

文章编号: 1000-7032(2021)02-0201-07

基于 Ag 微孔阵列结构电极的 MgZnO 紫外探测器制备和特性

王丽嫣^{1,2}, 刘可为^{1,2*}, 陈 星^{1,2*}, 朱勇学^{1,2}, 侯其超^{1,2}, 申德振^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学 材料科学与光电工程研究中心, 北京 100049)

摘要: 通过金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)方法在蓝宝石衬底上生长了 MgZnO 薄膜, 结合光刻和聚苯乙烯(PS)小球模板技术, 制备了基于 Ag 微孔阵列电极结构的 MgZnO 紫外探测器。与基于常规金属薄膜电极的器件相比, 基于微孔阵列叉指电极的 MgZnO 基紫外探测器的光电流提高近 6 倍, 同时其暗电流和响应时间基本保持不变。通过紫外-可见透射光谱和电学性质等表征, 讨论了 Ag 微孔阵列结构电极对 MgZnO 薄膜紫外光电探测性能的影响机制。本研究为制备高性能紫外探测器提供了一条可行的途径。

关 键 词: MgZnO; 紫外探测器; 聚苯乙烯; 微孔阵列

中图分类号: O472+.8; TN36

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20200362

Fabrication and Characteristics of MgZnO Ultraviolet Detector Based on Ag Microporous Array Structure Electrode

WANG Li-yan^{1,2}, LIU Ke-wei^{1,2*}, CHEN Xing^{1,2*}, ZHU Yong-xue^{1,2}, HOU Qi-chao^{1,2}, SHEN De-zhen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Authors, E-mail: liukw@ciomp.ac.cn; chenxing@ciomp.ac.cn

Abstract: The MgZnO film was grown on the sapphire substrate by the metal organic compound chemical vapor deposition(MOCVD) method. Combined with photolithography and polystyrene(PS) microsphere template technology, the MgZnO ultraviolet detector based on the Ag microporous array electrode structure was fabricated. Compared with devices based on conventional metal film electrodes, the photocurrent of the MgZnO ultraviolet detector based on the microporous array interdigital electrode is increased by nearly 6 times, while its dark current and response time remain basically unchanged. Through the characterization of ultraviolet-visible transmission spectra and electrical properties, the mechanism of the influence of the microporous array structure Ag electrode on the UV photodetection performance of the MgZnO film was discussed. This study provides a feasible way to prepare high-performance UV detectors.

收稿日期: 2020-11-29; 修订日期: 2020-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(62074148, 61605200, 61875194, 11727902, 61425021, 61525404, 61427901); 中国科学院百人计划, 吉林省优秀青年科学基金(20180520173JH); 中国科学院青年创新促进会(2020225); 发光学及应用国家重点实验室开放基金(SKLA-2018-05, SKLA-2020-06); 中英合作交流项目(英国皇家学会-中国自然科学基金委)(IECNFSFC170345)资助 Supported by National Natural Science Foundation of China(62074148, 61605200, 61875194, 11727902, 61425021, 61525404, 61427901); 100 Talents Program of the Chinese Academy of Sciences, Jilin Province Science Fund for Excellent Young Scholars(20180520173JH); Youth Innovation Promotion Association, CAS(2020225); Open Project of the State Key Laboratory of Luminescence and Applications(SKLA-2018-05, SKLA-2020-06); Royal Society, International Exchanges 2017 Cost Share(China)(IECNFSFC170345)

Key words: MgZnO; ultraviolet detector; polystyrene; microporous array

1 引 言

紫外探测技术是继激光和红外探测技术之后发展起来的又一新型军民两用探测技术。由于宇宙空间、导弹发动机尾焰、高压线电晕等都含有紫外辐射,因而紫外探测器在航天、军事、民用领域均有广泛的应用需求^[1-3]。紫外探测器是紫外探测技术的核心,近年来,伴随着以氮化镓(GaN)、氧化锌(ZnO)、碳化硅(SiC)等为代表的宽禁带半导体的飞速发展^[4-6],基于宽禁带半导体材料的紫外探测器引起了人们的广泛关注。它们具有体积小、能耗低、抗辐射性强、本征可见盲、稳定性高等诸多优点^[7-8],被认为有望取代真空光电倍增管和硅基紫外光电管而成为新一代紫外探测器件^[9]。

在众多的宽禁带半导体材料中,ZnO以及MgZnO材料具有低缺陷密度、高饱和载流子漂移速率、低成本、较宽的禁带宽度调节范围(3.37~7.8 eV)、抗辐射性能强、制备手段多样、原材料丰富等优势^[10-12],是公认的制备新一代紫外探测器的理想候选材料^[13]。

截至目前,已报道的MgZnO基紫外探测器件多是基于平面金属-半导体-金属(MSM)结构^[14],且采用正入射的工作方式,即光从电极一侧入射^[15-17]。鉴于此,电极的导电性和透光性成为决定器件探测性能的关键因素^[18]。一方面,金属电极起到对器件施加偏压和收集光生载流子的作用;另一方面,电极材料自身又会吸收或反射入射光,进而降低器件的外量子效率^[19]。一般来说,增加金属薄膜的厚度可以提高其导电性,但金属薄膜越厚,其透光性越差。因此,在制备MgZnO紫外探测器的金属薄膜电极时,人们在导电性和透光性之间往往只能折中处理,选择合适的厚度,以期获得优异的光电探测性能^[20]。以氧化铟锡(ITO)为代表的透明导电薄膜拥有相对较好的透光性和优良的导电性,作为电极材料被广泛用于太阳能电池、显示器等领域;但其高透光性主要集中在可见光波段,制备兼具高导电性和高紫外光透过率的透明导电薄膜仍存在很大挑战^[21]。1998年,Ebbesen等发现了微纳孔结构金属膜的超强透射(Extraordinary optical transmission)现象,

为解决金属电极的导电性和透光性之间的矛盾、进而实现高导电性和高透光性的金属电极提供了可行途径^[22]。截至目前,尚未有微纳孔结构的金属薄膜用作MgZnO紫外探测器电极的相关研究和报道。

本文通过金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)方法制备了MgZnO薄膜;然后利用光刻和聚苯乙烯(PS)小球模板^[23]相结合的技术在其上制备了微孔阵列结构Ag叉指电极,对比研究了常规薄膜和Ag微孔阵列结构的光学和电学特性,及其作为电极对MgZnO紫外探测器件性能的影响;并简要讨论了相关机制。我们发现,相比于传统薄膜,微孔结构的Ag薄膜具有更高的透光率和相似的导电性,此外,基于Ag微孔阵列结构叉指电极的MgZnO紫外探测器在254 nm波长紫外光照射下,其光电流比传统薄膜电极的器件提高了6倍,同时暗电流和响应时间并无明显变化。本研究结果表明,微孔阵列结构电极在制备高性能紫外探测器方面具有重要的应用前景。

2 实 验

2.1 样品制备

具有Ag微孔叉指电极的MgZnO紫外探测器的器件结构及制作流程如图1所示。首先,采用MOCVD方法在蓝宝石衬底上外延生长一层MgZnO薄膜,在MgZnO薄膜上旋涂光刻胶,在其上遮蔽具有叉指图形的光刻板,进行光刻曝光和显影后,形成叉指图形。随后,用提拉法^[24]在样品表面制备单层密排的PS小球阵列^[25],并用等离子体处理调控PS小球的直径,之后用热蒸发技术蒸镀金属。最后,去除光刻胶和PS小球,获得具有微孔阵列结构Ag叉指电极的MgZnO紫外探测器。具体实验过程如下:

(1) MgZnO 薄膜制备

将c面蓝宝石逐步置于装有三氯乙烯、丙酮、乙醇的烧杯中,分别超声清洗5 min,用去离子水冲洗干净后用高纯氮气吹干,并将干净的衬底移入生长室准备生长。在生长室中通入氮气,将衬底加热至750 °C,保持30 min。待衬底加热预处理完成后,将衬底温度降至400 °C,将金属有机源和氧气通入生长室。其中锌源为二乙基锌(DEZn),

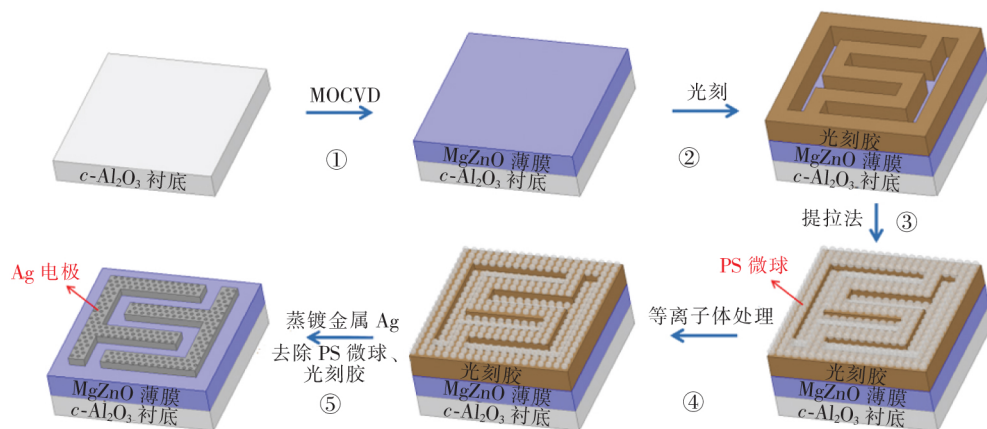


图1 基于 Ag 微孔阵列结构叉指电极的 MgZnO 紫外探测器制作流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fabrication process of MgZnO ultraviolet detector with interdigital electrode based on Ag microporous array structure

源温为 -5°C ,载气流量为 2 mL/min ;镁源为二甲基二茂镁($(\text{MeCp})_2\text{Mg}$) ,源温为 50°C ,载气流量为 15 mL/min ;氧气流量为 80 mL/min 。生长室气压为 $4\,000\text{ Pa}$,生长时间为 90 min 。待生长完成后 ,自然冷却到室温 ,然后取出样品。将样品在 O_2 气氛下退火 ,退火温度为 700°C ,时间为 30 min 。

(2) 模板制备

首先通过光刻技术在 MgZnO 薄膜表面匀胶并刻出需要的叉指结构 ,在显影结束后 ,不蒸镀金属 ,而是在上面覆盖单层密排的 PS 小球。具体方法如下 :首先在培养皿中加入 10 mL 的去离子水 ,将聚苯乙烯小球单分散剂(小球直径为 800 nm ,质量/体积分数为 $250\text{ mg}/10\text{ mL}$)用滴管取出 0.5 mL 将滴管斜置 ,滴管的尖端轻触水面 ,将滴管内液体于 10 s 内缓慢均匀挤出 ;然后在水面边缘滴入 0.05 mL 质量浓度为 4% 的十二烷基硫酸钠溶液作为表面活性剂使 PS 小球在水面密排 ,静置备用。

将覆盖有光刻胶的 MgZnO 薄膜从水面没有 PS 小球的区域缓缓沉入 ,并缓慢移动到单层膜区域的下方。用镊子夹起衬底一角 ,向上缓缓提起 ,将小球转移到衬底表面 ,在室温条件下静置待样品表面完成干燥 ,最终在样品表面形成紧密六方排列的单层聚苯乙烯小球模板。然后用空气等离子体处理 PS 小球 ,对于等离子体处理的功率和时间的选择 ,主要考虑两点 :一是可以适当地减小 PS 小球的尺寸 ,二是避免长时间的处理使得光刻胶被破坏。最终 ,我们选用的条件为射频功率 100 W ,空气等离子体处理 15 min 。

(3) 金属电极蒸镀

将高纯 Ag 丝放入钨舟中 ,样品固定于其正上方的中间位置 ,开机械泵将样品室抽至初级真空。当真空度低于 5 Pa 时开分子泵 ,当真空度低于 $2 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ 时接通加热电源 ,将电流调至 120 A ,保持 1 s 后迅速调至 0 A ,反复 5 次 ;然后将电流升至 150 A ,保持 3 s 后调至 0 A 确保舟内金属全部蒸发 ;依次关闭分子泵、机械泵 ,将样品室内充入高纯氮气 ,恢复大气压后取出样品备用。

在样品表面用热蒸发法蒸镀厚度约为 50 nm 的 Ag 薄膜 ,然后将其放置在丙酮溶液中 3 h ,用乙醇冲洗 ,将作为掩模的 PS 小球和光刻胶去除 ,即可制备出具有微孔 Ag 叉指电极的 MgZnO 紫外探测器。为了做对比研究 ,我们又在相同的实验条件下制备了传统的基于 Ag 薄膜叉指电极的 MgZnO 紫外探测器(即只进行图 1 中的步骤①②⑤)。

2.2 样品表征

本文主要采用扫描电子显微镜(SEM 型号 HITACHI S-4800) 、X 射线衍射谱(XRD ,Bruker D8-Discover 四圆 X 射线衍射仪) 和双光束分光光度计(Shimadzu UV-3101PC) 对材料的晶体结构、薄膜的厚度以及金属阵列的表面形貌进行表征 ,利用光响应测试系统(DSR100-UV-A) 和半导体分析仪(Agilent B1500A) 对制成的器件进行测试^[26] 。

3 结果与讨论

3.1 金属微孔薄膜表征及光学和电学特性

图 2(a) 、(b) 分别为提拉法制备的聚苯乙烯

小球阵列在等离子体处理前、后的表面 SEM 形貌图。通过对比可以看出,PS 小球经过等离子体处理 15 min 后直径发生了变化,由起初的 800 nm 缩减到 750 nm 左右,整体由单层的密排状态转化为规则的非密排状态。图 2(c)、(d) 是以上述小球阵列为模板制备的 Ag 金属微纳结构的表面 SEM 形貌图,可以看出,随着模板中 PS 小球尺寸的减小,金属的形貌由孤立的三角形状(Ag 三角结构)转为连续的孔状阵列结构(Ag 微孔结构)。

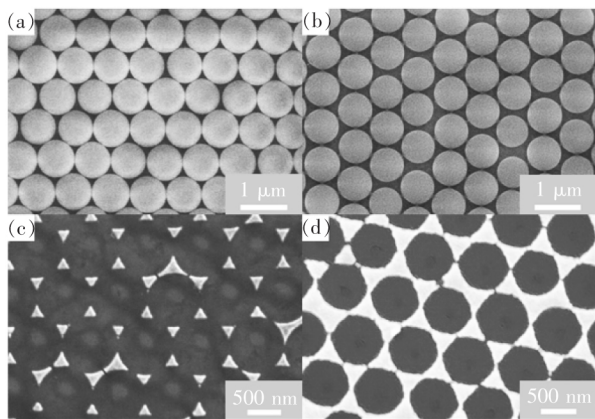


图 2 原生(a)和等离子体处理后(b)的聚苯乙烯小球阵列表面 SEM 图片;以原生(c)和等离子体处理后(d)的聚苯乙烯小球阵列为模板制备的金属微纳结构 SEM 图片。

Fig. 2 Original(a) and plasma-treated(b) polystyrene bead array surface SEM pictures. SEM images of the metal micro-nano structures prepared with the original(c) and plasma-treated(d) polystyrene bead arrays as templates.

图 3 是 Ag 薄膜、Ag 三角结构和 Ag 微孔阵列的紫外-可见透射光谱。从图中可以看出,尽管 Ag

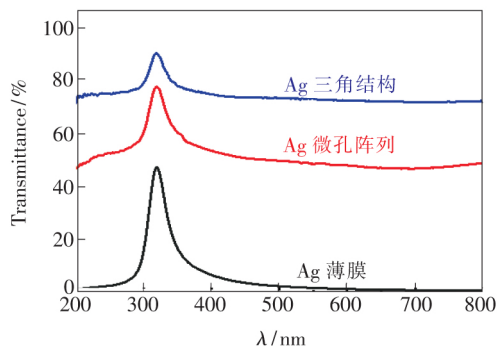


图 3 Ag 薄膜、Ag 三角结构和 Ag 微孔阵列的紫外-可见透射光谱。

Fig. 3 Ultraviolet-visible transmission spectra of Ag film, Ag triangular structure and Ag microporous array.

三角结构具有最好的透光性(紫外波段平均透过率大于 70%),但不连续的金属结构不导电,因此不能用作电极。Ag 微孔阵列在紫外波段的平均透光率达 50% 以上,显著高于 Ag 薄膜,而二者的电导率却相差不大(见表 1),Ag 微孔阵列的高透光性和高导电性表明其是制备紫外探测器的理想电极结构。此外,所有的样品在 320 nm 波长附近均出现了明显的透射峰,这与之前报道的结果一致,可能和 Ag 材料表面等离子体共振效应相关^[27-29]。

表 1 Ag 薄膜和 Ag 微孔阵列的电导率

Tab. 1 Conductivity of Ag film and Ag microporous array

样品	电导率/($S \cdot m^{-1}$)
Ag 微孔阵列	2.2×10^7
Ag 薄膜	6.3×10^7

3.2 基于 Ag 微孔阵列结构叉指电极的 MgZnO 紫外探测器性能表征

为了研究 MgZnO 薄膜的结构、组分及光学等特性,我们利用 XRD、SEM 和紫外-可见透射光谱(UV-Vis)对退火后的 MgZnO 薄膜进行了表征。

图 4 是样品的 XRD 结果,从图中可以看出,除了来自蓝宝石衬底的(0006)衍射峰外,位于 34.8° 的强特征峰为六角纤锌矿结构 MgZnO(*w*-MgZnO)的(0002)衍射峰,同时,在 36.6° 附近出现了极其微弱的立方岩盐矿结构 MgZnO(*c*-MgZnO)(111)衍射峰。XRD 结果表明,制备的 MgZnO 薄膜主要为六角纤锌矿结构。

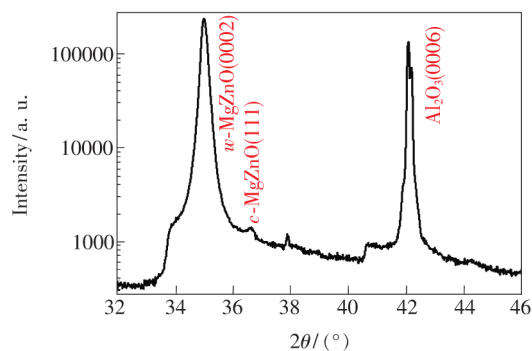


图 4 MgZnO 薄膜的 XRD 图

Fig. 4 XRD pattern of MgZnO film

图 5(a) 是 MgZnO 薄膜的表面 SEM 图,薄膜表面相对平整和均一,但含有大量随机分布的沟壑。图 5(b) 是薄膜的紫外-可见透射光谱,从图中可以看出, MgZnO 薄膜在 350 nm 左右具有单

一陡峭的吸收边,其可见光波段的平均透过率达到 90% 以上,非常适合用于制备本征可见盲紫外探测器。

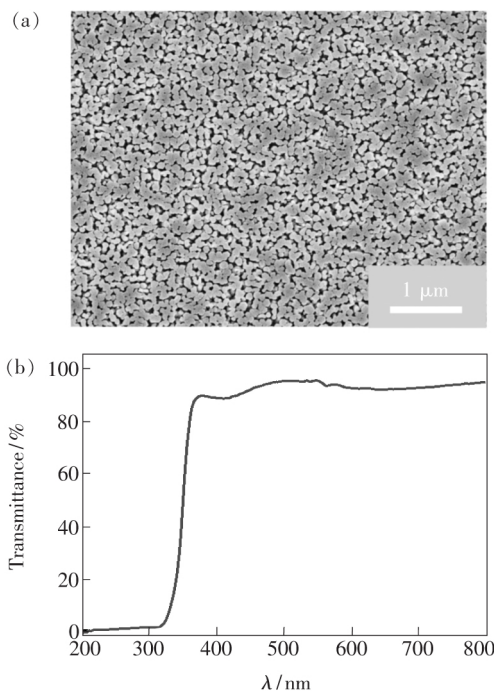


图5 MgZnO 薄膜的表面 SEM 图(a) 和紫外-可见透射光谱(b)

Fig. 5 Surface SEM image(a) and UV-Vis transmission spectrum(b) of MgZnO film

为了研究微孔阵列结构电极对器件探测性能的影响,我们对制备的传统 Ag 薄膜叉指电极器件和 Ag 微孔阵列结构叉指电极器件的紫外探测性能进行了表征。图 6 给出了器件的暗态电流-电压(I - V) 曲线,从图中可以看出 Ag 电极与 Mg-ZnO 半导体之间为类欧姆接触,且基于两种不同电

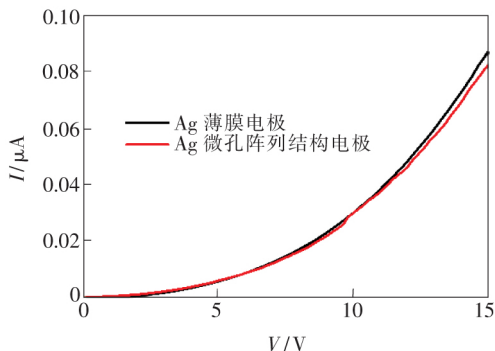


图6 基于 Ag 微孔阵列结构电极与传统 Ag 薄膜电极 MgZnO 紫外探测器伏安特性曲线

Fig. 6 Voltammetric characteristic curve of MgZnO ultraviolet detectors based on the Ag microporous array structure electrode and traditional Ag thin film electrode

极结构的探测器具有相似的暗电流。这主要是因为 MgZnO 薄膜上的 Ag 微孔阵列结构与 Ag 薄膜具有相近的导电性,与 3.1 部分得到的实验结果一致。

图 7 是器件的光谱响应特性曲线,两个器件的光响应度峰值均出现在 320 nm 附近, -3 dB 探测截止边约为 350 nm,这与 MgZnO 薄膜的吸收边一致。对比两个器件光响应曲线的峰形可以看到,Ag 薄膜电极器件的光响应峰比 Ag 微孔电极器件的更窄(Ag 薄膜电极器件的半高宽为 42 nm, Ag 微孔电极器件的半高宽为 74 nm),该现象可归因于 Ag 微孔电极在紫外波段具有更高的光透过率(见图 3)。

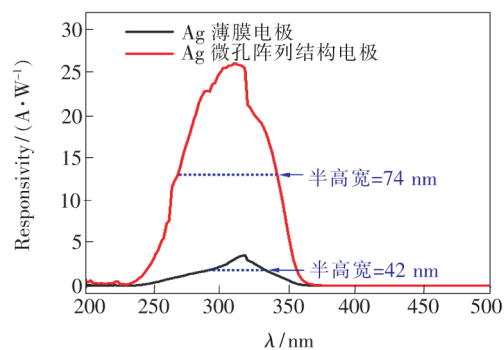


图7 基于 Ag 微孔阵列结构电极与传统 Ag 薄膜电极 MgZnO 紫外探测器的光响应曲线

Fig. 7 Photoresponse curves of MgZnO ultraviolet detectors based on Ag microporous array structure electrode and traditional Ag thin film electrode

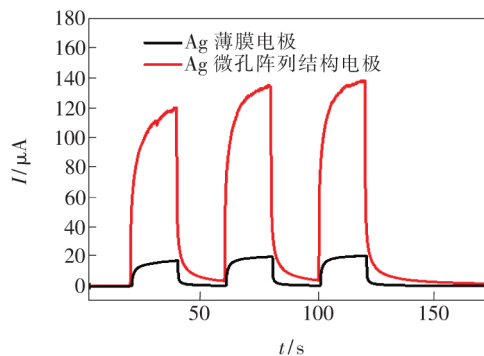


图8 MgZnO 紫外探测器在 10 V 偏压下电流随周期性开关 254 nm 波长紫外光的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of current of MgZnO UV detectors with periodically switched 254 nm UV at 10 V bias

为了评估光电探测器工作的可重复性和响应速度,我们测试了器件在 10 V 偏压下,以 40 s 为一个开关周期(20 s 关 20 s 开)在 254 nm 波长紫外光照射下的光电流随时间变化的曲线。如图 8

所示,可以看出两个器件均具有明显的光电响应特性和相对较好的可重复性。相比于传统的 Ag 薄膜叉指电极结构器件,具有 Ag 微孔阵列叉指电极结构的 MgZnO 薄膜紫外探测器的光电流提高了近 6 倍,这是由于微孔阵列 Ag 结构电极具有更高的光透过率。此外,两个器件的 10%~90% 上升时间均为 6~7 s, 90%~10% 下降时间均为 2~3 s。Ag 微孔阵列结构电极器件的光电流下降过程有个相对明显的拖尾现象,这可能与紫外光透过 Ag 微孔在 MgZnO 薄膜所产生的光生载流子的扩散过程相关。

上述结果表明,利用聚苯乙烯小球刻印技术和光刻工艺可在 MgZnO 薄膜上实现具有微孔阵列结构的 Ag 叉指电极,以此构建的 MSM 结构紫外探测器表现出优异的紫外光电探测性能,其光电流相比传统薄膜电极器件有了明显的提高,微

孔阵列结构的 Ag 叉指电极良好的导电特性和相对较高的透光性是造成该现象的主要原因。

4 结 论

利用 MOCVD 在 $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ 衬底上外延生长了以六角纤锌矿结构为主的 MgZnO 薄膜,并通过聚苯乙烯小球刻印技术和光刻工艺在 MgZnO 薄膜上制备了具有 Ag 微孔阵列结构叉指电极,构建了 MSM 结构紫外探测器。相比于传统的 Ag 薄膜叉指电极结构器件,具有 Ag 微孔阵列结构叉指电极的 MgZnO 薄膜紫外探测器的暗电流基本不变,光电流提高近 6 倍。通过实验结果分析,由于 Ag 微孔阵列结构电极具有高的透光性,使得更多的光子可以到达光敏区,所以器件的响应度得到了明显提高。上述结果为制备高性能紫外探测器提供了一条可行途径。

参 考 文 献:

- [1] CHEN H, MA X Z, ZHANG J T *et al.*. Avalanche solar blind photodetectors with high responsivity based on MgO/MgZnO heterostructures [J]. *Opt. Mater. Express*, 2018, 8(4): 785-793.
- [2] 郑剑, 乔倩, 张振中, 等. 基于立方相 MgZnO 薄膜的高响应度深紫外探测器 [J]. *发光学报*, 2014, 35(11): 1291-1296.
ZHENG J, QIAO Q, ZHANG Z Z *et al.*. Cubic MgZnO deep-ultraviolet photodetector with high responsivity [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014, 35(11): 1291-1296. (in Chinese)
- [3] NING Y, ZHANG Z M, TENG F *et al.*. Novel transparent and self-powered UV photodetector based on crossed ZnO nano-fiber array homojunction [J]. *Small*, 2018, 14(13): 1703754-1-9.
- [4] SHI L, NIHTIANOV S. Comparative study of silicon-based ultraviolet photodetectors [J]. *IEEE Sens. J.*, 2012, 12(7): 2453-2459.
- [5] 陶绪堂, 穆文祥, 贾志泰. 宽禁带半导体氧化镓晶体和器件研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2020, 39(2): 113-123.
TAO X T, MU W X, JIA Z T. Research progress in the crystal growth and devices of wide-bandgap $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ [J]. *Mater. China*, 2020, 39(2): 113-123. (in Chinese)
- [6] ZHUO R R, ZENG L H, YUAN H Y *et al.*. In-situ fabrication of PtSe_2/GaN heterojunction for self-powered deep ultraviolet photodetector with ultrahigh current on/off ratio and detectivity [J]. *Nano Res.*, 2019, 12(1): 183-189.
- [7] BOSCARINO S, FILICE S, SCIUTO A *et al.*. Investigation of ZnO-decorated CNTs for UV light detection applications [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(8): 1099-1-12.
- [8] JOIKE K, HAMA K, NAKASHIMA I *et al.*. Molecular beam epitaxial growth of wide bandgap ZnMgO alloy films on (111)-oriented Si substrate toward UV-detector applications [J]. *J. Cryst. Growth*, 2005, 278(1-4): 288-292.
- [9] 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]. *电子元件与材料*, 2004, 23(1): 42-44.
WANG L Y, XIE J C, LIN B X *et al.*. Study on n-ZnO/p-Si heterojunction UV enhanced photoelectric detectors [J]. *Electron. Comp. Mater.*, 2004, 23(1): 42-44. (in Chinese)
- [10] WANG J, CHEN R S, XIANG L *et al.*. Synthesis, properties and applications of ZnO nanomaterials with oxygen vacancies: a review [J]. *Ceram. Int.*, 2018, 44(7): 7357-7377.
- [11] HAN S, LIU S M, LIU Y M *et al.*. High performance solar-blind ultraviolet photo detector based on mixed-phase MgZnO thin film with different interfaces deposited by PLD method [J]. *J. Alloys Compds.*, 2017, 694: 168-174.
- [12] RANA V S, RAJPUT J K, PATHAK T K *et al.*. Multilayer MgZnO/ZnO thin films for UV photodetectors [J]. *J. Alloys Compds.*, 2018, 764: 724-729.

- [13] YANG J L, LIU K W, SHEN D Z. Recent progress of ZnMgO ultraviolet photodetector [J]. *Chin. Phys. B*, 2017, 26(4): 047308-4-9.
- [14] MOON T H, JEONG M C, LEE W *et al.*. The fabrication and characterization of ZnO UV detector [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, 240(1-4): 280-285.
- [15] HAN S, ZHANG Z Z, ZHANG J Y *et al.*. Photoconductive gain in solar-blind ultraviolet photodetector based on $\text{Mg}_{0.52}\text{Zn}_{0.48}\text{O}$ thin film [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(24): 242105-1-4.
- [16] ZHU Y X, LIU K W, WANG X *et al.*. Performance improvement of a ZnMgO ultraviolet detector by chemical treatment with hydrogen peroxide [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2017, 5(30): 7598-7603.
- [17] HWANG J D, LIN G S. Single- and dual-wavelength photodetectors with MgZnO/ZnO metal-semiconductor-metal structure by varying the bias voltage [J]. *Nanotechnology*, 2016, 27(37): 375502.
- [18] SHENG H Y, ZHANG X T, MA Y L *et al.*. Ultrathin wrinkled vertically aligned $\text{Co}(\text{OH})_2$ nanosheets/Ag nanowires hybrid network for flexible transparent supercapacitor with high performance [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(9): 8992-9001.
- [19] YI F S, BI Y G, ZHANG X L *et al.*. Highly flexible and mechanically robust ultrathin Au grid as electrodes for flexible organic light-emitting devices [J]. *IEEE Trans. Nanotechnol.*, 2019, 18: 776-780.
- [20] FANG H J, ZHENG C, WU L L *et al.*. Solution-processed self-powered transparent ultraviolet photodetectors with ultrafast response speed for high-performance communication system [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 29(20): 1809013-1-10.
- [21] HECHT D S, HU L B, IRVIN G. Emerging transparent electrodes based on thin films of carbon nanotubes, graphene, and metallic nanostructures [J]. *Adv. Mater.*, 2011, 23(13): 1482-1513.
- [22] EBBESEN T W, LEZEC H J, GHAEMI H F *et al.*. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays [J]. *Nature*, 1998, 391(6668): 667-669.
- [23] KE Y J, WEN X L, ZHAO D Y *et al.*. Controllable fabrication of two-dimensional patterned VO_2 nanoparticle nanodome, and nanonet arrays with tunable temperature-dependent localized surface plasmon resonance [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(7): 7542-7551.
- [24] LOTITO V, ZAMBELLI T. Approaches to self-assembly of colloidal monolayers: a guide for nanotechnologists [J]. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2017, 246: 217-274.
- [25] LIANG X G, DONG R T, HO J C. Self-assembly of colloidal spheres toward fabrication of hierarchical and periodic nanostructures for technological applications [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2019, 4(3): 1800541-1-9.
- [26] ZHOU C Q, AI Q, CHEN X *et al.*. Ultraviolet photodetectors based on wide bandgap oxide semiconductor films [J]. *Chin. Phys. B*, 2019, 28(4): 048503.
- [27] WANG Y S, CHEN N F, ZHANG X W *et al.*. Ag surface plasmon enhanced double-layer antireflection coatings for GaAs solar cells [J]. *J. Semicond.*, 2009, 30(7): 072005-1-5.
- [28] HU L B, KIM H S, LEE J Y *et al.*. Scalable coating and properties of transparent flexible silver nanowire electrodes [J]. *ACS Nano*, 2010, 4(5): 2955-2963.
- [29] GHAEMI H F, THIO T, GRUPP D E *et al.*. Surface plasmons enhance optical transmission through subwavelength holes [J]. *Phys. Rev. B*, 1998, 58(11): 6779-6782.



王丽嫣(1995-),女,黑龙江哈尔滨人,硕士,2021年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事宽禁带半导体材料与器件的研究。

E-mail: 53681111@qq.com



陈星(1984-),男,湖北荆门人,博士,副研究员,硕士研究生导师,2012年于中国科学院大连化学物理研究所获得博士学位,主要从事宽禁带半导体光电材料与器件方面的研究。

E-mail: chenxing@ciomp.ac.cn



刘可为(1981-),男,辽宁铁岭人,博士,研究员,博士研究生导师,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事宽禁带半导体光电材料与器件方面的研究。

E-mail: liukw@ciomp.ac.cn