

MSM 结构 $Mg_{0.2}Zn_{0.8}O$ 可见盲光电探测器

蒋大勇 徐 锋 曹 雪 孙云刚 陈 濛 刘芯宇

(长春理工大学材料科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 采用射频磁控溅射,通过传统的紫外曝光和湿法腐蚀的方法,制备了不同电极间距的金属-半导体-金属(MSM)结构 $Mg_{0.2}Zn_{0.8}O$ 可见盲光电探测器。研究了器件的暗电流和响应度随电极间距的变化关系,当施加的电压没有达到贯穿电压的时候,暗电流和响应度均随着电极间距的增加而减小,并对其具体的机制进行了研究。

关键词 光电探测器;氧镁锌;响应度;暗电流;金属-半导体-金属(MSM)结构

中图分类号 O472.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1004002

Metal-Semiconductor-Metal Structured $Mg_{0.2}Zn_{0.8}O$ Visible Blind Photodetectors

Jiang Dayong Xu Feng Cao Xue Sun Yungang Chen Meng Liu Xinyu

(School of Materials Science and Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract The metal-semiconductor-metal (MSM) structured $Mg_{0.2}Zn_{0.8}O$ photodetectors with different electrode spacings are made by radio frequency magnetron sputtering, conventional ultraviolet exposure and wet etching methods. The relationship between electrode spacing and dark current or responsivity is studied. Before achieving the punch-through voltage, the dark current and responsivity both decrease with the electrode spacing increasing. Furthermore, the specific mechanisms are also investigated.

Key words photodetector; MgZnO; responsivity; dark current; metal-semiconductor-metal structure

OCIS codes 040.5160; 040.7190; 160.6000; 160.1890

1 引 言

目前,由于紫外光电探测器在导弹预警、火灾监控、化学生物试剂探测及空间通信等方面的潜在应用前景,引起越来越多科研人员的重视。在众多的紫外光电探测器材料中,宽带隙半导体材料 $MgZnO$ 成为了人们重点研究的对象^[1~3],这主要是因为它具有如下的突出优点:1) Mg 和 Zn 的离子半径相差较小,形成合金后不易引起晶格结构的畸变,为制备合金薄膜奠定了基础;2)直接宽带隙半导体材料,带隙宽度可在 3.3~7.8 eV 进行调节,这样就可以避免红外与可见光对器件的影响,为实现紫外探测提供了条件;3)热稳定性高,具有较低的生长温度(100 °C~700 °C),制备条件并不苛刻;4)抗辐射性

能好,这就使得 $MgZnO$ 光电器件能够长时间承受高强能量紫外光的照射;5)无毒无害,原料丰富。基于 $MgZnO$ 材料这些优点及其潜在的应用前景,人们通过各种方法实现了其薄膜的制备^[4~6]。这些制备方法包括金属有机气相外延法(MOCVD)^[7]、分子束外延法(MBE)^[8]、脉冲激光沉积法(PLD)^[9]和磁控溅射^[10]等。在这些方法中,磁控溅射法由于制备简单、价格便宜等优点而被普遍采用。

由于 $MgZnO$ 材料 p 型制备及 p 型稳定性差等问题,严重制约了 p-n 结型 $MgZnO$ 紫外光电探测器的发展。金属-半导体-金属(MSM)结构器件取而代之,成为了人们的首选。与 p-n 结构相比,MSM 结构的优点有:1)无需制备 p 型材料;2)不仅

收稿日期: 2011-06-15; 收到修改稿日期: 2011-07-15

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(201101103)和国家大学生创新性实验计划(2010A0637)资助课题。

作者简介: 蒋大勇(1981—),男,博士后,主要从事宽禁带半导体光电探测器等方面的研究。

E-mail: dayongjiang1981@126.com

能够像 p-n 结型器件那样进行纵向收集,还能够进行横向收集;3)反应速度快,寄生电容小。对于其他类型的材料,这种结构的器件与 p-n 结型器件相比同样具有较强的竞争力。目前,人们已经通过各种制备方法实现了 MSM 结构的 MgZnO 可见盲光电探测器。例如,2001 年 Yang 等^[11]采用脉冲激光沉积(PLD)方法在 Al_2O_3 衬底上实现了 MSM 结构的 MgZnO 探测器,2007 年 Liu 等^[12]采用磁控溅射的方法在 SiO_2 衬底上同样实现了这种结构的 MgZnO 器件。对于 MSM 结构的光电探测器而言,可以预见的是电极间距为至关重要的器件参数。但到目前为止,人们还没有对 MSM 结构电极间距对器件性能的影响进行深入的研究。因此,本文将在制备 MSM 结构 MgZnO 可见盲光电探测器的基础上,针对不同电极间距对器件性能的影响进行深入的分析。

2 实 验

2.1 MgZnO 合金薄膜的制备

MgZnO 合金薄膜是通过射频磁控溅射的方法,沉积在 SiO_2 衬底上制备得到的。溅射靶材是 MgZnO 合金陶瓷靶,Mg 的原子数分数为 10%,它采用纯度为 99.99% 的 MgO 和 ZnO 粉末,在 1000 °C 的空气气氛下烧结 10 h 制得。 SiO_2 衬底通过标准的步骤进行清洗。溅射前,生长室的背底真空达到 5×10^{-4} Pa,之后将纯度为 99.99% 的 Ar 和 O_2 按流量比 3:1 的比例引入生长室,使其真空度保持在 1 Pa,并使衬底的温度保持在 400 °C。溅射后,为了进一步提高样品的晶体质量,将样品置于 600 °C 的真空条件下退火 30 min。

2.2 器件的制备与测试

在制备得到 MgZnO 合金薄膜的基础上,采用传统的紫外线曝光和湿法腐蚀的方法制备 MSM 结构的金属电极。电极材料选择金属 Au,这主要是由于 Au 的功函数达到 5.1 eV,使之能够与半导体薄膜之间形成肖特基接触,提升空间电荷区电场收集光生载流子的作用。电极金属通过电阻热蒸发法制备得到,并使 Au 膜的厚度为 50 nm 左右,这可以最大限度地使光线透射到 MgZnO 合金薄膜表面。本文所制备的 MSM 结构的电极长度为 500 μm ,电极宽度为 5 μm ,电极间距分别为 2,5 和 10 μm 。图 1 是间距为 5 μm 的 MSM 结构电极的扫描电镜(SEM)图与结构示意图。

MgZnO 合金薄膜的组分通过 X 射线能谱仪

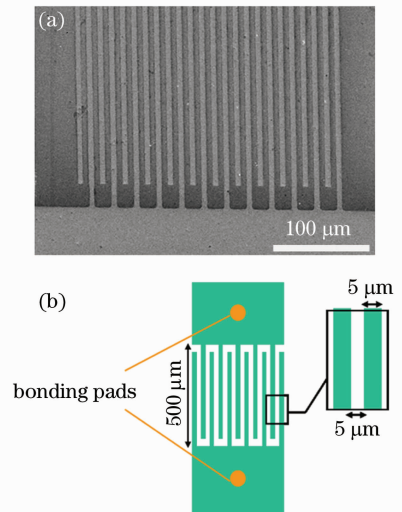


图 1 MSM 结构电极的(a)扫描电镜图与(b)结构示意图
Fig. 1 (a) SEM and (b) schematic illustration images of MSM electrodes

(EDS)(Genesis 2000XMS 60S)测定。 $I-V$ 特性曲线则是采用半导体分析仪(Keithley 4200)测试得到的。器件的光谱响应测试系统选用 150 W 的氙灯作为光源,并配有单色仪、锁相放大器和 50 Ω 的串联信号电阻。

2.3 结果与讨论

图 2 为 MgZnO 合金薄膜的 EDS 谱,经测定 Mg 原子的质量分数达到 20%。非常值得一提的是靶材中 Mg 的原子数分数为 10%,仅为合金薄膜中的一半。根据经验,认为造成合金薄膜中的 Mg 质量分数高于合金靶材的原因主要有两点:1) Zn 原子比 Mg 原子蒸气压高,因此在元素沉积过程中,Zn 原子更容易比 Mg 原子蒸发而脱离衬底;2) Zn-O 键能比 Mg-O 键能小,因此在一定的衬底温度和生长气压下,Zn-O 键比 Mg-O 键更容易断裂,Zn 原子更容易形成 Zn 间隙或到达薄膜的表层而

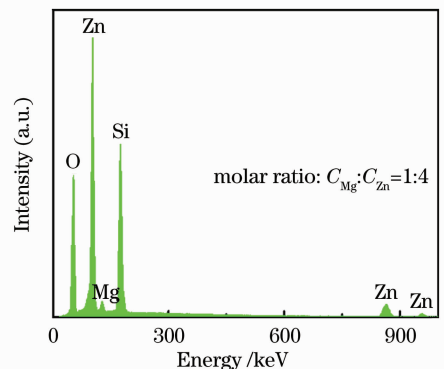


图 2 MgZnO 合金薄膜能谱

Fig. 2 EDS spectrum of MgZnO alloy thin film

挥发。

图 3 为暗场条件下不同电极间距的 $Mg_{0.2}Zn_{0.8}O$ 光电探测器的 $I-V$ 特性曲线。对于电极间距为 2, 5 和 $10 \mu m$ 的器件, 其暗电流在 3 V 偏压下分别为 7.2, 2.1 和 0.4 nA。从图 3 可以看出, 暗电流随着电极间距的增加而降低, 具体的原因将在下面阐述。

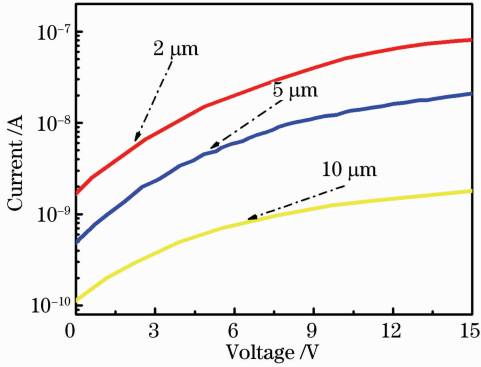


图 3 暗场条件下不同电极间距的 $Mg_{0.2}Zn_{0.8}O$ 光电探测器的 $I-V$ 特性曲线

Fig. 3 $I-V$ characteristics of $Mg_{0.2}Zn_{0.8}O$ photodetectors with different spacings in dark field

图 4 为不同电极间距器件的光响应谱。器件在光响应测试前, 测试系统采用标准的 Si 探测器进行标定。不同电极间距的器件测试所施加的电压均为 3 V, 光谱测试范围为 300~500 nm。测试得到的最大响应度为 0.8 A/W, 其对应的电极间距为 $2 \mu m$ 。图 4 的插图为间距是 $2 \mu m$ 的探测器响应度峰值随偏压的变化曲线。可以看到响应度峰值与偏压之间是非线性关系, 且在 10 V 偏压下, 器件的响应度趋于饱和。

从上面的实验结果可以看到, 不同电极间距的

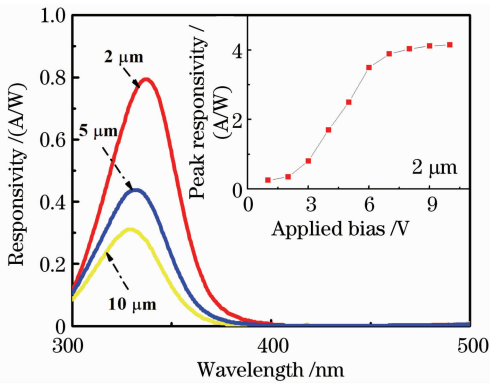


图 4 不同间距探测器光响应谱。插图为电极间距为 $2 \mu m$ 器件的响应度峰值随电压变化曲线

Fig. 4 Spectral response of photodetectors with different spacings. Inset shows the peak responsivity as a function of bias voltage with the spacing of $2 \mu m$

器件对应的暗电流、响应度等参数不同。因此非常有必要研究清楚电极间电场强度的分布以及耗尽层的宽度。众所周知, MSM 结构是双肖特基型的背靠背结构。当所施加的偏压增加时, 两个耗尽层的总宽度将会随之展宽。最后偏压达到贯穿电压时, 两个耗尽层宽度区域相互接触, 并且耗尽层的总宽度等于电极间的距离。为了进行比较, 改变电极间的距离并施加 3 V 的偏压。耗尽层的宽度可以表示为

$$W = \sqrt{\frac{2k\epsilon_0(\phi_0 + V)}{qN_d}}, \quad (1)$$

式中 k 是相对介电常数, ϵ_0 为绝对介电常数, ϕ_0 是内建电势, V 是施加的偏压, N_d 是施主浓度 (约为 10^{16} cm^{-3}), q 为电子电荷。假设偏压完全施加在反向偏置结区, 经计算其耗尽层的宽度为 $0.6 \mu m$, 而正向偏置耗尽层的宽度必然要小于反向偏置结区的宽度。因此, 两个耗尽层的总宽度小于 $2 \mu m$, 这就意味着所施加的偏压没有达到贯穿电压。因此可以建立 MSM 结构的背靠背示意图和能带图, 如图 5 所示。当与半导体接触的金属为同一种材料时, 则两侧内建电势相等 ($V_{D1} = V_{D2}$), 两侧的肖特基势垒高度相同 ($\phi_{n1} = \phi_{n2}$), W_1 和 W_2 分别为反向偏置和正向偏置结区的耗尽层宽度。

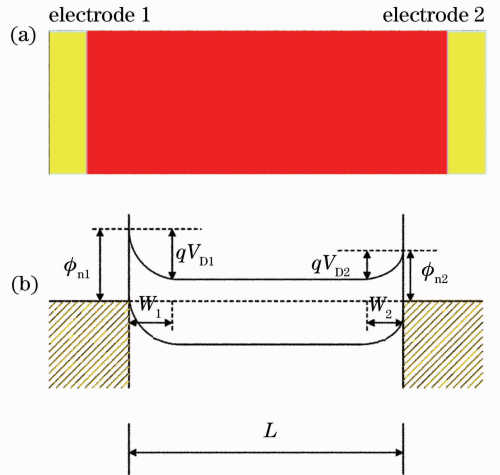


图 5 电极背靠背 (a) 示意图和 (b) 能带图

Fig. 5 (a) Electrode back to back schematic image and (b) energy band diagram

根据建立的模型, 可以对不同电极间距的器件性能参数进行解释。1) 对于暗电流: 可以预见耗尽层宽度 L 随着偏压的增加而展宽, 这将导致电极间电阻的增加, 因此对于间距为 $10 \mu m$ 的器件而言, 可以得到 0.4 nA 的最低暗电流; 2) 对于响应度: 器件的有效光接收面积为电极间的耗尽层, 而耗尽层

的电场强度直接决定了响应度的大小。在耗尽层产生的自由光生载流子将被电场所扫走。随着偏压的增加,耗尽层的总宽度随之展宽。但当施加的偏压为一定值时,随着电极间距的增加,电极间的电阻将增加,同时施加在电阻上的偏压也将提高,这将导致电极间的总耗尽层宽度减少。因此,随着电极间距的增加,响应度将相应地降低。

3 结 论

在 SiO₂ 衬底上采用射频磁控溅射的方法生长 Mg_{0.2}Zn_{0.8}O 合金薄膜,并通过传统的紫外曝光和湿法腐蚀的方法,制备了 MSM 结构的可见盲光电探测器。对于 3 V 偏压下不同电极间距的 Mg_{0.2}Zn_{0.8}O 探测器,暗电流最小为 0.4 nA,对应的电极间距为 10 μm,最大的响应度为 0.8 A/W,其对应的电极间距为 2 μm。此外,得出了随着电极间距的增加,暗电流降低和响应度下降的规律。这对优化 MSM 结构的探测器具有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- 1 A. K. Sharma, J. Narayan, J. F. Muth *et al.*. Optical and structural properties of epitaxial Mg_xZn_{1-x}O alloys[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(21): 3327~3329
- 2 J. G. Lu, S. Fujita, T. Kawaharamura *et al.*. Carrier concentration induced band-gap shift Al-doped Zn_{1-x}Mg_xO thin films[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(26): 262107
- 3 H. Shibata, H. Tampo, K. Matsubara *et al.*. Photoluminescence characterization of Zn_{1-x}Mg_xO epitaxial thin films grown on ZnO by radical source molecular beam epitaxy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(12): 124104
- 4 Zhang Xijian, Yuan Huimin, Wang Tong *et al.*. Fabrication and refractive indices of MgZnO thin films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 6~9
张锡健,袁慧敏,王 统等. MgZnO 薄膜的制备及其折射率研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 6~9
- 5 Li Xiaolong, Jiang Xiaofang, Lei Xiaoyan *et al.*. Well width dependence of band gap renormalization of single ZnO/MgZnO quantum well [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2967~2971
李小龙,姜小芳,雷小燕等. ZnO/MgZnO 单量子阱的能带重正化与阱宽的关系[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2967~2971
- 6 Wang Zhaoyang, Hu Lizhong, Zhao Jie *et al.*. Effect of growth parameters of fabricating ZnO thin films by pulsed laser deposition on light emission characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1371~1376
王兆阳,胡礼中,赵 杰等. 脉冲激光沉积方法制备 ZnO 薄膜生长参量对发光特性的影响[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1371~1376
- 7 S. Muthukumar, Y. Chen, J. Zhong *et al.*. Metalorganic chemical vapor deposition and characterizations of epitaxial Mg_xZn_{1-x}O (0 ≤ x ≤ 0.33) [J]. *J. Cryst. Growth*, 2004, **261**(2-3): 316~323
- 8 H. Tanaka, S. Fujita, S. Fujita *et al.*. Fabrication of wide-band-gap Mg_xZn_{1-x}O quasi-ternary alloys by molecular-beam epitaxy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(19): 192911
- 9 K. Matsubara, H. Tampo, H. Shibata *et al.*. Band-gap modified Al-doped Zn_{1-x}Mg_xO transparent conducting films deposited by pulsed laser deposition [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(8): 1374~1376
- 10 X. J. Zhang, H. L. Ma, Q. P. Wang *et al.*. Structural and optical properties of Mg_xZn_{1-x}O thin films deposited by magnetron sputtering[J]. *Physica B*, 2005, **364**(1-4): 157~161
- 11 W. Yang, R. D. Vispute, S. Choopun *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
- 12 K. W. Liu, J. Y. Zhang, J. G. Ma *et al.*. Zn_{0.8}Mg_{0.2}O-based metal-semiconductor-metal photodiodes on quartz for visible-blind ultraviolet detection [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, **40**(9): 2765~2768