

文章编号: 1000-7032(2024)02-0343-08

掺银硫系玻璃光电探测器响应波长特性研究

吕松竹¹, 赵建行^{1*}, 周 姚¹, 曹英浩¹, 宋瑛林², 周见红^{1,3*}

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 哈尔滨工业大学 物理学院, 哈尔滨 黑龙江 150001;

3. 长春理工大学 光电测量和光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 由于硫系玻璃具有良好的光学性质, 在非线性光学等方面研究广泛, 但基于硫系玻璃光电探测器的相关研究却很少。本文利用真空共热蒸发技术制备了不同掺银比例的硫系玻璃薄膜作为半导体膜层结构, 并设计构建了金属-绝缘体-半导体结构的自供电光电探测器, 探究了该光电探测器的响应光谱范围。结果表明, 该探测器对可见光到近红外区域的光均有响应。针对掺银硫系玻璃光电探测器在 635 nm 波长激光下, 研究了探测器响应电压与激发功率之间的关系。当激光功率小于 10 mW 时, 探测器响应电压与激发功率线性相关; 当激光功率大于 10 mW 时, 探测器响应电压逐渐饱和。探测器的上升和衰减时间分别为 3.932 s 和 1.522 s。本研究为硫系玻璃材料在自供电光电探测器领域的应用提供了证明。

关键词: 硫系玻璃; 光电探测器; 金属-绝缘体-半导体

中图分类号: TN304 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20230276

Response Wavelength Characterization of Ag-doped Chalcogenide Glass Photodetectors

LYU Songzhu¹, ZHAO Jianxing^{1*}, ZHOU Yao¹, CAO Yinghao¹, SONG Yinglin², ZHOU Jianhong^{1,3*}

(1. School of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Physics Department, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding Authors, E-mail: zjx@cust.edu.cn; zjh@cust.edu.cn

Abstract: Due to the excellent optical properties of chalcogenide glasses, they have been extensively investigated in nonlinear optics and other fields, but there is little research based on chalcogenide glass photodetectors. In this paper, we used vacuum co-thermal evaporation technology to prepare chalcogenide glass thin films with different silver doped ratios as semiconductor film structure, and designed a self-powered photodetector based on the MIS structure of chalcogenide glass thin films with different silver doped ratios. The response spectrum range of the photodetector was studied, and the results showed that the detector was responsive to light from visible to near infrared regions. The relationship between the response voltage and excitation power was researched for the silver doped chalcogenide glass at 635 nm wavelength laser. For the laser power was less than 10 mW, the response voltage of the photodetector was linearly related to the excitation power. For the laser power was higher than 10 mW, the response voltage of the photodetector appears saturation phenomenon. Moreover, the photodetector exhibits fast light response speed, with rise time and decay time of 3.932 s and 1.522 s, respectively. This study indicates that the chalcogenide glass is a promising method for self-powered photodetectors.

Key words: chalcogenide glass; photodetector; metal-insulator-semiconductor

收稿日期: 2023-11-03; 修订日期: 2023-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(12274042); “111”计划(D21009, D17017)

Supported by National Natural Science Foundation of China(12274042); “111” Project of China(D21009, D17017)

1 引 言

光电探测器发展至今,由于其独特的光电转换特性,在军事、医疗、航空航天等诸多领域都有着广泛的应用^[1-4]。基于不同材料制备的光电探测器的探测范围可以从紫外区域到可见光区域甚至红外区域。光电探测器所使用的材料也已经从最开始的第一代半导体材料硅基、锗基^[5-6],发展到铅锡、Ⅲ-V族及Ⅱ-VI族化合物、锗掺杂等第二代半导体材料^[7-8],再到利用掺杂的砷化镓(GaAs)、铝砷化镓(AlGaAs)等第三代半导体材料^[9-10]。这些光电探测器具有灵敏度高、稳定性好、可靠性强等优点^[11],但它们却也存在着成本高、外延生长工艺复杂等缺点^[12-13]。此外,光电探测器材料不仅仅局限于无机化合物,也有研究利用有机钙钛矿^[14-15]等有机化合物构筑成新型光电探测器。但是,由于该类型的光电探测器在室温环境下稳定性较差、制备工艺繁琐,限制了其在光电探测器领域的进一步发展。相比之下,硫系玻璃材料具有稳定性好、制备工艺简单等优点,有望应用到光电探测器领域。硫系玻璃是一种基于硫族元素硫(S)、硒(Se)和碲(Te)并通过掺杂如锗(Ge)、砷(As)、锑(Sb)等其他元素所形成的非晶态物质。其中,Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀(GSS)硫系玻璃材料具有宽的光谱吸收范围。由于其独特的光学性质,在截止波长后对于近红外区域仍有吸收,这使得硫系玻璃材料在非线性光学、红外成像等方面得到了广泛研究^[16-17]。但目前,硫系玻璃材料在光电探测器领域的研究却很少。此外,相比于常用的可见光材料硅而言^[18-19],硫系玻璃材料在紫光区域仍可保持相对高的吸收强度。

光电探测器按结构划分,最为常见的是利用半导体p-n结制成的PN结型光电探测器,PN结型光电探测器^[20]相对来说性能较弱,灵敏度较低,暗电流较大。而在p-n结中加上一层本征半导体(Intrinsic,称为I层)制作而成的PIN型光电探测器相对于PN结型光电探测器来说具有高灵敏度、低噪声等优点^[21]。除了这两种类型的光电探测器外,还有肖特基型光电探测器,其利用肖特基势垒,可以有效降低暗电流,提升光电探测器的外量子效率^[22-23]。而金属-绝缘体-半导体(Metal-insulator-semiconductor, MIS)结构是在利用肖特基接触的金属-半导体(Metal-semiconductor, MS)结构中

增加一层超薄的绝缘层夹层^[24-25],使得其比MS结构器件具有更低的暗电流、更高的肖特基势垒高度^[26-27]等优点,被广泛应用于光电探测器^[28]、太阳能电池^[29]等光电器件中。

本文设计并制备了一种基于不同掺银(Ag)比例的GSS硫系玻璃MIS结构的自供电光电探测器。首先,对其进行光谱响应范围研究,结果证明该光电探测器在可见光区域到近红外区域均有响应,且掺Ag的GSS硫系玻璃薄膜光电探测器与纯GSS薄膜光电探测器相比,在波长为980 nm处电压响应幅度有所增强。同时,进一步研究了Ag与GSS原子比例为10:90的光电探测器在不同波长下的电压响应幅度。此外,在波长为635 nm激光器照射下,当激发功率小于10 mW时,光电探测器响应电压与激发功率呈现线性关系;而当激发功率大于10 mW时,光电探测器响应电压逐渐趋于饱和。该光电探测器相对于真空等测量环境测量的光电探测器来说,其在室温下可以表现出相对良好的稳定性和快速的光响应,其上升和衰减时间分别为3.932 s和1.522 s。该光电探测器具有制备工艺简单、覆盖范围更广、安全系数更高、更环保等优点,有望在自供电光电探测器领域得到应用。

2 实 验

2.1 器件制备

采用镀有氧化铟锡(Indium tin oxides, ITO)的玻璃基板作为该样品的基底,面积为30 mm×30 mm,厚度为1.1 mm。在样品制作前,需对ITO基底进行清洗。为了除去ITO基底表面灰尘,先使用大量去离子水进行冲洗,再依次放入丙酮、无水乙醇和去离子水溶液中分别超声清洗5 min。之后,使用氮气吹干。随后,将清洗干净的ITO基片转移到加拿大Angstrom Engineering公司镀膜机中进行后续结构的制备。

首先,使用真空共热蒸发技术在ITO正面蒸镀一层300 nm厚的不同掺Ag比例的GSS薄膜,其中通过控制Ag和GSS材料的蒸发速率来调节Ag的掺杂比例。然后,在掺Ag的GSS薄膜上表面使用电子束蒸发技术制备8 nm的SiO₂薄膜。最后,使用热蒸发技术制备顶部120 nm厚的Ag膜。最终样品结构示意图如图1所示,其中顶部Ag膜既作为顶部电极也作为MIS结构中的金属层。

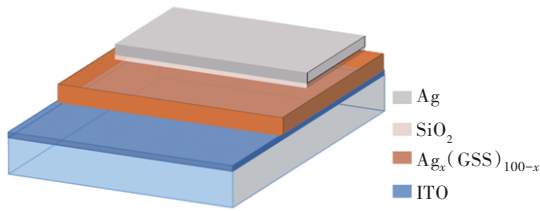


图 1 光电探测器样品结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the sample structure of the photodetector

2.2 器件表征

采用 V05.03.00 型场发射扫描电子显微镜 (Scanning electron microscope, SEM) 对所制备的不同掺杂比例的 GSS 薄膜进行能谱 (Energy dispersive spectrometer, EDS) 检测, 得到膜层的具体元素成分比例。采用岛津 UV-3150 型紫外-可见分光光度计对所制备不同掺杂比例的 GSS 薄膜进行吸收光谱表征, 测试范围为 400~1 200 nm, 测试步长为 10 nm。

将 Keithley 6500 数字源表及 IT 2806 数字源表负极与所制备的 MIS 结构光电探测器 ITO 端相连, 正极与 Ag 端相连, 测试 MIS 结构光电探测器在不同波长光源下的光电性能。所有测试均在黑暗及室温条件下进行。

3 结果与讨论

对所制备的不同掺杂比例的 GSS 薄膜层进行 EDS 成分检测, 表 1 为各样品具体元素成分占比。从表 1 可以看出, 采用热蒸发法制备的未掺 Ag GSS 薄膜其 Ge、Sb 和 Se 元素的原子比约为 28: 12:

60, 与靶材各元素含量一致, 因此该样品命名为 GSS。当 Ag 和 Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀ 材料的蒸发速率比为 0.5: 10 时, 制备的掺 Ag GSS 薄膜中 Ag 和 GSS 整体元素的原子比约为 10: 90, 因此将该样品命名为 Ag₁₀(GSS)₉₀。

表 1 不同掺杂比例 GSS 薄膜 EDS 能谱组分表

Tab.1 EDS spectral components of GSS films with different doping ratios

Code name	Evaporation rate/ (nm·s ⁻¹)		Composition/% (At)			
	Ag	Ge ₂₈ Sb ₁₂ Se ₆₀	Ag	Ge	Sb	Se
GSS	0	1.0	0	28.19	11.62	60.19
Ag ₁₀ (GSS) ₉₀	0.05	1.0	10.12	31.13	14.00	44.75
Ag ₁₈ (GSS) ₈₂	0.1	1.0	17.94	21.85	11.90	48.31

对半导体材料中进行金属掺杂是常见的提升半导体性能的方法之一, 通过掺杂金属可以有效降低其光学带隙^[30]。采用紫外-可见光分光光度计测量 GSS 和 Ag₁₀(GSS)₉₀ 薄膜的光吸收能力, 结果如图 2 所示。从吸收光谱可以看出, 两样品薄膜对可见到近红外光均有吸收, 利用 Tauc-Plot 公式^[31]:

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = A(h\nu - E_g), \quad (1)$$

其中, α 为吸收系数, $h\nu$ 为光子能量, E_g 为半导体光学带隙, A 为常数。可计算出 GSS 薄膜带隙约为 1.60 eV, Ag₁₀(GSS)₉₀ 薄膜带隙约为 1.49 eV。掺 Ag 后 GSS 薄膜的光学带隙减小, GSS 薄膜的光吸收截止呈现出红移趋势。

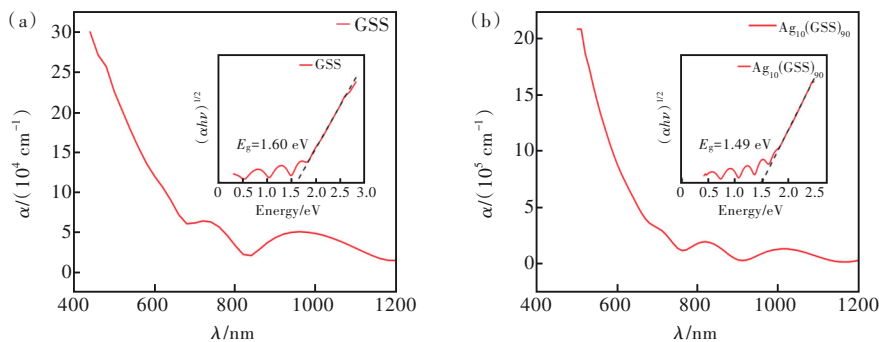


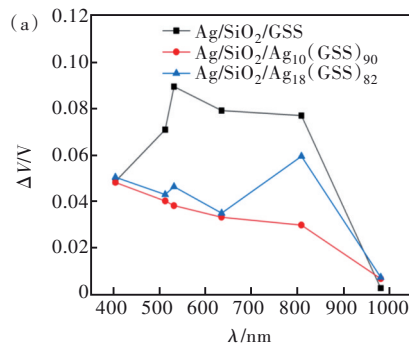
图 2 薄膜吸收光谱。(a)GSS 吸收光谱, 插图为其 Tauc 图; (b)Ag₁₀(GSS)₉₀ 薄膜吸收光谱, 插图为其 Tauc 图

Fig.2 Thin film absorption spectrum. (a)GSS thin film absorption spectrum, illustrated by Tauc diagram. (b)Ag₁₀(GSS)₉₀ thin film absorption spectrum, illustrated by Tauc diagram

利用不同掺杂比例的 GSS 薄膜构筑 Ag/SiO₂/Ag_x(GSS)_{100-x} 光电探测器。为了探究 Ag/SiO₂/Ag_x(GSS)_{100-x} 光电探测器的响应光谱范围, 我们

在可见光到近红外范围内 6 个不同波长 (405, 513, 532, 635, 808, 980 nm) 激光下进行光响应测试, 且基于肖特基势垒的形成, 该光电探测器可以

在自供电模式下进行^[32]。实验过程中,照射到 Ag/SiO₂/Ag_x(GSS)_{100-x} 光电探测器器件表面不同波长的光功率均为 10 mW,有效照射面积均为 0.03 cm²,测量结果如图 3(a)所示。结果表明,Ag/SiO₂/Ag_x(GSS)_{100-x} 光电探测器在六种波长的激光照射下均产生响应电压,证明了该光电探测器对可见光到近红外光都可以响应。而硫系玻璃材料属于非晶态半导体材料,其禁带边缘不是很陡峭,所以,波长为 980 nm 处有较低的电压响应幅度



(ΔV)。如图 3(b)所示,在波长为 980 nm 处的 Ag/SiO₂/GSS 光电探测器的电压响应幅度为 2×10^{-3} V,掺 Ag 的 GSS 薄膜构筑的光电探测器与纯 GSS 薄膜构筑的光电探测器相比电压响应幅度有所增强,Ag/SiO₂/Ag₁₈(GSS)₈₂ 光电探测器在波长为 980 nm 处的电压响应幅度最大为 7.1×10^{-3} V。这是由于掺杂 Ag 有效降低了 GSS 薄膜的光学带隙,提高了 Ag/SiO₂/Ag₁₈(GSS)₈₂ 光电探测器对 980 nm 波长光的响应能力。

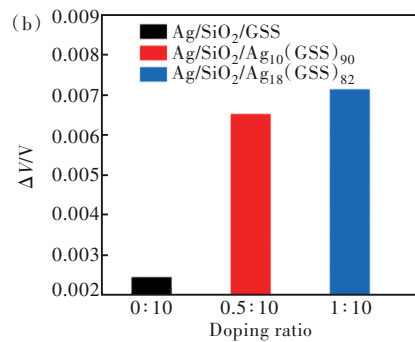


图 3 Ag/SiO₂/Ag_x(GSS)_{100-x} 光电探测器性能。(a) Ag/SiO₂/Ag_x(GSS)_{100-x} 不同波长的电压响应幅度;(b) Ag/SiO₂/Ag_x(GSS)_{100-x} 光电探测器在 980 nm 10 mW 下的电压响应幅度曲线

Fig.3 Performance study of Ag/SiO₂/Ag_x(GSS)_{100-x} photodetector. (a) Voltage response amplitude of Ag/SiO₂/Ag_x(GSS)_{100-x} at different wavelengths. (b) Voltage response amplitude curve of Ag/SiO₂/Ag_x(GSS)_{100-x} photodetector at 980 nm 10 mW

为了进一步研究掺 Ag 的 GSS 薄膜所构筑的光电探测器性能,选取 Ag 与 GSS 原子比约为 10:90 的掺 Ag 的 GSS 薄膜构筑 Ag/SiO₂/Ag₁₀(GSS)₉₀ 光电探测器。我们在可见光到近红外范围内 6 个不同波长激光下进行光响应测试。实验过程中,照射到 Ag/SiO₂/Ag₁₀(GSS)₉₀ 光电探测器器件表面不同波长的光功率均为 10 mW,有效照射面积均为 0.03 cm²,测量结果如图 4 所示。由于该光电探测器的光谱响应与 Ag₁₀(GSS)₉₀ 薄膜的吸收光谱(图 2(b))一致,可以推测该器件具有的光谱选择性主要来源于 Ag₁₀(GSS)₉₀ 薄膜。其中,波长为 405 nm 的激光器照射下的电压响应幅度最大可达到 4.8×10^{-2} V,在波长为 980 nm 的激光器照射下电压响应幅度最小为 6.5×10^{-3} V。

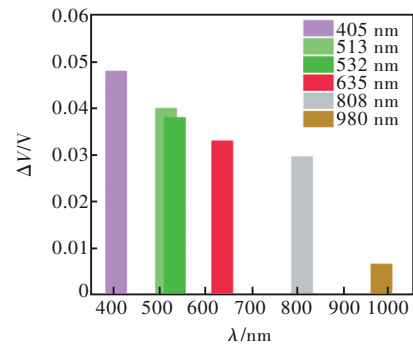


图 4 Ag/SiO₂/Ag₁₀(GSS)₉₀ 探测器不同波长的电压响应幅度

Fig.4 Voltage response amplitude of Ag/SiO₂/Ag₁₀(GSS)₉₀ detector at different wavelengths

为了进一步探究分析 Ag/SiO₂/Ag₁₀(GSS)₉₀ 光电探测器的光响应性能,进行自供电工作状态的瞬态响应电压-时间($V-t$)测试。图 5(a)为光电探测器在波长为 635 nm 激光辐照下的不同激发功率的 $V-t$ 测试曲线,其中,照射面积均为 0.03 cm²,激光被周期性开关调制,开关调制周期为 20 s。瞬态响应主要包括两个方面:一是由于扩散分量所导致的较慢响应,二是由于耗尽区中产生的载

流子的漂移而产生的快速响应。由于器件的耗尽区中产生了电子-空穴对,所以当器件在激光器打开时电压会下降,而关闭时电压会上升^[33]。对于一个性能良好的光电探测器来说,能够持续稳定地工作尤为重要^[34]。当激光器照射时,器件电压迅速下降并到一定水平,之后几乎保持平稳。而当激光器关闭时,器件电压迅速上升,并趋于最大值稳定。从图 5(a)中我们可以看出,随着激光周期性地开和关,器件的瞬态响应呈现出相对稳定且可以再现的开关循环,这表明器件与需真空、特

定溶液等测量环境测量的器件相比具有相对的稳定性和良好的重复性^[35]。同时,随着入射光功率的不断增强,该光电探测器仍具有相对的稳定性。图 5(b)为响应电压幅度(ΔV)随激光功率的变化曲线,当激光功率小于 10 mW 时,随着激光辐照

功率的增加,器件的电压响应幅度呈线性增大。这归因于光功率增加,可以使得 $\text{Ag}_{10}(\text{GSS})_{90}$ 薄膜吸收更多的光子,从而产生更多的电子-空穴对^[36]。当激光功率大于 10 mW 时, $\text{Ag}_{10}(\text{GSS})_{90}$ 薄膜吸收光子接近饱和,产生的电子-空穴对浓度几乎不变。

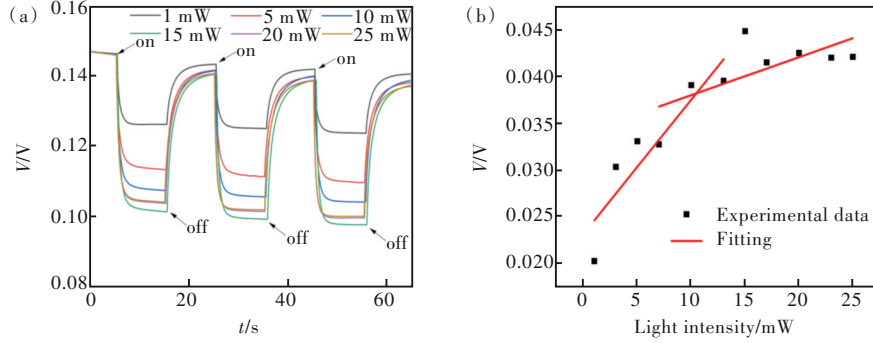


图 5 635 nm 波长光照下, $\text{Ag}/\text{SiO}_2/\text{Ag}_{10}(\text{GSS})_{90}$ 探测器在不同功率下的时间响应特性(a)及响应电压幅度与激发功率曲线(b)
 Fig.5 Time response characteristics of different power(a) and the response voltage amplitude with excitation power curve(b) of $\text{Ag}/\text{SiO}_2/\text{Ag}_{10}(\text{GSS})_{90}$ detectors at 635 nm wavelength illumination

此外,响应时间可以用来评价光电探测器对光源信号光暗变化的反应能力,即通过上升时间 τ_1 (即为响应电压从最大值的 10% 上升到最大值的 90% 所需的时间)和衰减时间 τ_2 (即为响应电压从最大值的 90% 下降到最大值的 10% 所需的时间)两个参数

进行评价^[37]。我们对 $\text{Ag}/\text{SiO}_2/\text{Ag}_{10}(\text{GSS})_{90}$ 光电探测器在 10 mW、波长为 635 nm 激光器照射下进行响应时间的估算测量。如图 6 所示,当光源被打开或者关闭时, $\text{Ag}/\text{SiO}_2/\text{Ag}_{10}(\text{GSS})_{90}$ 光电探测器的上升时间为 3.932 s,衰减时间为 1.522 s。

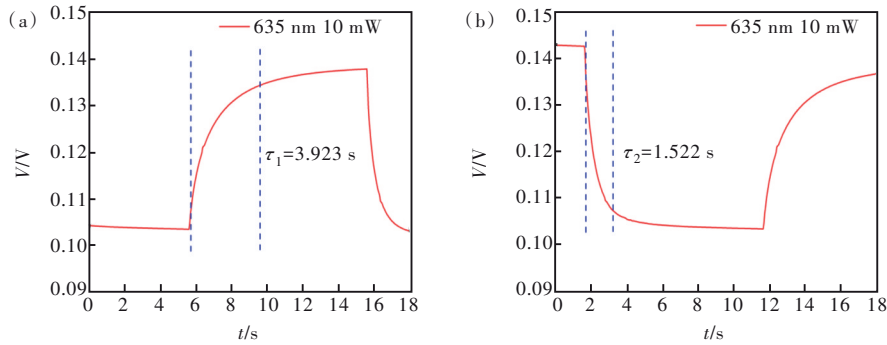


图 6 $\text{Ag}/\text{SiO}_2/\text{Ag}_{10}(\text{GSS})_{90}$ 探测器响应时间。(a)上升时间;(b)衰减时间
 Fig.6 The response time of the $\text{Ag}/\text{SiO}_2/\text{Ag}_{10}(\text{GSS})_{90}$ detector. (a)Rise time. (b)Decay time

光响应度 (R)、比探测率 (D^*) 和外量子效率 (η_{EQE}) 是光电探测器的重要参数,它们的计算公式如下:

$$R = \frac{I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}}{PS}, \quad (2)$$

$$D^* = R \sqrt{\frac{S}{2eI_{\text{dark}}}}, \quad (3)$$

$$\eta_{\text{EQE}} = R \frac{1240}{\lambda}, \quad (4)$$

其中, I_{light} 为光电流, I_{dark} 为暗电流, P 为入射光功率, S 为有效面积, e 为电子电量。在 0 V 偏置电

压、波长为 635 nm、光功率为 10 mW 的激光辐照下,暗电流大小为 7.31×10^{-7} A, $\text{Ag}/\text{SiO}_2/\text{Ag}_{10}(\text{GSS})_{90}$ 光电探测器的响应度 R 为 $4.63 \mu\text{A}/\text{W}$,比探测率 D^* 为 1.85×10^6 Jones, 外量子效率 η_{EQE} 为 $9.04 \times 10^{-4}\%$ 。

4 结 论

本研究设计并制备了 $\text{Ag}/\text{SiO}_2/\text{Ag}_x(\text{GSS})_{100-x}$ 的 MIS 结构的自供电光电探测器。该光电探测器在可见光到近红外区域均有良好的响应。此

外,掺 Ag 后的 GSS 硫系玻璃薄膜光电探测器在波长为 980 nm 处电压响应幅度增强。同时,对 Ag 与 GSS 原子比例为 10:90 的光电探测器在波长为 635 nm 激光器的不同激发功率下进行了响应测试,当激发功率小于 10 mW 时,光电探测器响应电压与激发功率呈线性相关;当激发功率大于 10 mW 时,光电探测器响应电压呈现饱和趋势。此外,相对于真空等需要严格测量环境测量的光电探测器而言,该光电探测器表

现出相对良好的稳定性。该光电探测器在 635 nm 激光下的上升和衰减时间分别为 3.932 s 和 1.522 s。以上研究结果为非晶态的硫系玻璃在自供电光电探测领域的研究提供了有力的依据。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230276>.

参 考 文 献:

- [1] PARK S, PARK T, PARK J H, *et al.* Ag₂O/ β -Ga₂O₃ Heterojunction-based self-powered solar blind photodetector with high responsivity and stability [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(22): 25648-25658.
- [2] 叶昊熙, 苏嘉韵, 钟日健, 等. 基于 PbZr_{0.52}Ti_{0.48}O₃ 铁电薄膜的高性能自驱动紫外光电探测器 [J]. *发光学报*, 2023, 44(4): 685-693.
YE H X, SU J Y, ZHONG R J, *et al.* High-performance self-powered ultraviolet photodetectors based on ferroelectric PbZr_{0.52}Ti_{0.48}O₃ thin films [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(4): 685-693. (in Chinese)
- [3] 段雨晗, 蒋大勇, 赵曼. 高增益 ZnO 肖特基紫外光电探测器光响应特性 [J]. *发光学报*, 2023, 44(10): 1816-1823.
DUAN Y H, JIANG D Y, ZHAO M. Responsivity characteristics of ZnO Schottky ultraviolet photodetectors with high gain [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(10): 1816-1823. (in Chinese)
- [4] WANG Y, LI D L, CHAO L F, *et al.* Perovskite photodetectors for flexible electronics: recent advances and perspectives [J]. *Appl. Mater. Today*, 2022, 28: 101509.
- [5] WU Y, DENG W J, CHEN X Q, *et al.* CMOS-compatible retinomorphic Si photodetector for motion detection [J]. *Sci. China Inf. Sci.*, 2023, 66(6): 162401.
- [6] JIANG H Y, LI B, WEI Y N, *et al.* High-performance gold/graphene/germanium photodetector based on a graphene-on-germanium wafer [J]. *Nanotechnology*, 2022, 33(34): 345204.
- [7] PAN Q H, ZHOU S H, GUO Y M, *et al.* Enhanced photoelectric responsivity of bilayer graphene/GaAs photodetector using plasmon resonance grating structures [J]. *Optik*, 2022, 259: 169031.
- [8] REDDY B K S, VEERALINGAM S, BORSE P H, *et al.* Synchronous enhancement of responsivity, response time and, spectral range in solution processed CdS photodetector upon modification with PEDOT:PSS [J]. *J. Alloys Compd.*, 2022, 919: 165775.
- [9] SARKAR S S, MUKHERJEE S, KHATRI R K, *et al.* Solution-processed MoS₂ quantum dot/GaAs vertical heterostructure based self-powered photodetectors with superior detectivity [J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(13): 135203.
- [10] ZHU X T, LIN F Y, ZHANG Z H, *et al.* Enhancing performance of a GaAs/AlGaAs/GaAs nanowire photodetector based on the two-dimensional electron-hole tube structure [J]. *Nano Lett.*, 2020, 20(4): 2654-2659.
- [11] CHEN J, CHEN J, LI X, *et al.* High-performance HgCdTe avalanche photodetector enabled with suppression of band-to-band tunneling effect in mid-wavelength infrared [J]. *npj Quantum Mater.*, 2021, 6(1): 103.
- [12] CIURA Ł, KOPYTKO M, MARTYNIUK P. Low-frequency noise limitations of InAsSb-, and HgCdTe-based infrared detectors [J]. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2020, 305: 111908.
- [13] BATTY K, STEELE I, COPPERWHEAT C. Laboratory and on-sky testing of an InGaAs detector for infrared imaging [J]. *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 2022, 134(1036): 065001.
- [14] WANG T, ZHENG D M, VEGSO K, *et al.* Flexible array of high performance and stable formamidinium-based low-*n* 2D halide perovskite photodetectors for optical imaging [J]. *Nano Energy*, 2023, 116: 108827.
- [15] LUO M M, YAN S K, WEI C T, *et al.* Engineering the morphology and component *via* multistep deposition of CsPbBr₃

- films toward high detectivity and stable self-powered photodetectors [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2022, 9(16): 2200450.
- [16] ZAKERY A, ELLIOTT S R. Optical properties and applications of chalcogenide glasses: a review [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2003, 330(1-3): 1-12.
- [17] NEDELCOU N, CHIROIU V, MUNTEANU L, *et al.* On the optical nonlinearity in the GeSbSe chalcogenide glasses [J]. *Mater. Res. Express*, 2020, 7(6): 066403.
- [18] LI X Y, RUAN S C, ZHU H O. Easy fabrication of performant and broadband response SnS/Si photodetector [J]. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2022, 151: 106991.
- [19] LIN Y D, YONG Z, LUO X S, *et al.* Monolithically integrated, broadband, high-efficiency silicon nitride-on-silicon waveguide photodetectors in a visible-light integrated photonics platform [J]. *Nat. Commun.*, 2022, 13(1): 6362.
- [20] 魏瑶琪, 全家乐, 赵庆强, 等. 一种基于 n-ZnS/p-CuSCN 纳米薄膜的高开关比和稳定性紫外光电探测器 [J]. *发光学报*, 2022, 43(6): 911-921.
- WEI Y Q, QUAN J L, ZHAO Q Q, *et al.* A stable UV photodetector based on n-ZnS/p-CuSCN nanofilm with high on/off ratio [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(6): 911-921. (in English)
- [21] 解国奥, 王亚琦, 李根, 等. 基于 CuSCN/Cs₃Bi₂I₆Br₃ 纳米薄膜的 p-i-n 型光电探测器 [J]. *发光学报*, 2022, 43(8): 1256-1265.
- XIE G A, WANG Y Q, LI G, *et al.* All-inorganic p-i-n photodetector based on lead-free CuSCN/Cs₃Bi₂I₆Br₃ nanofilm [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(8): 1256-1265. (in Chinese)
- [22] LURYI S, KASTALSKY A, BEAN J C. New infrared detector on a silicon chip [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1984, 31(9): 1135-1139.
- [23] CHEN H W, SAKAI N, JENA A K, *et al.* A switchable high-sensitivity photodetecting and photovoltaic device with perovskite absorber [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2015, 6(9): 1773-1779.
- [24] SZE S M, NG K K. *Physics of Semiconductor Devices* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [25] LIN C H, LIU C W. Metal-insulator-semiconductor photodetectors [J]. *Sensors*, 2010, 10(10): 8797-8826.
- [26] LIN C H, YE H W T, CHAN C H, *et al.* Influence of graphene oxide on metal-insulator-semiconductor tunneling diodes [J]. *Nanoscale Res. Lett.*, 2012, 7(1): 343.
- [27] AFSAL M, WANG C Y, CHU L W, *et al.* Highly sensitive metal-insulator-semiconductor UV photodetectors based on ZnO/SiO₂ core-shell nanowires [J]. *J. Mater. Chem.*, 2012, 22(17): 8420-8425.
- [28] KIM H, KUMAR M D, KIM J. Highly-performing Ni/SiO₂/Si MIS photodetector for NIR detecting applications [J]. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2015, 233: 290-294.
- [29] DASGUPTA K, CHOWDHURY K, MONDAL A, *et al.* Advancement and challenges for Schottky barrier MIS/SIS solar cells: a review [J]. *Trans. Indian Natl. Acad. Eng.*, 2022, 7(1): 13-28.
- [30] SHARMA N, SHARDA S, KATYAL S C, *et al.* Effect of Te on linear and non-linear optical properties of new quaternary Ge-Se-Sb-Te chalcogenide glasses [J]. *Electron. Mater. Lett.*, 2014, 10(1): 101-106.
- [31] DAVIS E A, MOTT N F. Conduction in non-crystalline systems V. Conductivity, optical absorption and photoconductivity in amorphous semiconductors [J]. *Philos. Mag.: A J. Theor. Exp. Appl. Phys.*, 1970, 22(179): 903-922.
- [32] QASIM M, SULAMAN M, BUKHTIAR A, *et al.* High-performance self-powered broadband Schottky junction photodetector based on graphene-silicon van der Waals heterostructure [J]. *Energy Technol.*, 2023, 11(10): 2300492.
- [33] PATEL D B, CHAUHAN K R, PARK W H, *et al.* Tunable TiO₂ films for high-performing transparent Schottky photodetector [J]. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2017, 61: 45-49.
- [34] YANG Z Q, DENG Y H, ZHANG X W, *et al.* High-performance single-crystalline perovskite thin-film photodetector [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(8): 1704333.
- [35] HUANG Y, ZHAN X Y, XU K, *et al.* Highly sensitive photodetectors based on hybrid 2D-0D SnS₂-copper indium sulfide quantum dots [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 108(1): 013101.
- [36] GUO D Y, SU Y L, SHI H Z, *et al.* Self-powered ultraviolet photodetector with superhigh photoresponsivity (3.05 A/W) based on the GaN/Sn:Ga₂O₃ pn junction [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(12): 12827-12835.

- [37] NALLABALA N K R, GODAVARTHI S, KUMMARA V K, *et al.* Structural, optical and photoresponse characteristics of metal-insulator-semiconductor (MIS) type Au/Ni/CeO₂/GaN Schottky barrier ultraviolet photodetector [J]. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2020, 117: 105190.



吕松竹(1999-),女,吉林长春人,硕士研究生,2021年于长春理工大学获得学士学位,主要从事微纳光子学器件及应用的研究。

E-mail: 862661692@qq.com



周见红(1978-),男,安徽枞阳人,博士,教授,2006年于上海交通大学获得博士学位,主要从事微纳光子学器件及应用的研究。

E-mail: zjh@cust.edu.cn



赵建行(1991-),男,吉林榆树人,博士,讲师,2021年于长春理工大学获得博士学位,主要从事微纳光子学器件及应用的研究。

E-mail: zjx@cust.edu.cn