

Ultraviolet Photodetector Based on ZnO Films *

WU Yue-bo^{1,2}, HUANG Bo^{2,3}, WU Sun-tao^{2*}

1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China;
2. Pen-Tung Sah MEMS Research Center, Xiamen University, Fujian Xiamen 361005, China;
3. Department of Physics, Xiamen University, Fujian Xiamen 361005, China

Abstract: The ZnO films were deposited on SiO₂/n-Si by RF magnetron sputtering. ZnO Schottky diodes and the interdigital metal-semiconductor-metal (MSM) ultraviolet (UV) photodetectors were fabricated by using Ag as Schottky contact metal. The ZnO films have a preferential c-axis orientation and smooth surface. The films exhibit a high transmittance in visible region and have sharp fundamental absorption edge at about 370 nm. The Schottky diodes exhibit the distinct rectifying characteristics. The barrier height of Ag-ZnO Schottky contacts is about 0.65 eV. *I-V* characteristics of the MSM photodetector indicates that the leakage current is 33 nA at a bias of 5V. The photoresponsivity of the detector is high in the ultraviolet range and has a maximum value near by 365 nm.

Key words: ZnO film; magnetron sputtering; schottky diode; UV photodetector

EEACC: 7230C

ZnO 薄膜紫外探测器的研制*

吴跃波^{1,2}, 黄波^{2,3}, 吴孙桃^{2*}

1. 厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学萨本栋微机电研究中心, 福建 厦门 361005;
3. 厦门大学物理系, 福建 厦门 361005

摘要: 利用射频磁控溅射技术在 SiO₂/n-Si 衬底上制备了 ZnO 薄膜, 并在薄膜上制作了 Ag-ZnO 肖特基二极管和 Ag-ZnO-Ag 肖特基 MSM 叉指结构的紫外探测器。所制备的 ZnO 薄膜具有良好的 c 轴择优取向, 表面平整, 在可见光范围具有较高的透射率, 吸收边在 370 nm 附近; 所制作的肖特基二极管显示了良好的整流特性, 有效势垒高度约为 0.65 eV; 所制作的 MSM 紫外探测器在 5 V 偏压下漏电流为 3.3×10^{-8} A, 在紫外波段有较高的响应度, 光响应度峰值在 365 nm 附近。

关键词: ZnO 薄膜; 磁控溅射; 肖特基二极管; 紫外探测器

中图分类号: TN364.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)07-1128-04

ZnO 是一种宽禁带直接带隙的 II-VI 族半导体, 具有优良的综合性能, 近年来在国际上已成为半导体光电材料的研究热点^[1]。ZnO 的禁带宽度在室温下为 3.3 eV, 激子束缚能高为 60 meV, 原材料丰富, 价格低廉, ZnO 薄膜容易制备, 方法很多, 主要有磁控溅射法^[2-4]、金属有机物化学气相沉积法^[5]、脉冲激光沉积法^[6]、喷雾热分解法^[7]、分子束外延法^[8]及溶胶-凝胶法^[9]等。其中磁控溅射法制备 ZnO 薄膜具有较高的沉积速率、低的衬底温度和

良好的衬底粘附性等优点而被广泛的应用。

紫外探测器在军事、生物、医疗等众多领域有着广泛的应用。由于 ZnO 具有良好的抗高能射线辐射能力, 相比其它半导体例如 SiC、GaN 在制作紫外探测器方面 ZnO 有着独特的优势。目前, 有关 ZnO 基紫外探测器的研制已有很多报道^[10-16], 其中很多是利用 PLD、MOCVD、MBE 方法在蓝宝石衬底上制备 ZnO 薄膜, 然后在薄膜上研制紫外探测器, 所用的设备和衬底昂贵。本实验采用简便的射频磁控

基金项目: 国家科技部 973 计划课题资助(2001CB610506, 2002CB211807); 福建省科技重点项目资助(2005H043); 厦门大学科技项目资助(XMKJCX200510125)

收稿日期: 2007-12-17; 修改日期: 2008-03-03

溅射法在 $\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ 衬底上制备 ZnO 薄膜, 然后在薄膜上制作 Ag-ZnO 肖特基二极管和 Ag-ZnO-Ag 肖特基 MSM 结构的紫外探测器, 并对薄膜和器件的特性进行了测试分析。

1 实验

本实验用 JC500-3/D 射频磁控溅射机在 $\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ 衬底上制备 ZnO 薄膜, 靶材采用 ZnO (纯度 99.99%) 陶瓷靶, 在溅射过程中, 溅射腔气压保持为 1 Pa, 衬底温度为 250°C , 靶与衬底间距离为 8 cm, 溅射气体为氩氧流量比为 2:3 的混合气体, 溅射功率为 75 W, 溅射时间为 1 h。把制备好的样品放入 N_2 中退火 1 h, 退火温度为 700°C 。在退火后的薄膜上制作方框结构的 Ag-ZnO 肖特基二极管, 其制作方法是先在薄膜上光刻出 $250\ \mu\text{m} \times 270\ \mu\text{m}$ 的方框, 然后在方框外面溅射一层 300 nm 的 Al 形成欧姆接触, 再在方框里面光刻出 $230\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ 的方框, 依次溅射 200 nm 的 Ag 和 100 nm 的 Au, Ag 和 ZnO 形成肖特基接触; Ag-ZnO-Ag 肖特基 MSM 叉指结构的紫外探测器制作方法是先在退火后的薄膜上光刻出有源窗口及叉指结构, 再依次溅射 200 nm 厚的银做接触电极和 100 nm 厚的金防止银被氧化, 最后剥离形成 Ag-ZnO-Ag 的 MSM 结构。图 1 是制作的探测器的俯视图, 叉指长 $250\ \mu\text{m}$, 宽 $6\ \mu\text{m}$, 叉指间距为 $6\ \mu\text{m}$ 。



图 1 探测器俯视图

用 X'Pert PRO X 射线衍射仪对所制备的 ZnO 薄膜的晶体结构进行分析; 用 LEO1530 场发射扫描电镜对薄膜表面形貌及横截面进行观测; 用 Varian Cary-300 分光光度计测量薄膜在 200~800 nm 间的透射谱; 用 Keithley 4200-SCS 半导体参数分析仪测量 Ag-ZnO 肖特基二极管及 Ag-ZnO-Ag 肖特基 MSM 紫外探测器的 I-V 特性; MSM 紫外探测器的光谱响应是由自制的一套光学系统进行测量的, 由氙灯和单色仪结合起来提供光源, 用 Si 紫外增强标准探测器进行光强校准。

2 实验结果与讨论

2.1 ZnO 薄膜的测试分析

图 2 是制备出来的 ZnO 薄膜的 X 射线衍射谱图。从谱图中可以看出, 样品出现了强的 (002) 和微弱的 (103)、(004) 衍射峰, (002) 峰的峰位在 34.49°

左右, 其强度远远超过 (103) 和 (004) 峰的强度, 这表明所制备的 ZnO 薄膜有良好的 c 轴择优取向^[2]。

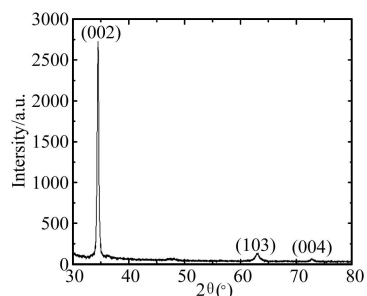


图 2 ZnO 薄膜 X 射线衍射谱

图 3 是 ZnO 薄膜的表面和截面的扫描电镜图, 从表面图可以看出薄膜的颗粒大小均匀, 结构致密; 从截面图看 ZnO 是呈柱状沿着垂直衬底的方向生长的, 表面平整。表明所制备的 ZnO 薄膜有较好的质量。

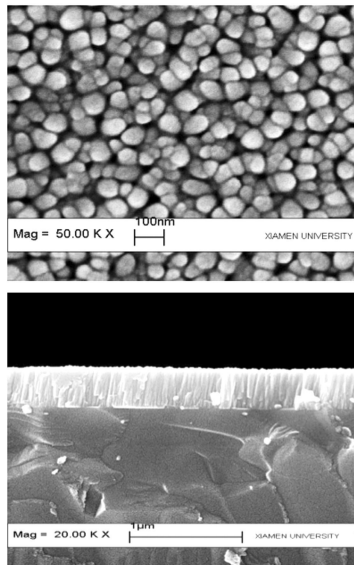


图 3 ZnO 薄膜表面和截面扫描电镜图

图 4 是在石英玻璃衬底上溅射制备的 ZnO 薄膜的透射谱图, 其制备条件与在 $\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ 衬底上制备条件完全一样。可以看出 ZnO 薄膜在可见光范围内有着较高的透射率, 平均透射率在 85% 左右, 而在 370 nm 附近有吸收边, 波长小于 370 nm 的紫外光基本上完全被吸收。

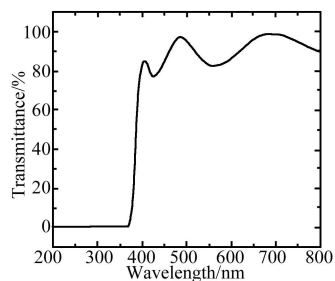


图 4 ZnO 薄膜透射谱

2.2 Ag-ZnO肖特基二极管

图5是Ag-ZnO肖特基二极管的I-V曲线,可以看出所制备的肖特基二极管具有良好的整流特性。在5V反向偏压下的电流约为μA量级,根据热发射电子理论,可用下式拟合二极管的正向电流特性:

$$I = I_s \{ \exp[\frac{q(V - IR_s)}{nkT}] - 1 \} \tag{1}$$

其中:q是电子电荷,V是二极管的正向电压,Rs是二极管的串联电阻,n是二极管的理想因子,T是绝对温度,k是玻尔兹曼常数,I_s是饱和电流,且I_s = SA* T² exp(-qΦ_B/kT),S是结面积,Φ_B是二极管的有效势垒高度,A*是有效里查逊常数,理论值A* = 32 A/cm² · K^{2/17}。二极管的有效势垒高度可以通过拟合二极管的正向I-V曲线得到,通过拟合得到的有效势垒高度约为0.65 eV,这与文献[18]给出的势垒高度相接近。

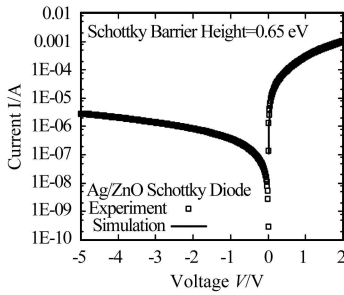


图5 肖特基二极管的I-V曲线

2.3 Ag-ZnO-Ag肖特基MSM紫外探测器

图6是所制作的Ag-ZnO-Ag肖特基MSM紫外探测器在光照和无光照下的I-V特性。从图中可以看出,Ag与ZnO之间形成了良好的肖特基接触。在5V偏压下,器件的漏电流和光电流分别为33 nA和1.7 μA。光电流和漏电流的比超过一个数量级,漏电流与文献[14]所研制的MSM(AI-ZnO-AI)光电导型紫外探测器相比小得多,这说明Ag-ZnO-Ag肖特基MSM结构能更好的抑制器件的漏电流。

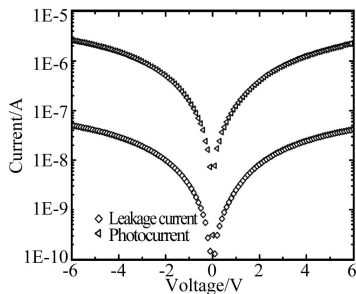


图6 探测器的I-V曲线

图7是MSM紫外探测器在5V偏压下的光谱响应图,器件在365nm附近有个光响应度峰

值^[13],这和ZnO的禁带宽度基本吻合。从峰值到400nm段随着波长的增加器件光响应度逐渐下降,在400nm处的响应很弱。从趋势看器件的紫外响应度比长波区的响应高得多,这说明所制作的探测器在紫外波段具有较高的响应度。从图中还可以看出器件光响应度在峰值前的短波段也有所下降,主要是由于短波段的吸收系数较大,器件的光生电子空穴对主要集中在器件的表面,同时由于表面的缺陷态较多,使得表面的复合增加,有效的光生电子空穴对减少,导致光响应度相应下降^[12]。

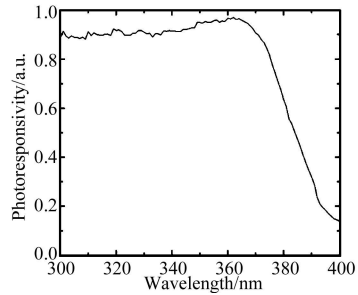


图7 探测器光谱响应曲线

3 结论

我们采用射频磁控溅射技术在SiO₂/n-Si衬底上制备了具有c轴择优取向的ZnO薄膜,所制备的薄膜表面平整,在可见光有较高的透射率,对波长小于370nm的紫外光基本完全吸收。在薄膜上制作了Ag-ZnO肖特基二极管,其有效势垒高度约为0.65 eV;并制作了以Ag为肖特基接触电极MSM叉指结构的紫外探测器,在5V偏压下的器件漏电流为33 nA,在紫外波段有较高的响应度,光响应度峰值在365nm附近。

参考文献:

- [1] Lzgr, Alivov Ya I, Liu C, et al. A Comprehensive Review of ZnO Materials and Devices[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(4): 041301-103.
- [2] Guill n C, Herrero J. High Conductivity and Transparent ZnO: Al Films Prepared at Low Temperature by DC and MF Magnetron Sputtering[J]. Thin Solid Films, 2006, 515(2): 640-643.
- [3] Li Zheng-wei, Gao W. ZnO Thin Films with DC and RF Reactive Sputtering[J]. Materials Letters, 2004, 58(7-8): 1363-1370.
- [4] Bai S N, Tseng T Y. Effect of Alumina Doping on Structural, Electrical, and Optical Properties of Sputtered ZnO Thin Films [J]. Thin Solid Films, 2006, 515(3): 872-875.
- [5] Kim Sang-Woo, Fujita Shizuo, Fujita Shigeo. Self-Organized ZnO Quantum Dots on SiO₂/Si Substrates by Metalorganic Chemical Vapor Deposition [J]. Applied Physics Letters,

- 2002, 81(26): 5036-5038.
- [6] Liu Yao-dong, Lian Jian-she. Optical and Electrical Properties of Aluminum-Doped ZnO Thin Films Grown by Pulsed Laser Deposition[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(7): 3727-3730.
- [7] Rozati S M, Akesteh Sh. Characterization of ZnO: Al Thin Films Obtained by Spray Pyrolysis Technique[J]. Materials Characterization, 2007, 58(4): 319-322.
- [8] Liang Hong-wei, Yang Jian-feng, Lu You-ming, et al. Growth of Zinc Oxide Single Crystal Thin Films by Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxy[J]. Chinese Journal of Luminescence, 25(2): 147-150.
- [9] Xu Z Q, Deng H, Li Y, et al. Characteristics of Al-Doped c-Axis Orientation ZnO Thin Films Prepared by the Sol-Gel Method[J]. Materials Research Bulletin, 2006, 41(2): 354-358.
- [10] 叶志镇, 张银珠, 陈汉鸿等. ZnO 光电导紫外探测器的制备和特性研究[J]. 电子学报, 2003, 31(11): 1605-1607.
- [11] 王丽玉, 谢家纯, 林碧霞等. n-ZnO/p-Si 异质结 UV 增强型光电探测器的研究[J]. 电子元件与器件, 2004, 23(1): 42-44.
- [12] Liang S, Sheng H, Liu Y, et al. ZnO Schottky Ultraviolet Photodetectors[J]. Journal of Crystal Growth, 2001, 225(2-4): 110-113.
- [13] Liu K W, Ma J G, Zhang J Y, et al. Ultraviolet Photoconductive Detector with High Visible Rejection and Fast Photoresponse Based on ZnO Thin Film[J]. Solid State Electronics, 2007, 51(5): 757-761.
- [14] Zheng X G, Li Q Sh, Zhao J P, et al. Photoconductive Ultraviolet Detectors Based on ZnO Films[J]. Applied Surface Science, 2006, 253(4): 2264-2267.
- [15] Xu Zi-qiang, Deng Hong, Xie Juan, et al. Ultraviolet Photoconductive Detector Based on Al Doped ZnO Films Prepared by Sol-Gel Method[J]. Applied Surface Science, 2006, 253(2): 476-479.
- [16] Oh D C, Suzuki T, Hanada T, et al. Photoresponsivity of ZnO Schottky Barrier Diodes[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2006, 24(3): 1595-1598.
- [17] Lin T K, Chang S J, Su Y K, et al. ZnO MSM Photodetectors with Ru Contact Electrodes[J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 281(2-4): 513-517.
- [18] Polyakov A Y, Smirnov N B, Kozhukhova E A, et al. Electrical Characteristics of Au and Ag Schottky Contacts on n-ZnO[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(8): 1575-1577.



吴跃波(1980), 男, 厦门大学机电系博士, 主要从事新型材料及 MEMS 器件的研究, wbyj1980@tom.com



吴孙桃(1947), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事微纳电子技术、MEMS 器件的研究, wst@xmu.edu.cn