

室温生长 ZnO 薄膜晶体管的紫外响应特性*

吴萍¹⁾ 张杰¹⁾ 李喜峰²⁾ 陈凌翔¹⁾ 汪雷¹⁾ 吕建国^{1)†}

1) (浙江大学材料科学与工程学系, 硅材料国家重点实验室, 杭州 310027)

2) (上海大学, 新型显示技术及应用集成教育部重点实验室, 上海 200072)

(2012年6月18日收到; 2012年8月11日收到修改稿)

在室温下采用射频磁控溅射法制备了以 ZnO 薄膜为沟道层的薄膜晶体管 (TFTs). 研究表明 ZnO 薄膜在紫外区具有较高的吸收率, 并且 ZnO-TFTs 对紫外光照射较为敏感. 因此, 进一步深入研究了 ZnO-TFTs 紫外光照下的输出和转移特性. 结果表明, 紫外光照将引起较为明显的光响应电流, 且经过光照的器件在光源移除 7 天后, ZnO 沟道层中仍能观察到残余电导现象, 其原因可以归结为紫外光辐射在 ZnO 沟道层中引入了一定数量的氧空位施主态缺陷.

关键词: ZnO, 薄膜晶体管, 紫外响应, 残余电导

PACS: 81.05.Dz, 81.15.Cd, 85.30.Tv, 85.60.Gz

DOI: 10.7498/aps.62.018101

1 引言

紫外光电探测器由于其在经济和军事领域的潜在应用而备受关注^[1-3]. 以往紫外光电探测器主要采用 Si 基二极管制备, 但是 Si 基探测器响应速度较慢, 因此选取新材料取代 Si 制备高效固态紫外探测器成为一项重要研究课题. 目前研究主要集中在一些直接带隙宽禁带半导体材料如 GaN^[4-7], ZnSe^[8,9], ZnO^[10-20] 上.

在所有的宽禁带半导体材料中, ZnO 由于在室温下具有较大的禁带宽度 (3.37 eV), 且 ZnO 在室温条件就能沉积结晶质量好的薄膜, 这些有利条件都为制备高效固态紫外探测器提供了可能. 此外, ZnO 紫外光电器件具有较多的结构, 如光电二极管, 肖特基二极管和 p-n 结二极管^[10,12-20], 为其实际应用提供了方便. 近年来, Bae 等^[13] 研究了 SiO₂/Si 衬底上的 ZnO 薄膜晶体管 (TFTs) 的光电探测性能, 其结果验证了以 ZnO-TFTs 作为紫外探测器的可能, 对于实际应用具有重大意义. 虽然大量的研究表明室温下可制备出高性能的 ZnO-TFTs, 但是关于 ZnO-TFTs 紫外光响应特性的研究仍非常有限.

本文研究了室温下制备的底栅共平面型结构

透明 ZnO-TFTs 的紫外光响应特性, 以期能更好地了解紫外光照对 ZnO-TFTs 的影响, 以便于其实际运用.

2 实验

我们制备了底栅共面型 ZnO-TFTs, 这种器件结构在我们之前的工作中有过报道^[21]. 图 1 为 ZnO-TFTs 器件的实物图 (俯视). 试验采用普通玻璃作为衬底, 通过磁控溅射沉积一层 150 nm 金属 Cr 作为底栅极, 接着 150 nm 的 SiN_x 栅极绝缘层采用等离子体增强化学汽相沉积方法沉积, 然后溅射一层 100 nm ITO 或金属 Cr 作为源漏电极, 所有电极图形都是通过光刻和湿化学刻蚀方法获得, TFT 器件沟道的宽度和长度分别为 100 和 100 μm. 100 nm 的 ZnO 沟道层通过掩膜采用射频 (13.56 MHz) 磁控溅射在室温下沉积, 靶材为高纯 ZnO 陶瓷靶 (99.99%), 靶材和衬底的距离为 6 cm, 溅射功率为 5.1 W/cm², 溅射在纯 Ar 的气氛中进行, 溅射压强为 1 Pa, 溅射完毕衬底温度升高 5 °C—7 °C.

ZnO 薄膜的晶体结构和形貌特性采用 X 射线衍射 (XRD, D/max-RA 型), 原子力显微镜 (AFM, SPI3800N) 和场发射扫描电子显微镜 (Hi-

* 国家自然科学基金 (批准号: 51002131) 和上海大学新型显示技术及应用集成教育部重点实验室 (批准号: P201005) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lujianguo@zju.edu.cn

tachi S4800 型) 进行测试. 采用分光光度计 (Shimadzu UV-vis 3600 型) 测量薄膜的透射率和半导体参数分析仪 (Agilent E5270B 型) 测量 ZnO-TFTs 的性能. 紫外光照采用单色 254 nm 光源, 其能量密度与光照射距离的关系由 Si 紫外光探测器测量.

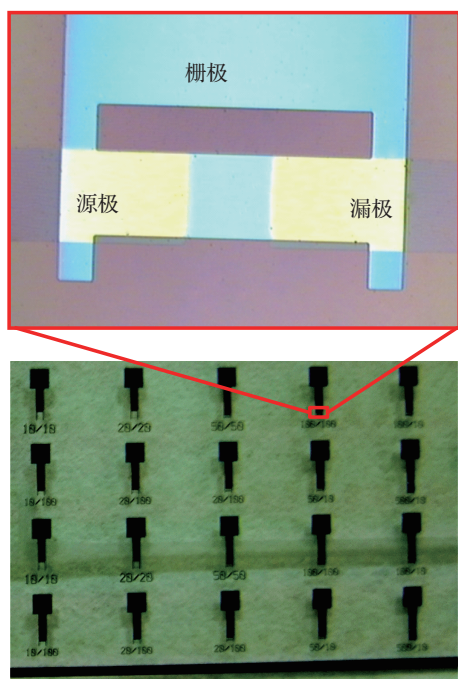


图 1 ZnO 薄膜晶体管实物图及其沟道处的放大光学显微图片

3 结果与讨论

3.1 ZnO 薄膜的特性

室温下沉积 ZnO 薄膜的 XRD 结果如图 2 所示, 其中插图为该薄膜的原子力显微 AFM 形貌. 从图中可以看出 34.2° 处具有明显的峰值, 这与 ZnO 的 (002) 晶面峰位相同, 表明了所沉积 ZnO 薄膜具有 c 轴择优取向, 图中 23° 附近的较弱的峰为玻璃衬底的信号峰. AFM 结果显示薄膜的晶粒尺寸和平均晶粒粗糙度分别为 16 和 1.5 nm. 扫描电镜图谱 (该图未在文中给出) 观察到的 ZnO 薄膜的微观形貌与 AFM 所得结果基本一致. 从以上结果可知, ZnO 薄膜由六角密排的晶粒有序在衬底上排列而成, 并没有明显的空洞和缺陷存在.

图 3 为 ZnO 薄膜的紫外可见光透射率图谱. ZnO 薄膜在可见光范围内的平均透射率超过 85%. 根据 Tauc 方程, 以 $(ah\nu)^2$ 对 $h\nu$ 做图 (如图 3 中插图) 可得薄膜的光学禁带宽度为 3.25 eV. 此外, 由图可知 ZnO 薄膜在波长为 365 nm 时仍有 34% 的透射

率, 表明此时紫外光并没有完全被薄膜吸收, 可能是由于薄膜较薄 (100 nm) 的原因.

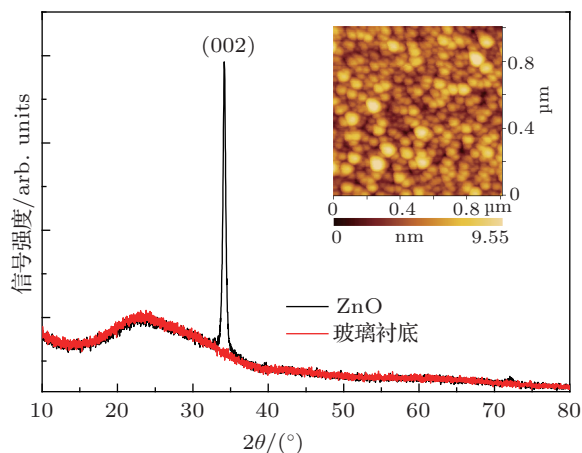


图 2 玻璃衬底及其衬底上室温生长 ZnO 薄膜的 XRD 图谱, 插图为 ZnO 薄膜的 AFM 图谱

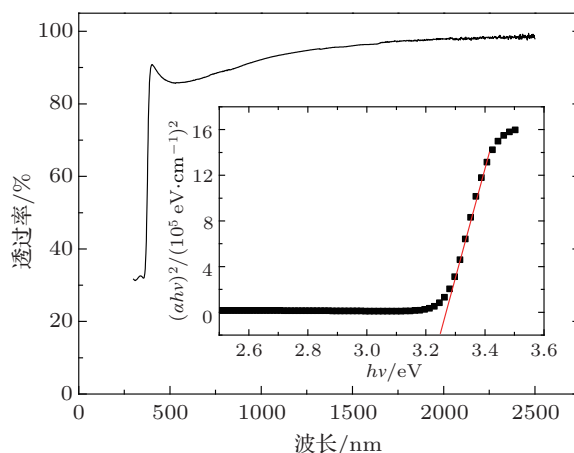


图 3 ZnO 薄膜在 300—2500 nm 波长内的透射图谱, 插图为 $(ah\nu)^2-h\nu$ 曲线, 且从插图中红线的截距可得薄膜的光学禁带宽度为 3.25 eV

3.2 ZnO-TFTs 的紫外光响应

图 4 为 ZnO-TFTs 在没有光照射和 254 nm (能量密度为 $8 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) 紫外光照射下的输出特性曲线 ($I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$). 在栅极电压为 40 V, 没有光照的条件下, ZnO-TFTs 的输出特性曲线有明显的夹断点和电流饱和特性, 且此时的饱和电流为 $1.3 \mu\text{A}$. 而在 254 nm 紫外光照射下饱和电流增加到 $7 \mu\text{A}$, 为前者的 6 倍, 此饱和电流的增加是由于紫外光照射下在 ZnO 沟道层中引入载流子 (电子和空穴) 所致. 此外, 在紫外光照下, ZnO-TFTs 器件的电流的饱和特性有明显的改变, 其输出特性曲线与没有光照条

件下不太一样, 没有完整的电流饱和区.

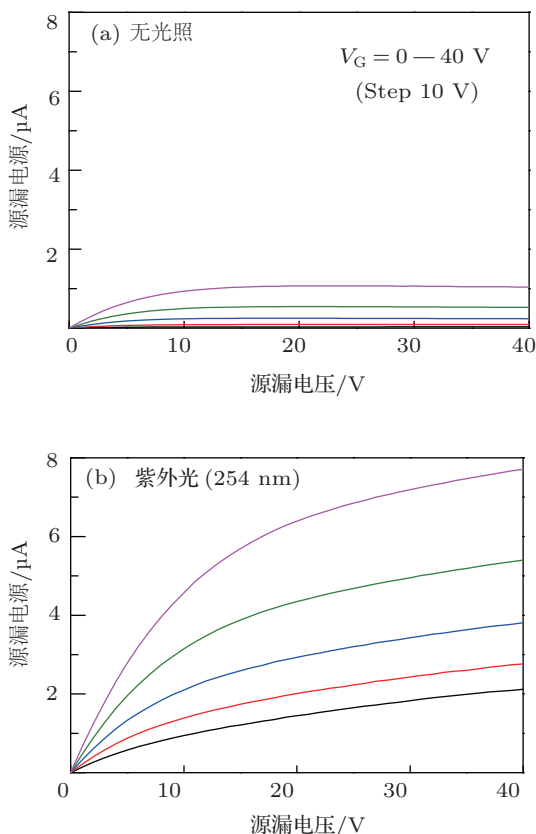


图4 (a) 无光照和 (b) 在 254 nm 紫外光照下的 ZnO 薄膜晶体管的输出特性曲线

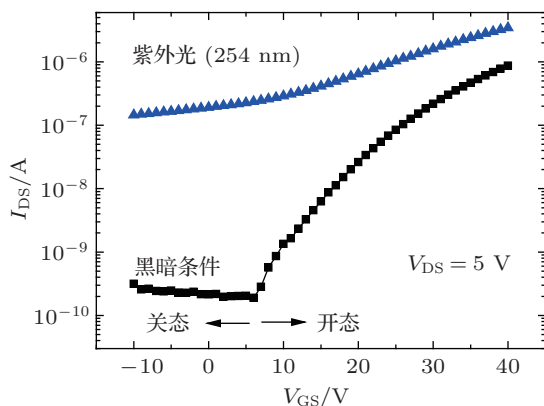


图5 无光照和紫外光照条件下 V_{DS} 为 5 V 时 ZnO 薄膜晶体管的转移特性曲线

图 5 为在漏极电压为 5 V 时测得的 ZnO-TFTs 器件的转移特性曲线 ($I_{DS}-V_{GS}$), 通过该曲线可进一步研究 ZnO-TFTs 器件的紫外光响应特性. 无光照时的 ZnO-TFTs 的电子迁移率为 $0.3 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$, 开关比为 10^3 . 而紫外光照射下, ZnO-TFTs 的关态电流明显增强, 且电流值比无光照时增加了近 3 个数量级, 这是由于高能量的紫外光能有效激发 ZnO

沟道层中载流子的产生. 与关态电流不同的是, 紫外光照对开态电流仅有较小的影响, 这是由于开态时栅电压诱导产生的载流子浓度远大于光生载流子浓度.

图 6 为 ZnO-TFTs 器件在光照之前以及移除紫外光在黑暗条件下保存 7 天后的输出特性曲线 ($I_{DS}-V_{DS}$). 相较于光照前, 器件经光照后放置 7 天, 在零栅压下仍然具有较大的源漏电流 (I_{DS}), 该结果表明 ZnO 沟道层电阻率减小了. 在紫外光移除 7 天后, 器件的关态电流仍然不能恢复到原始状态, 说明器件中残留了一部分电导, 且该残余电导对开态电流亦有一定影响, 因为光照后器件在相同的栅压下具有更大的 I_{DS} . 这种光照后的残余电导可能与 ZnO 沟道层中的氧空位施主缺陷的形成有关.

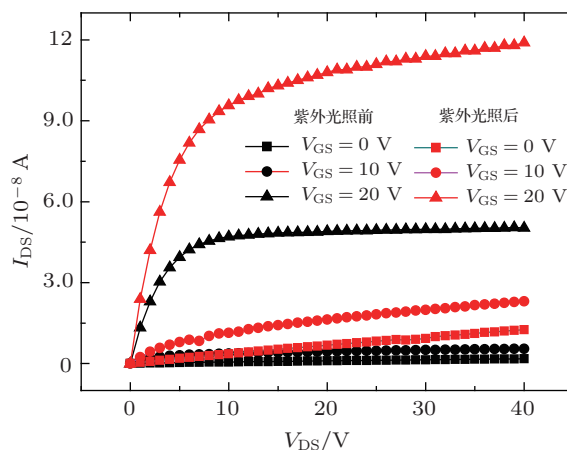


图6 ZnO 薄膜晶体管在光照前及移除 254 nm 紫外光在黑暗条件下保存 7 天后的输出特性曲线

理论研究表明, 未掺杂的 ZnO 中存在大量的氧空位缺陷^[22]. 在 ZnO 中, 中性的氧空位 (V_O^0) 会在价带顶附近形成大量的深能级态, 紫外光照能激发这些中性氧空位产生带有电荷的氧空位 (V_O^{2+})^[22-24]. 而在紫外光照射下, 由于其光子能量大于 ZnO 的禁带宽度, ZnO 沟道层中的电子从价带 (VB) 激发进入导带 (CB), 并在价带中形成自由空穴. 因此, 紫外光照后器件的关态电流增加了几个数量级. 而对于开态电流却只有较小的增加, 其原因在于栅电压诱导的载流子浓度远大于光生载流子. 此外, 我们还观察到, 关态电流即使是移除紫外光在黑暗条件下保存 7 天后仍不能恢复到原始状态. 这种残余电导可能是光照时在 ZnO 沟道层中形成了一些稳定的氧空位缺陷 (V_O^{2+}) 造成的. 从另一方面来说, 残余电导对开态电流几乎没有影响, 这是由于开态电流本身比残余电导引入的电流大几个数量级的原因.

4 结论

我们在室温下制备了底栅共平面结构的 ZnO-TFTs, 器件未经过任何后续热处理. 研究表明, ZnO-TFTs 具有明显的紫外光响应特性, 紫外光照使器件输出特性曲线的饱和电流增加了数倍, 同时也使转移特性的关态电流提高了 3 个数量级. 由于开态

时栅电压诱导产生的载流子浓度远大于光生载流子浓度, 紫外光照对开态电流影响较小, 所以没有光照和紫外光照下器件开关态电流比相差极大. 这些明显的变化对高灵敏紫外探测都是十分有利的. 但是室温制备 ZnO-TFTs 用于紫外探测也存在一些不足, 因为紫外光照可以激活薄膜中的氧空位施主缺陷, 从而导致 ZnO 沟道层的残余电导.

- [1] Sandvik P, Mi K, Shahedipour F, McClintock R, Yasan A, Kung P, Razeghi M 2001 *J. Cryst. Growth* **231** 366
- [2] Tut T, Yelboga T, Ulker E, Ozbay E 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 103502
- [3] Liao M Y, Koide Y, Alvarez J 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 123507
- [4] Chiou Y Z 2005 *J. Electrochem. Soc.* **152** G639
- [5] Zhou Y, Ahyi C, Tin C C, Williams J, Park M, Kim D J, Cheng A J, Wang D, Hanser A, Preble E A, Williams N M, Evans K 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 121118
- [6] Zhao D G, Zhou M, Zuo S H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5517 (in Chinese) [赵德刚, 周梅, 左淑华, 2007 物理学报 **56** 5517]
- [7] Zhou M, Zhao D G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7260 (in Chinese) [周梅, 赵德刚 2009 物理学报 **58** 7260]
- [8] Lin T K, Chang S J, Su Y K, Chiou Y Z, Wang C K, Chang C M, Huang B R 2005 *IEEE T. Electron. Dev.* **52** 121
- [9] Chang S J, Lin T K, Su Y K, Chiou Y Z, Wang C K, Chang S P, Chang C M, Tang J J, Huang B R 2006 *Mat. Sci. Eng. B Solid.* **127** 164
- [10] 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]
- [11] Yuan Z, Gao H, Xu L L, Chen T T, Lang Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 057201 (in Chinese) [袁泽, 高红, 徐玲玲, 陈婷婷, 郎颖 2012 物理学报 **61** 057201]
- [12] Young S J, Ji L W, Chang S J, Du X L 2007 *J. Electrochem. Soc.* **154** H26
- [13] Bae H S, Choi C M, Kim J H, Im S 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 076104
- [14] Liu Y, Gorla C R, Liang S, Emanetoglu N, Lu Y, Shen H, Wraback M 2000 *J. Electron. Mater.* **29** 69
- [15] Liang S, Sheng H, Liu Y, Huo Z, Lu Y, Shen H 2001 *J. Cryst. Growth* **225** 110
- [16] Jin Y Z, Wang J P, Sun B Q, Blakesley J C, Greenham N C 2008 *Nano Lett.* **8** 1649
- [17] Jandow N N, Ibrahim K, Yam F K, Abu Hassan H, Thahab S M, Hamad O S 2010 *Optoelectron Adv. Mat.* **4** 726
- [18] Ohta H, Hirano M, Nakahara K, Maruta H, Tanabe T, Kamiya M, Kamiya T, Hosono H 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 1029
- [19] Moon T H, Jeong M C, Lee W, Myoung J M 2005 *Appl. Surf. Sci.* **240** 280
- [20] Mandalapu L J, Yang Z, Xiu F X, Zhao D T, Liu J L 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 092103
- [21] Zhang J, Li X F, Lu J G, Ye Z Z, Gong L, Wu P, Huang J, Zhang Y Z, Chen L X, Zhao B H 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 084509
- [22] Bae H S, Yoon M H, Kim J H, Im S 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 5313
- [23] Lany S, Zunger A 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 045501
- [24] Janotti A, van de Walle C G 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 122102

Ultraviolet photoresponse of ZnO thin-film transistor fabricated at room temperature*

Wu Ping¹⁾ Zhang Jie¹⁾ Li Xi-Feng²⁾ Chen Ling-Xiang¹⁾
Wang Lei¹⁾ Lü Jian-Guo¹⁾†

1) (State Key Laboratory of Silicon Materials, Department of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

2) (Key Laboratory of Advanced Display and System Application, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

(Received 18 June 2012; revised manuscript received 11 August 2012)

Abstract

Transparent thin-film transistor (TFT) with ZnO film as a channel layer is fabricated at room temperature. ZnO film has a high absorption in the UV region and ZnO-TFT is sensitive to the UV illumination. We investigate the ultraviolet photoresponse of ZnO-TFT and find that the illumination with 254 nm light results in an evident photoresponse. The residual conductivity is observed in ZnO channel even the UV light was removed one week before. The UV illumination can induce the formation of oxygen vacancy defects which will act as donors in ZnO channel.

Keywords: ZnO, thin film transistors, ultraviolet photoresponse, residual conductivity

PACS: 81.05.Dz, 81.15.Cd, 85.30.Tv, 85.60.Gz

DOI: 10.7498/aps.62.018101

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51002131) and Open Project of Key Laboratory of Advanced Display and System Applications, Ministry of Education, China (Grant No. P201005).

† Corresponding author. E-mail: lujianguo@zju.edu.cn