GUO J J, LIU Zh Sh, *et al.* Visibility measurement over the horizontal path by means of micro-pulsed lidar [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 200-202 (in Chinese).
- [4] JIA Y H. Automatic on-line load measurement system for mine truck based on the laser-radar survey technology [J]. *Mining Research and Development*, 2006, 26(2): 62-64 (in Chinese).
- [5] HE Y H, RONG H. Research on the processing of non-contacted three-dimensional scanning measurement data [J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology*, 2006, 20(5): 30-35 (in Chinese).
- [6] LIU J Q, GAO J M, LI Y, *et al.* Research on cloud data's pretreatment technology based on reverse engineering [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2005(7): 73-75 (in Chinese).
- [7] HUANG M C, TAI C C. The pre-processing of data points for curve fitting in reverse engineering [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2000, 16(9): 635-642.
- [8] ZHANG M Y, WANG H L, ZHENG J H, *et al.* Application of image noise removing based on improved median filtering [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2006, 26(8): 45-47 (in Chinese).
- [9] DONG M X, ZHENG K P. A random filter algorithm for reducing noise error of point cloud data [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(2): 245-248 (in Chinese).
- [10] KOLTE P, SMITH R, SU W. A fast median filter using Altivec [C]//*IEEE International Conference on Computer Design (ICCD)*. Austin, TX, USA: IEEE, 1999: 384-391.
- [11] JIANG B, HUANG W. Adaptive threshold median filter for multiple-impulse noise [J]. *Journal of Electronic Science Technology of China*, 2007, 5(1): 70-74.
- [12] XIONG Ch Y, HOU J H, GAO Zh R, *et al.* Fast algorithm of 3-D median filter for medical image despeckling [J]. *Proc SPIE*, 2007, 6789: 1-5.
- [13] YANG H. Research on thresholding methods for image segmentation [J]. *Journal of Liaoning University*, 2006, 33(2): 135-137 (in Chinese).
- (上接第161页)
- [2] EMANETOGLU N W, ZHU J, CHEN Y, *et al.* Surface acoustic wave ultraviolet photodetectors using epitaxial ZnO multilayers grown on *r*-plane sapphire [J]. *A P L*, 2004, 85(17): 3702-3704.
- [3] LU C Y, CHANG S J, CHANG S P, *et al.* Ultraviolet photodetectors with ZnO nanowires prepared on ZnO:Ga/glass templates [J]. *A P L*, 2006, 89(15): 153101/1-153101/3.
- [4] HEO Y W, KANG B S, TIEN L C, *et al.* UV photoresponse of single ZnO nanowires [J]. *Appl Phys*, 2005, A80(3): 497-499.
- [5] LI Q H, GAO T, WANG Y G, *et al.* Adsorption and desorption of oxygen probed from ZnO nanowire films by photocurrent measurements [J]. *A P L*, 2005, 86(12): 123117/1-123117/3.
- [6] GHOSH R, MALLIK B, BASAK D, *et al.* Dependence of photoconductivity on the crystallite orientations and porosity of polycrystalline ZnO films [J]. *Appl Phys*, 2005, A81(6): 1281-1284.
- [7] YADAV H K, SREENIVAS K, GUPTA V, *et al.* Enhanced response from metal/ZnO bilayer ultraviolet photodetector [J]. *A P L*, 2007, 90(12): 172113/1-172113/3.
- [8] YI H Y, LÜ B D, PENG Y, *et al.* Influence of detector's aperture on metrical precision of ring-down cavity [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(3): 231-233 (in Chinese).
- [9] LAW J B K, THONG J T L. Simple fabrication of a ZnO nanowire photodetector with a fast photoresponse time [J]. *A P L*, 2006, 88(13): 133114/1-133114/3.
- [10] AHN S E, JI H J, KIM K, *et al.* Origin of the slow photoresponse in an individual sol-gel synthesized ZnO nanowire [J]. *A P L*, 2007, 90(15): 153106/1-153106/3.
- [11] SU Y K, CHANG S J, CHEN C H, *et al.* GaN metal-semiconductor-metal ultraviolet sensors with various contact electrodes [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2002, 2(4): 366-371.