

小体积电压输出型 ZnO 惠斯通电桥式 紫外探测单元

郭小川^{1,2}, 彭文博^{1,2}, 蔡亚辉^{1,2}, 郭书文^{1,2}, 赵小龙^{1,2}, 贺永宁^{1,2}

(1. 西安交通大学微电子学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学微纳电子与系统集成重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对传统 ZnO 紫外光探测器无法直接输出电压传感信号而难以与后端信号处理芯片集成的问题, 提出并实现了一种小体积电压输出型 ZnO 惠斯通电桥式紫外探测单元。利用大功率射频磁控溅射 SiO₂ 钝化层时高能粒子轰击 ZnO 薄膜表面的方法增加了 ZnO 薄膜表面的氧空位缺陷浓度, 使 ZnO 光电导器件桥臂的紫外光响应电流获得近 2 个数量级的显著提升; 在 SiO₂ 钝化层上通过射频磁控溅射 ZnO 作为紫外线遮光层可大大减少 ZnO 光电导器件桥臂的暗场漏电流。遮光后 ZnO 光电导器件桥臂的紫外光响应电流显著降低至原先的 1/10; 所制备的 ZnO 电桥式紫外探测单元可将入射的紫外光信号直接转换为电压信号输出, 且可对 1 μ W~6 mW 跨 3 个数量级强度范围的紫外光进行响应, 响应度最高达 9 mV/ μ W, 紫外光可见光对比度为 143.8, 且整个单元体积小于 1 mm³。实验结果表明, 该 ZnO 电桥式紫外探测单元具有高响应度、宽响应范围、高紫外光可见光抑制比、可直接输出电压传感信号、体积小等优点, 可用于实现具有高集成度的 ZnO 紫外感算一体芯片。

关键词: ZnO; 惠斯通电桥; 紫外探测; 电压信号输出

中图分类号: TN36 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202201021 **文章编号:** 0253-987X(2022)01-0184-09



OSID 码

A ZnO Wheatstone Bridge Type UV Detection Unit with Small Volume and Voltage Output Capability

GUO Xiaochuan^{1,2}, PENG Wenbo^{1,2}, CAI Yahui^{1,2}, GUO Shuwen^{1,2},

ZHAO Xiaolong^{1,2}, HE Yongning^{1,2}

(1. School of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. The Key Lab of Micro-Nano Electronics and System Integration of Xi'an City, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the problem that traditional ZnO UV photodetectors are difficult to integrate with signal processing chips because photodetectors cannot output a voltage sensing signal directly, a ZnO Wheatstone bridge type UV detection unit with small volume and voltage output capability is proposed and realized. The concentration of oxygen vacancy defects on the surface of ZnO thin film can be dramatically increased through the high-energy ions impact during the high-power RF magnetron sputtering of SiO₂ passivation layer. As a result, the UV photoresponse current of the ZnO photoconductive device bridge arm is enhanced by about two orders of magnitude. Utilizing the RF magnetron sputtered ZnO on the SiO₂ passivation layer as the UV

收稿日期: 2021-05-06。 作者简介: 郭小川(1995—),男,硕士生;彭文博(通信作者),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 陕西省重点研发计划重点资助项目(S2018-YF-ZDGY-0542)。

网络出版时间: 2021-10-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20211012.1834.006.html>

light shielding layer, the dark leakage current of the ZnO photoconductive device bridge arm can be significantly decreased. After depositing ZnO UV light-shielding layer, the ZnO photoconductive device bridge arm's UV photoresponse current dramatically decreases to one tenth of that before deposition. The as-fabricated ZnO Wheatstone bridge type UV detection unit can directly convert input UV light signal to voltage signal output, with a broad UV light power sensing range of over three orders of magnitude from $1\ \mu\text{W}$ to $6\ \text{mW}$. The maximum responsivity of the detection unit can reach $9\ \text{mV}/\mu\text{W}$, with a UV-Vis block ratio as high as 143.8. Besides, the total volume of the detection unit is smaller than $1\ \text{mm}^3$. These results indicate that, the proposed ZnO Wheatstone bridge type UV detection unit has the advantages of high responsivity, broad UV light power sensing range, high UV-Vis block ratio, voltage output capability and small volume, and has great potential to realize highly integrated ZnO UV sensing-calculating integrated circuit chip.

Keywords: ZnO; Wheatstone bridge; UV detection; voltage signal output

ZnO 作为第三代宽禁带半导体,在光电器件方面拥有很高的开发价值^[1-8]。这种材料稳定性高,对环境友好,在声表面波、压电、湿敏、气敏和紫外光探测等领域均有所应用^[9-16]。在紫外光探测领域,ZnO 相比第一、二代半导体具备更宽的带隙,相比其他宽禁带半导体具有更高的激子束缚能,更适用于紫外线检测。目前,ZnO 紫外探测器按照器件结构主要分为结型器件和金属-半导体-金属(MSM)结构器件。MSM 器件依据金属和半导体的接触模式分为肖特基型和光电导型两类。结型器件依据是否有本征层也分为 pn 结型和 pin 结型两类。

王鼎渠等研究了由 Au/ZnO/Au 组成的肖特基型 MSM 器件,建立了肖特基型 MSM 器件结构的电子模型,解释了其 I - V 响应特性^[17]。Panda 等研究了 ZnO 薄膜的退火条件,制备了 Ag/ZnO/Ag 光电导型紫外探测器,观察到器件在室温下的光电特性受环境中水、氧吸附的影响,并利用半导体表面态原理予以解释^[18]。Dai 等利用 n 型 ZnO 和 Sb 掺杂的 p 型 ZnO 形成同质 pn 结型紫外探测器,器件具有良好的整流特性、3 300% 的紫外线灵敏度和快速的瞬态特性^[19]。Zhou 等研制了基于 n-ZnO 纳米棒/i-MgO/p-GaN 结构的自供电紫外光电探测器,器件具备良好的紫外光可见光抑制比,紫外光和可见光的响应度比为 34.5^[20]。目前绝大多数 ZnO 紫外探测器只能实现紫外光信号到电流输出信号的转换,鲜有报道可将紫外光信号转换为电压信号的 ZnO 器件。与电流输出信号相比,电压输出信号更便于后端模拟电路提取和处理,有利于紫外探测模块与集成电路处理模块的结合。

截至目前研究人员报导的能够输出电压信号的

ZnO 紫外光探测器主要有 2 种,分别是 ZnO 异质结器件^[21]和 ZnO 作为负载电阻的摩擦纳米发电器件^[22]。对于前者,构成 ZnO 异质结器件的另外一种材料通常为窄禁带材料,例如 Si、有机半导体聚合物、钙钛矿等,虽然该类器件能够利用光伏效应将入射的紫外光转换为电压信号输出,但其同时也会对可见光产生可观的、可比拟的电压信号,即该类器件的紫外光可见光对比度通常很低。对于后者,其基本原理是将 ZnO 作为一个紫外光敏感的光敏电阻使用,当有紫外光照射时 ZnO 负载电阻减小,此时摩擦纳米发电机的输出电压也会随之减小。但该类器件存在的问题是:①摩擦纳米发电机的体积通常较大,无法直接与后端信号处理电路芯片集成;②摩擦纳米发电机输出的电压信号幅值的变化范围通常很大,可从几百伏特变化至几个伏特,且输出的信号主要为脉冲电压信号,也不利于后端电路进行处理。

基于此,本文使用 ZnO MSM 光电导器件作为惠斯通电桥结构的桥臂,实现了可将紫外光信号转换为电压信号输出的 ZnO 电桥式紫外探测单元,紫外光可见光对比度为 143.8,整体体积小于 $1\ \text{mm}^3$,且能够对光强范围为 $1\ \mu\text{W}\sim 6\ \text{mW}$ 的紫外光进行响应。

1 ZnO 电桥式紫外探测单元制备与测试

1.1 ZnO MSM 光电导器件和 ZnO 电桥式紫外探测单元的制备

图 1 给出了 ZnO MSM 光电导器件和 ZnO 电桥式紫外探测单元结构与制备流程。图 1a 所示为

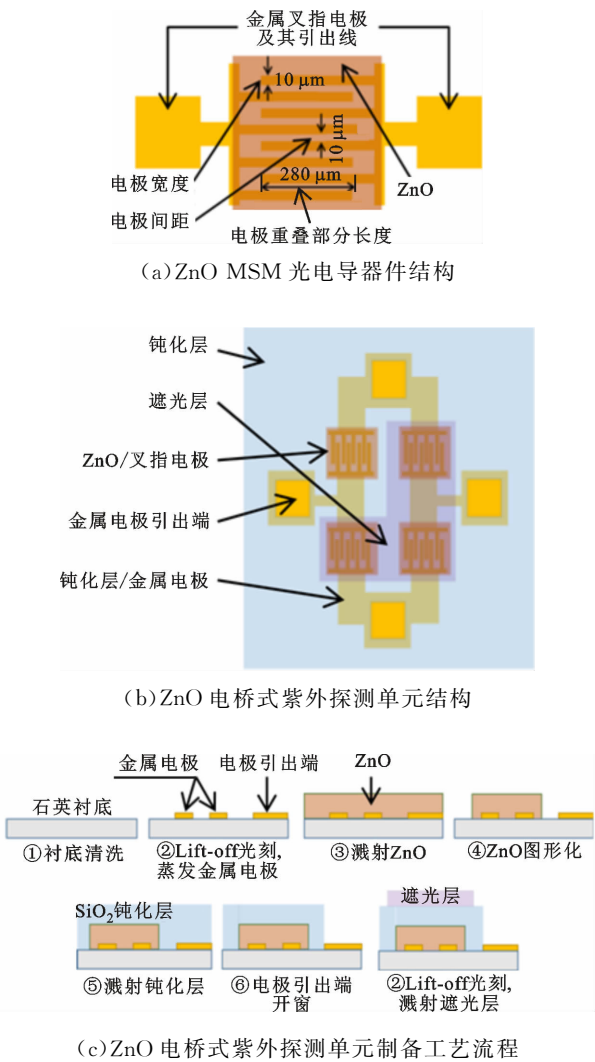


图 1 ZnO MSM 光电导器件和 ZnO 电桥式紫外探测单元结构与制备流程

Fig. 1 Structures and fabrication processes of ZnO MSM photoconductive device and ZnO bridge type UV detection unit

用以预先研究工艺流程和尺寸参数的分立 ZnO MSM 光电导器件,其叉指电极宽度和沟道长度 L 均为 $10\text{ }\mu\text{m}$,单个沟道的宽度 W_0 为 $280\text{ }\mu\text{m}$,共有 4 对叉指电极,则整个光电导器件的宽长比为 $1\text{ }960/10$ 。如图 1b 所示为 ZnO 电桥式紫外探测单元的平面示意图,与分立 ZnO MSM 光电导器件的结构相比,为了采用 4 个 ZnO MSM 光电导器件实现惠斯通电桥结构,将原本 ZnO MSM 光电导器件左右两侧的方形电极引出端去掉,通过更粗的金属汇流条将 4 个 ZnO MSM 光电导器件依次串联在一起,并在每 2 个 ZnO MSM 光电导器件之间设计了惠斯通电桥的 4 个方形电极引出端,上、下 2 个分别接电源电压和地,左、右 2 个作为电桥的电压信号输出端。

惠斯通电桥桥臂上 ZnO MSM 光电导器件的电极宽度、沟道长度、叉指电极数与分立 ZnO MSM 器件的对应参数均保持一致,只有沟道宽度 W_0 减小为 $100\text{ }\mu\text{m}$,以节约整个 ZnO 电桥式紫外探测单元芯片所占的面积。

ZnO 电桥式紫外探测单元采用与分立 ZnO MSM 器件完全一致的制备工艺流程,如图 1c 所示。①将石英衬底在丙酮、乙醇和超纯水中按序超声清洗干净;②通过 Lift-off 光刻和电子束蒸发工艺在石英衬底上制备金属叉指电极,由下至上依次为 Ni、Au 和 Ti;③通过射频磁控溅射工艺制备 ZnO 功能层,与金属 Ti 形成欧姆接触;④通过光刻和稀盐酸湿法刻蚀,使 ZnO 薄膜图形化;⑤通过射频磁控溅射工艺制备 SiO_2 钝化层;⑥通过光刻和 BOE 湿法刻蚀 SiO_2 进行电极接触口开窗;⑦通过 Lift-off 光刻和射频磁控溅射工艺制备 ZnO 遮光层;由此得到分立的 ZnO MSM 器件和 ZnO 电桥式紫外探测单元。

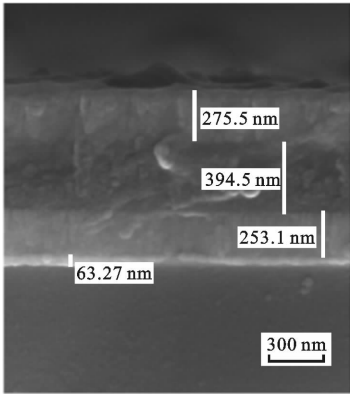
1.2 器件垂直结构、ZnO 薄膜的表征以及探测器件/单元的测试

使用 S-4800 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察器件的垂直结构。使用 Bruker D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪 (XRD) 表征 ZnO 薄膜晶向。使用型号 PE Lambda950 的紫外可见分光光度计来测试薄膜的紫外可见透射谱。由 DPSS-ZL 型紫外激光器提供波长 360 nm 的紫外线,使用 Agilent B2902A 双通道源表和 Keithley 6514 静电计测试 ZnO MSM 光电导器件和 ZnO 电桥式紫外探测单元的紫外响应特性。

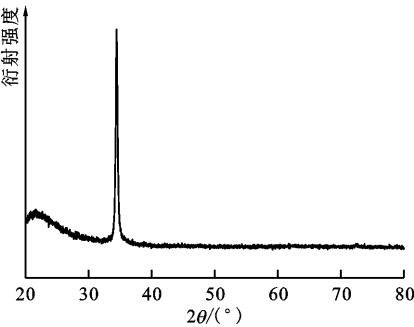
2 ZnO MSM 光电导器件和 ZnO 电桥式紫外探测单元特性表征及测试结果与讨论

2.1 器件结构和 ZnO 薄膜特性表征

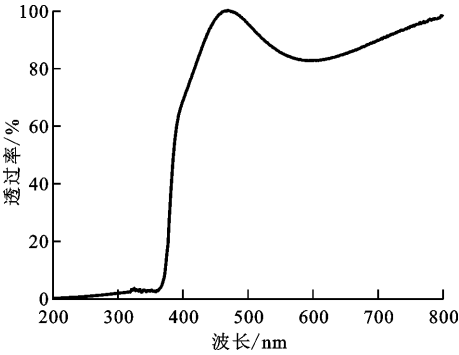
图 2 给出了 ZnO 电桥与 ZnO 薄膜的表征结构。如图 2a 所示, Ni、Au、Ti 金属电极总厚度约为 63 nm , ZnO 薄膜的厚度约为 253 nm , SiO_2 钝化层厚度约为 395 nm , ZnO 遮光层厚度约为 276 nm , 器件总厚度约为 $1\text{ }\mu\text{m}$, 且 ZnO 薄膜、 SiO_2 钝化层和 ZnO 遮光层都整齐致密。如图 2b 所示为 ZnO 薄膜的 XRD 结果,可见 ZnO 薄膜的主衍射峰位于 34.3° 附近,说明本文溅射得到的 ZnO 薄膜沿 c 轴择优生长。ZnO 薄膜的透射谱如图 2c 所示,可以看到 ZnO 薄膜的吸收带边在 370 nm 左右。当波长为



(a) 电极/ZnO/钝化层/遮光层的 SEM 图



(b) ZnO 薄膜 XRD 结果



(c) ZnO 薄膜的紫外可见光透射谱

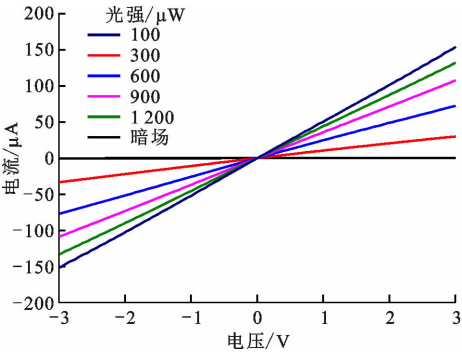
图 2 ZnO 电桥与 ZnO 薄膜的表征结果

Fig. 2 Characterization results of the ZnO bridge and ZnO film

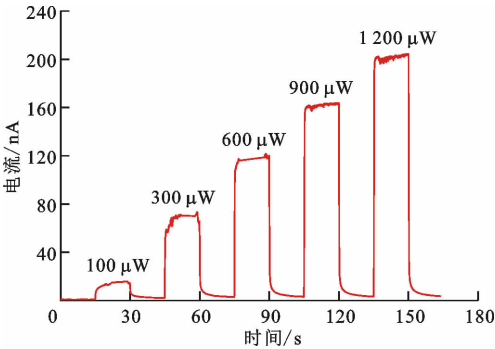
200~400 nm 时,平均透过率约为 8%;而当波长为 400~800 nm 时,平均透过率约为 90%,表明 ZnO 薄膜可以吸收紫外线而对可见光几乎为透明状态。

2.2 钝化前 ZnO MSM 光电导器件的紫外光响应特性

图 3 给出了 SiO₂ 钝化前 ZnO MSM 光电导器件在不同光强紫外光照射下的输出特性。如图 3a 所示为在 SiO₂ 钝化前 ZnO MSM 光电导器件的 *I*-*V* 特性曲线,包括了暗场、100、300、600、900 和 1 200 μW 共 6 档光强。可以观察到 *I*-*V* 特性曲线



(a) *I*-*V* 特性



(b) *I*-*t* 特性

图 3 SiO₂ 钝化前 ZnO MSM 光电导器件在不同光强紫外光照射下的输出特性

Fig. 3 The output properties of the ZnO MSM photoconductive device under UV illumination with different powers before SiO₂ passivation

为线性对称,反映了 ZnO 与叉指电极之间具有良好的欧姆接触,并且 ZnO MSM 光电导器件的紫外光响应电流随紫外光强度的增强而逐渐增加。图 3b 所示为 ZnO MSM 光电导器件在不同强度紫外光照射下的瞬态 *I*-*t* 特性曲线,可以看到器件的紫外光响应电流同样随紫外光强度的增强而逐步增加,与 *I*-*V* 特性曲线的测试结果保持一致,且在持续光照下器件的电流很快上升到达稳定。在 3.3 V 偏置电压条件下,ZnO MSM 光电导器件的暗电流约为 0.8 nA;在 600 μW 360 nm 紫外光照射条件下,紫外光响应电流约为 121 nA,器件的明暗电流比约为 151.3。

2.3 钝化后 ZnO MSM 光电导器件的紫外光响应特性

图 4 给出了 SiO₂ 钝化后 ZnO MSM 光电导器件在不同光强紫外光照射下的输出特性。如图 4a 和图 4b 所示,在射频磁控溅射 SiO₂ 钝化之后 ZnO MSM 光电导器件依然保持良好的欧姆接触特性。与钝化前相比较,在 3.3 V 偏置电压下暗电流增至

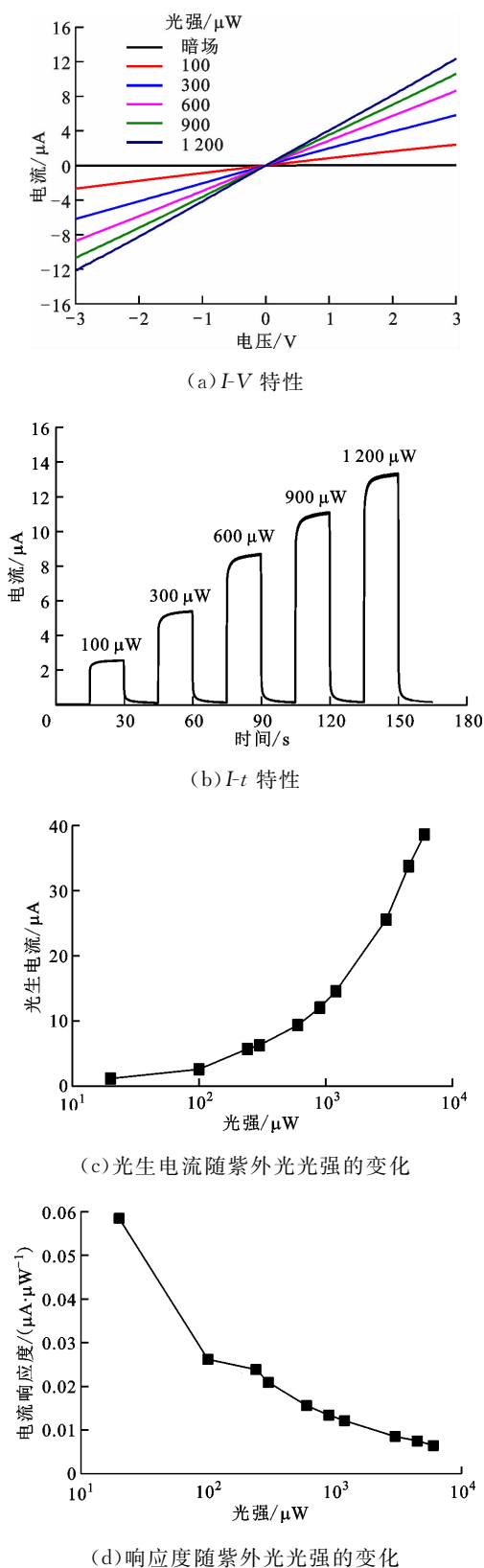


图4 SiO_2 钝化后 ZnO MSM 光电导器件在不同光强紫外光照射下的输出特性

Fig. 4 The output properties of the ZnO MSM photoconductive device under UV illumination with different powers after SiO_2 passivation

23 nA;而在 $600 \mu\text{W}$ 360 nm 紫外光照射下器件紫外光响应电流增至 $8.7 \mu\text{A}$,明暗电流比由 151.3 提升至 378.3。

通常将器件电流从光生电流,即光场电流减去暗场电流的 10% 上升至 90% 的时间定义为器件的响应时间^[23]。对比图 3b 和图 4b 可知, SiO_2 钝化后器件的响应时间变长,由 430 ms 变为 860 ms。这主要是由于在 SiO_2 钝化层的溅射过程中改变了 ZnO 薄膜的点缺陷浓度导致的。在 ZnO 半导体内存在深能级氧空位缺陷为施主型表面态,类似于施主杂质^[24]。 SiO_2 钝化层的制备工艺使用的是射频磁控溅射,当磁控溅射的粒子沉积到 ZnO 薄膜表面时具有较高的能量,从而改变了 ZnO 薄膜表面附近 Zn 和 O 元素的比例,使得 ZnO 薄膜表面的氧空位缺陷浓度上升^[25],暗场和紫外光照射下器件的电导率均有所上升。

对于 ZnO MSM 光电导器件的紫外光瞬态响应特性来说,在紫外光照射 ZnO 薄膜时,其光电导主要由体效应和缺陷态两部分贡献。体效应是电子从价带激发到导带的过程,是一个快响应过程。对于氧空位缺陷来说,当 ZnO 薄膜在紫外光照射下产生光生电子空穴对,氧空位缺陷会俘获光生空穴,而留下的光生电子则会显著提升 ZnO MSM 光电导器件的电导率,这是一个由氧空位缺陷浓度和空穴俘获系数共同决定的慢过程^[26]。由于在射频磁控溅射制备 SiO_2 钝化层时使得 ZnO 薄膜表面的氧空位缺陷浓度增加,则在钝化后 ZnO 薄膜表面由缺陷态贡献的光电导比例增大,紫外光响应的慢过程更加显著,因此器件的紫外光响应速度变慢。

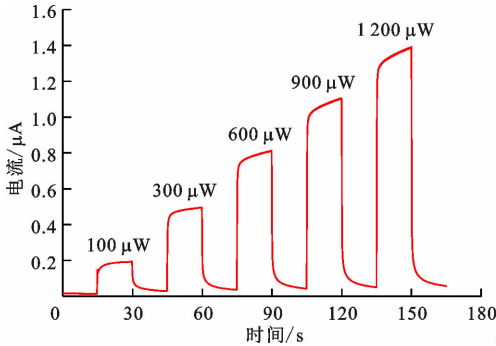
如图 4c 和图 4d 所示,光生电流随着紫外光强度增强而变大,最大可达到约 $40 \mu\text{A}$ 。器件响应度则与紫外光强度形成反比关系,当光强大于 1 mW 时,响应度已小于 $0.01 \mu\text{A}/\mu\text{W}$ 。这是因为 ZnO MSM 光电导器件在弱光区和强光区,光生载流子浓度与光强成线性正比,响应度为常数。在由弱光向强光的过渡区域,光生载流子与光强呈现为幂函数关系,响应度随光强增加而降低^[27]。

2.4 遮光后 ZnO MSM 光电导器件的紫外光响应特性

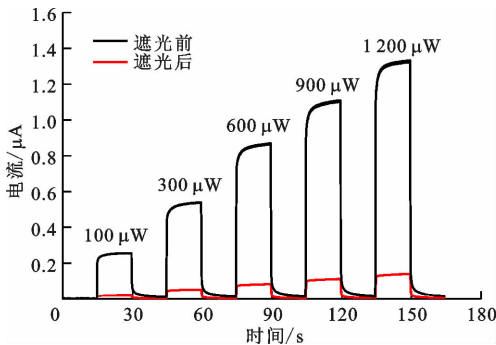
采用金属作为紫外线遮光层,在 SiO_2 钝化层上分别通过热蒸发金属铝和银制备了结构为金属遮光层/ SiO_2 钝化层/ ZnO MSM 光电导的器件,其测试结果表明:在制备了金属遮光层后器件的暗场漏电流大幅增加至毫安量级,使暗场条件下惠斯通电桥

的 4 个桥臂严重失衡,电桥的输出电压信号直接上拉至电源电压,无法正常工作。这可能是由于金属通过 SiO₂ 钝化层晶界扩散至底部 ZnO 薄膜表面所致,因此拟通过射频磁控溅射 ZnO 作为紫外线遮光层。

图 5 给出了遮光后 ZnO MSM 光电导器件的紫外光响应特性。如图 5a 所示为 ZnO MSM 光电导器件在制备了 ZnO 遮光层之后的瞬态 $I-t$ 响应特性,由图 5a 可以看出,在制备了 ZnO 遮光层后,器件仍然有微弱的紫外光响应特性,但其紫外光响应电流约为遮光前的 1/10,如图 5b 所示。这可能是由于 ZnO 遮光层并未完全吸收入射的紫外光所致,也有可能是 ZnO 遮光层吸收紫外光照射后产生的光生载流子通过 ZnO 遮光层和 SiO₂ 钝化层的晶界扩散至 ZnO MSM 光电导器件中所致。后续将对 ZnO 遮光层开展进一步研究,以期获得更优异的遮光效应。



(a) 遮光后器件的 $I-t$ 特性

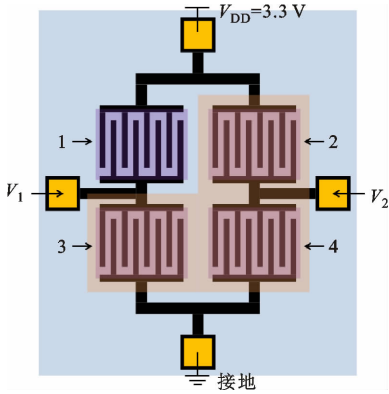


(b) 遮光前后器件的 $I-t$ 特性对比

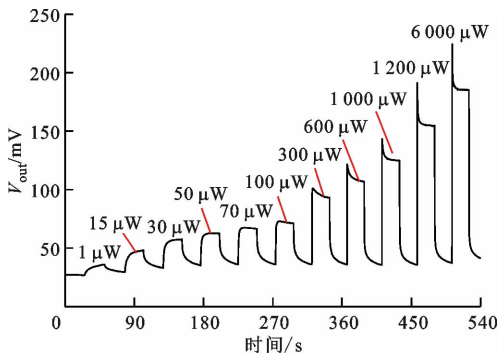
图 5 遮光后 ZnO MSM 光电导器件的紫外光响应特性
Fig. 5 The characteristics of the ZnO MSM photoconductive device's UV responses after depositing ZnO light-shielding layer

2.5 ZnO 电桥式紫外探测单元的紫外光响应特性

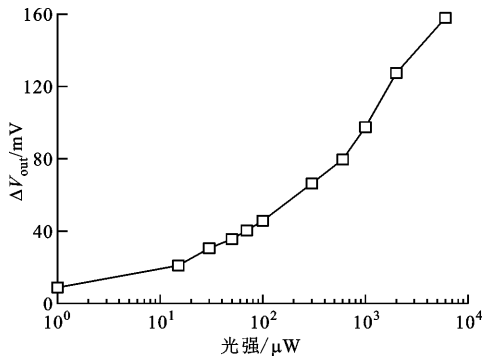
图 6 给出了 ZnO 电桥式紫外探测单元的工作原理和紫外光响应特性。如图 6a 所示为 ZnO 电桥式紫外探测单元的工作原理示意图,在其上下两个



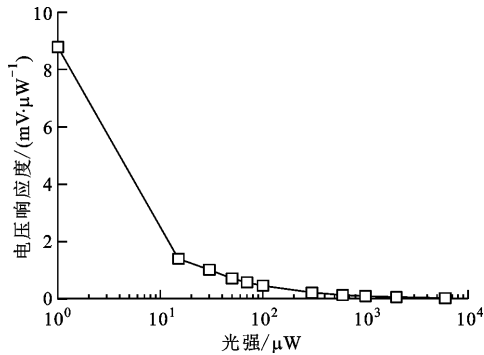
(a) ZnO 电桥式紫外探测单元工作原理



(b) $V-t$ 特性



(c) 光生电压-光强特性



(d) 电压响应度-光强特性

图 6 ZnO 电桥式紫外探测单元的紫外光响应特性
Fig. 6 Characteristics of the ZnO bridge type UV detection unit's UV responses

金属电极之间外接偏置电压为 3.3 V 的直流电压源,而左右两个金属电极 V_1 和 V_2 则分别为探测单元的输出电压信号 V_{out} 的正端和负端,即

$$V_{out} = V_1 - V_2 \quad (1)$$

在暗场条件下 V_{out} 为固定值 $V_{out,dark}$,即

$$V_{out,dark} = V_1 - V_2 \quad (2)$$

在紫外光照射条件下,如图 6a 所示,2、3 和 4 号 ZnO MSM 光电导器件上由于有 ZnO 遮光层吸收紫外光照,故其电阻仅发生一个很微小的变化;而 1 号 ZnO MSM 光电导器件上由于没有 ZnO 遮光层吸收紫外光照,则在受到紫外光照后其电阻会大幅下降,使 3 号 ZnO MSM 光电导器件上的分压变大,由 V_1 增大为 V'_1 。由于 2 号和 4 号 ZnO MSM 光电导器件的电阻比例基本保持不变,即 V_2 基本保持不变。此时紫外光照下输出电压信号为

$$V_{out,light} = V'_1 - V_2 > V_{out,dark} \quad (3)$$

由此即通过该 ZnO 电桥式紫外探测单元成功地实现了从紫外光信号到电压输出信号的转换。

如图 6b 所示为 ZnO 电桥式紫外探测单元的输出电压在不同强度紫外光照射条件下的瞬态 $V-t$ 响应特性,每个紫外光照周期外加的紫外光强逐渐增强,范围为 $1 \mu W \sim 6 mW$ 。测试结果表明,随着紫外光光强的增加,ZnO 电桥式紫外探测单元的输出电压也单调增加。将光生电压定义为

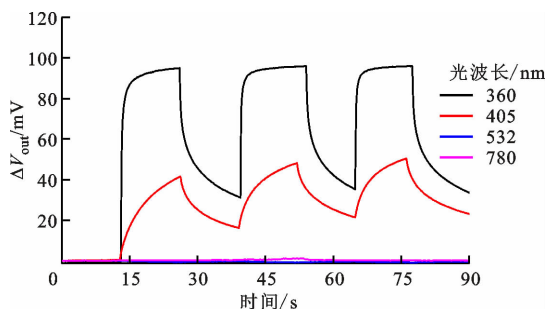
$$\Delta V_{out} = V_{out,light} - V_{out,dark} \quad (4)$$

则 ZnO 电桥式紫外探测单元的电压响应度为

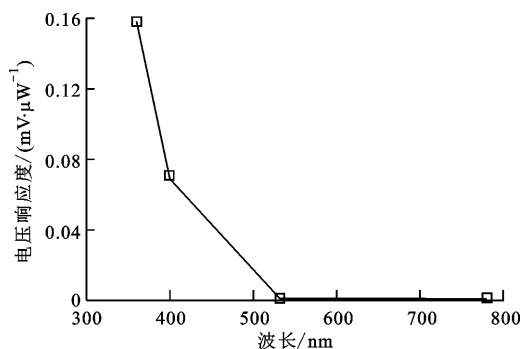
$$R = \Delta V_{out} / P \quad (5)$$

如图 6c 和图 6d 所示分别为 ZnO 电桥式紫外探测单元的光生电压和响应度随紫外光照强度的关系,光生电压随着紫外光照强度的增加而增加,在 $1 \mu W$ 和 $6 mW$ 紫外光照下分别约为 10 mV 和 160 mV 左右。响应度则随着紫外光强度的增加而减小,与分立器件一致,最高可达约 $9 mV/\mu W$ 。

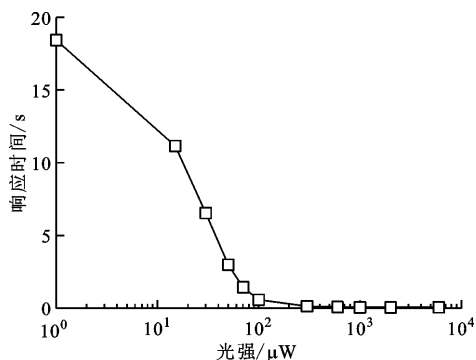
图 7 给出了 ZnO 电桥式紫外探测单元在不同波长光照射下的光电特性。图 7a 和图 7b 所示分别为 ZnO 电桥式紫外探测单元在不同波长光照射下的瞬态 $\Delta V_{out}-t$ 响应特性和对应的响应度随波长的变化。由图 7 可以看出,ZnO 电桥式紫外探测单元对 360 nm 紫外光的响应最好;405 nm 属于蓝紫光,可能通过 ZnO 材料中的缺陷激发生载流子,因此也具有一定的响应;对于 532 nm 绿光和 780 nm 近红外光,ZnO 电桥式紫外探测单元则几乎没有响应。以 $600 \mu W$ 的 360 nm 紫外光和 532 nm 可见光为例,紫外光响应度和可见光响应度比高达 143.8。



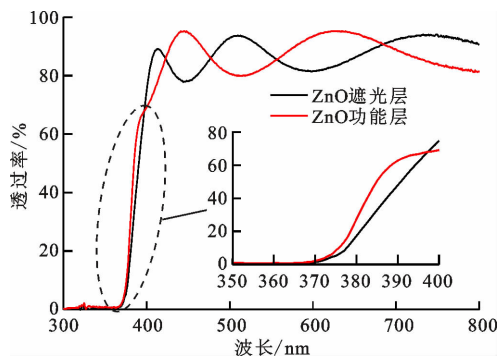
(a) 不同波长光照射下的 $\Delta V_{out}-t$ 瞬态特性



(b) 响应度随波长的变化



(c) 响应时间随光强的变化



(d) ZnO 遮光层和 ZnO 功能层的透光率

图 7 ZnO 电桥式紫外探测单元在不同波长光照下的光电特性

Fig. 7 The optoelectronic characteristics of the ZnO bridge type UV detection unit

图 7c 所示为 ZnO 电桥式紫外探测单元的响应时间随紫外光光强的变化,可以看出,ZnO 电桥式紫外探测单元的响应速度与光强相关。当光强弱于 $100\ \mu\text{W}$ 时,响应时间较长约为几秒至十几秒;而当光强大于等于 $100\ \mu\text{W}$ 时,响应时间较短,均小于 1 s。这可能是由于 SiO_2 钝化层的溅射过程使得 ZnO MSM 器件的 ZnO 沟道层中氧空位等深能级缺陷的数目大幅增加所致;当紫外光强较弱时,单位时间内产生的光生载流子数有限,需要一定的时间才能够通过光生空穴将氧空位深能级缺陷填补,因此响应时间较长;当紫外光强较强时,单位时间内产生了足够多的光生载流子,就能够在较短的时间内通过光生空穴将氧空位深能级缺陷填补,因此响应时间较短。如图 7d 所示为 ZnO 遮光层和 ZnO 功能层的紫外可见透射谱,ZnO 电桥式紫外探测单元的截止波长可近似由它们的紫外光可见光透射谱的吸收带边决定。由图 7d 可以看出,ZnO 遮光层和 ZnO 功能层在 $300\sim 400\ \text{nm}$ 波长范围内的紫外光可见光透射谱相差很小,而 ZnO 遮光层的吸收带边约为 $375\ \text{nm}$,因此可近似认为 ZnO 电桥式紫外探测单元的截止波长约为 $375\ \text{nm}$ 。

3 结 论

本文实现了一种可将紫外光信号转换为电压输出信号的 ZnO 电桥式紫外探测单元。该探测单元采用了惠斯通电桥结构,每个桥臂均为光电导型 ZnO MSM 器件。整个 ZnO 电桥式紫外探测单元的体积小于 $1\ \text{mm}^3$,在偏置电压为 $3.3\ \text{V}$ 的条件下,ZnO 电桥式紫外探测单元能够对光强范围为 $1\ \mu\text{W}\sim 6\ \text{mW}$ 、波长为 $360\ \text{nm}$ 的紫外光进行响应,且输出电压信号随着紫外光光强的增加而单调增加。本文研究结果表明,ZnO 电桥式紫外探测单元具有良好的紫外光响应特性,能够在宽范围紫外光强下连续可变地输出电压信号,且体积小、易于与后端处理电路集成,有望实现具有高集成度的 ZnO 紫外感算一体芯片。

参考文献:

- [1] 莫小明. 低维 ZnO 异质结发光二极管研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2014: 6-12.
- [2] WANG Xingfu, DAI Yejing, LIU Ruiyuan, et al. Light-triggered pyroelectric nanogenerator based on a pn-junction for self-powered near-infrared photosensing [J]. ACS Nano, 2017, 11(8): 8339-8345.
- [3] WANG Baoyu, ZHU Yu, DONG Jianqi, et al. Self-powered, superior high gain silicon-based near-infrared photosensing for low-power light communication [J]. Nano Energy, 2020, 70: 104544.
- [4] CHEN Liang, WANG Baoyu, DONG Jianqi, et al. Insights into the pyro-phototronic effect in p-Si/n-ZnO nanowires heterojunction toward high-performance near-infrared photosensing [J]. Nano Energy, 2020, 78: 105260.
- [5] PENG Wenbo, WANG Xingfu, YU Ruomeng, et al. Enhanced performance of a self-powered organic/inorganic photodetector by pyro-phototronic and piezo-phototronic effects [J]. Advanced Materials, 2017, 29(23): 1606698.
- [6] PENG Wenbo, YU Ruomeng, WANG Xingfu, et al. Temperature dependence of pyro-phototronic effect on self-powered ZnO/perovskite heterostructured photodetectors [J]. Nano Research, 2016, 9(12): 3695-3704.
- [7] PATEL M, KIM J. Transparent NiO/ZnO heterojunction for ultra-performing zero-bias ultraviolet photodetector on plastic substrate [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 729: 796-801.
- [8] LIU Jia, LIU Fengjing, LIU Haining, et al. Mixed-dimensional CsPbBr₃@ZnO heterostructures for high-performance p-n diodes and photodetectors [J]. Nano Today, 2021, 36: 101055.
- [9] 彭文博, 贺永宁, 赵小龙, 等. 声表面波 ZnO 薄膜紫外探测器的响应机制研究 [J]. 压电与声光, 2014, 36(1): 12-15.
PENG Wenbo, HE Yongning, ZHAO Xiaolong, et al. Investigation of response mechanism for ZnO thin film based surface acoustic wave ultraviolet detector [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(1): 12-15.
- [10] PAN Zijian, PENG Wenbo, LI Fangpei, et al. Carrier concentration-dependent piezotronic and piezo-phototronic effects in ZnO thin-film transistor [J]. Nano Energy, 2018, 49: 529-537.
- [11] LI Peng, YU Shuguo, ZHANG Hongyan. Preparation and performance analysis of Ag/ZnO humidity sensor [J]. Sensors, 2021, 21(3): 857.
- [12] AHN M W, PARK K S, HEO J H, et al. Gas sensing properties of defect-controlled ZnO-nanowire gas sensor [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(26): 263103.
- [13] HE Yongning, ZHANG Wen, ZHANG Songchang, et al. Study of the photoconductive ZnO UV detector

- based on the electrically floated nanowire array [J]. *Sensors and Actuators: A Physical*, 2012, 181: 6-12.
- [14] PENG Wenbo, HE Yongning, WEN Changbao, et al. Surface acoustic wave ultraviolet detector based on zinc oxide nanowire sensing layer [J]. *Sensors and Actuators: A Physical*, 2012, 184: 34-40.
- [15] LI Fangpei, PENG Wenbo, PAN Zijian, et al. Rationally designed piezoelectric charge polarity at interfaces for largely improving photodiode performance by piezo-phototronic effects [J]. *Journal of Materials Chemistry: C*, 2020, 8(45): 16057-16066.
- [16] SOCI C, ZHANG A, XIANG B, et al. ZnO nanowire UV photodetectors with high internal gain [J]. *Nano Letters*, 2007, 7(4): 1003-1009.
- [17] WANG Dingqu, ZHOU Zhaoying, ZHU Rong, et al. Electrical characteristics and optoelectronic properties of metal-semiconductor-metal structure with zinc oxide nanowires across Au electrodes [J]. *Chinese Physics: B*, 2008, 17(10): 3875-3879.
- [18] PANDA S K, JACOB C. Preparation of transparent ZnO thin films and their application in UV sensor devices [J]. *Solid-State Electronics*, 2012, 73: 44-50.
- [19] DAI Wen, PAN Xinhua, CHEN Shanshan, et al. ZnO homojunction UV photodetector based on solution-grown Sb-doped p-type ZnO nanorods and pure n-type ZnO nanorods [J]. *RSC Advances*, 2014, 5(9): 6311-6314.
- [20] ZHOU Hai, GUI Pengbin, YU Qiheng, et al. Self-powered, visible-blind ultraviolet photodetector based on n-ZnO nanorods/i-MgO/p-GaN structure light-emitting diodes [J]. *Journal of Materials Chemistry: C*, 2015, 3(5): 990-994.
- [21] WANG Zhaona, YU Ruomeng, WANG Xingfu, et al. Ultrafast response p-Si/n-ZnO heterojunction ultraviolet detector based on pyro-phototronic effect [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(32): 6880-6886.
- [22] CHENG Li, ZHENG Youbin, XU Qi, et al. A light sensitive nanogenerator for self-powered UV detection with two measuring ranges [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(1): 1600623.
- [23] 祁晓萌, 彭文博, 赵小龙, 等. 基于高阻 ZnO 薄膜的光电导型紫外探测器 [J]. *物理学报*, 2015, 64(19): 198501.
- QI Xiaomeng, PENG Wenbo, ZHAO Xiaolong, et al. Photo conductive UV detector based on high-resistance ZnO thin film [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(19): 198501.
- [24] 贺永宁, 朱长纯, 侯洵. ZnO 宽带隙半导体及其基本特性 [J]. *功能材料与器件学报*, 2008, 14(3): 566-574.
- HE Yongning, ZHU Changchun, HOU Xun. Recent advances in characteristics of ZnO semiconductor [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2008, 14(3): 566-574.
- [25] 王云华, 高欣, 周路, 等. 溅射 ZnO 薄膜钝化 GaAs 表面性能的研究 [J]. *光电子·激光*, 2013, 24(9): 1727-1732.
- WANG Yunhua, GAO Xin, ZHOU Lu, et al. Study on surface passivation of GaAs substrates with ZnO films deposited using RF sputtering [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(9): 1727-1732.
- [26] DAN Yaping. Optoelectronically probing the density of nanowire surface trap states to the single state limit [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(5): 053117.
- [27] 赵小龙. ZnO 半导体 X 射线探测器件研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2017: 88-90.

(编辑 武红江)