

文章编号 1004-924X(2026)01-0072-14

电纺直写压电光电子型柔性光电探测器及其传感特性

杜贤若¹, 王俊翔², 陈瑞欣³, 陈华坛⁴, 郑高峰^{3*}

(1. 厦门大学 物理科学与技术学院, 福建 厦门 361005;

2. 厦门大学 电子科学与技术学院, 福建 厦门 361100;

3. 厦门大学 萨本栋微米纳米科学技术研究院, 福建 厦门 361005;

4. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024)

摘要:针对柔性光电探测器性能受限于微纳光敏结构与柔性基底间界面结合弱、暗电流高及功耗大等影响,提出一种基于压电光电子效应的性能增强策略,利用电纺直写技术构建以氧化锌(ZnO)为主纤维、铜氨络合物($\text{Cu}(\text{NH}_3)(\text{CN})$)为辅助调控纤维的双组分体系,制备高度可控的 $\text{ZnO}@\text{Cu}(\text{NH}_3)(\text{CN})$ 多层纳米纤维堆叠结构。该结构显著增强了纤维间的界面耦合稳定性,并利用堆叠界面产生的压电光电子效应在接触界面引入非对称势垒与内建电场,抑制热激发电子迁移,将器件暗电流降低至 $1.12 \times 10^{-7} \text{ A}$,显著减少静态功耗。通过合理调控堆叠层数(5~25层),实现器件阈值电压在6~20 V内可调,赋予其可编程的逻辑控制能力。实验结果表明,在254 nm紫外光照射下,探测器响应度达13.3 A/W,响应时间与恢复时间分别为11 ms和9 ms,表现出优异的光学探测性能。 ZnO 与 $\text{Cu}(\text{NH}_3)(\text{CN})$ 纳米纤维正交堆叠结构在微观电场调控与光电转换效率提升方面具有显著优势,在低功耗、高响应的柔性光电探测系统中具有重要应用潜力,为下一代柔性光电器件的设计提供了新思路。

关键词:电纺直写;柔性光电探测器;压电光电子增强效应;光控电路

中图分类号: TN29; TQ340.6 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20263401.0072

CSTR: 32169.14.OPE.20263401.0072

Electrohydrodynamic direct-writing of piezophototronic flexible photodetectors and sensing characteristics

DU Xianruo¹, WANG Junxiang², CHEN Ruixin³, CHEN Huatan⁴, ZHENG Gaofeng^{3*}

(1. College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361100, China;

3. Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University,

Xiamen 361005, China;

4. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology,

Xiamen 361024, China)

* Corresponding author, E-mail: zheng_gf@xmu.edu.cn

收稿日期: 2025-09-17; 修订日期: 2025-10-27.

基金项目: 国家自然科学基金专项基金资助项目 (No. 52405424, No. 52275575, No. 52575458)

Abstract: Flexible photodetectors show considerable potential for wearable electronics, curved imaging, and intelligent sensing; however, their performance is frequently constrained by weak interfacial coupling between micro/nanoscale photoactive structures and flexible substrates, leading to high dark current and elevated power consumption. Here, a performance-enhancement strategy exploiting the piezophototronic effect is proposed. A dual-component self-assembled $\text{ZnO} @ (\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ multilayer nanofiber architecture was fabricated via electrohydrodynamic direct writing, in which ZnO functions as the primary photoactive fiber and $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ serves as an auxiliary modulation layer. This stacked configuration markedly strengthens interfacial coupling stability and, through piezophototronic modulation at the stacking interfaces, introduces asymmetric barriers and built-in electric fields that effectively suppress thermally excited carrier transport. As a result, the dark current is reduced to $1.12 \times 10^{-7} \text{ A}$, substantially decreasing static power consumption. By adjusting the number of stacked layers (5-25), the threshold voltage can be tuned from 6 to 20 V, enabling programmable logic control. Under 254 nm ultraviolet illumination, a responsivity of 13.3 A/W is achieved, with response and recovery times of 11 ms and 9 ms, respectively, demonstrating excellent photoelectric detection performance. These results indicate that the orthogonally stacked ZnO and $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ nanofiber architecture enables superior local electric-field regulation and enhanced photoelectric conversion efficiency, offering strong promise for low-power, high-response flexible photodetectors.

Key words: electrohydrodynamic direct-writing; flexible photodetector; piezophototronic enhancement effect; light controlled circuit

1 引言

在短距离通信^[1]、可穿戴电子设备^[2-3]与智能传感^[4]等领域,柔性光电探测器以其轻量化、低功耗和高灵敏度等优势,已成为实现高效信息获取与传输的关键器件^[5-7]。得益于其优异的共形贴附特性^[8-9],该类探测器能够在复杂曲面实现稳定、连续的光信号监测,在微型通信系统、生理信号监测设备及人机交互等领域展现出广阔的应用前景^[4,10]。随着高速、高安全性需求的不断提升^[11-12],具有高响应度与低噪声特性的紫外柔性光电探测器受到广泛关注^[13-15]。然而,如何在增强微纳光敏结构与柔性基底之间界面结合强度的同时,实现低成本、低功耗且高性能的柔性光电探测器件,仍是当前柔性光电子领域亟待解决的关键科学与技术问题^[16]。

传统光敏结构普遍存在界面结合力弱、电势调控能力不足等问题,易导致寄生光电流和较高暗电流,这不仅增加器件能耗,也制约其响应速度与运行稳定性^[17-18]。此外,柔性基底在拉伸、弯折及卷曲等形变过程中易引发微结构畸变^[19],加剧光子散射效应^[20-22],从而降低有效光电转换效

率。为应对上述挑战,研究人员从材料结构与物理机制等方面开展了一系列研究^[23]。Hui等^[24]通过在柔性 BiVO_4 薄膜中引入中介层,增强了界面结合强度并改善了弯曲耐久性,但由于材料本身的光生载流子迁移率较低,故响应延迟与效率损耗问题依然突出。Liu等^[25]构建的 $\text{ZnO-Ga}_2\text{O}_3$ 核壳异质结构紫外探测器在自供电条件下实现了超过 130 mA/W 的高响应度,并在多次弯折后性能保持稳定。然而,其一维纤维堆叠结构缺乏二维交叉堆叠所带来的多向耦合与势垒调控能力,在暗电流与功耗抑制方面仍显不足。Qiao等^[26]采用银纳米颗粒修饰 $\text{P}_3\text{HT/ZnO}$ 异质结构,实现自供电响应与高探测率,并在 380 nm 紫外光照下展现出良好的响应能力,但贵金属的修饰显著提高了成本。Li等^[27]开发了基于聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)基底的低温自生长 MAPbI_3 纳米线阵列技术,通过低温原位结晶策略抑制了弯曲过程中的界面缺陷与寄生电流。然而,含铅材料限制了其在生物医疗与可穿戴设备中的应用。近年来,碳纳米管/生物聚合物等新型复合材料受到广泛关注^[28-30],其虽展现出优异的电子迁移率与光电转换效率^[31],但复杂组分引入的结构缺

陷^[32]导致器件工作时电流损耗较高,难以兼顾低功耗与高信噪比的稳定响应^[33]。

为了在维持界面完整性的同时提升光电性能^[34],研究人员基于压电光电子效应的三维纳米纤维结构,通过调控柔性基底上的压电极化,实现了对光电耦合过程的可控增强,为构筑高可靠性、高效率及低功耗的柔性光电探测系统提供了新途径^[35-37]。该类结构兼具良好的可设计性与环境适应性,能够满足高灵敏度、轻量化及稳定传输通道的集成需求。

为充分发挥压电光电子效应的协同增强优势,采用电纺直写技术构筑柔性光电探测器。该技术利用强电场诱导聚合物射流形成并实现纳米纤维的可控沉积,可在柔性基底上直接构建高分辨率纤维网络,具有低成本、绿色制造与可精确调控等优势^[38-40]。通过调控纤维取向与层间匹配关系,电纺直写可构筑高度有序的多层堆叠结构,显著增强纤维之间及纤维与基底之间的界面结合强度,从而优化电子传输路径与载流子迁移效率。该工艺有助于实现压电耦合与光电转换过程的协同调控,保障信号响应的稳定性与一致性,为发展高性能、可编程的柔性光电探测器提供了可行的技术路径。

本文基于压电光电子增强效应,利用电纺直写过程中的自堆叠效应,构建了具有二维正交堆叠结构的 $\text{ZnO}@\text{Cu}(\text{NH}_3)(\text{CN})$ 柔性光电探测器,系统研究了其结构优势及光电响应性能的变化规律。通过引入压电响应特性的 ZnO 与带隙可调的铜氨络合物,构建双组分异质结构,显著增强了微纳光敏单元与柔性基底之间的界面结合强度与耦合稳定性。自堆叠形成的层间内部势垒有效调控了电子传输路径,抑制了暗电流,提升了光响应速度。该多维堆叠结构与协同材料体系在提高光电转化效率的同时,兼具低功耗、高灵敏度与柔性稳定性,为6G短距离通信、智能穿戴设备等高集成、低能耗应用场景提供了一种可行的柔性光电解决方案。

2 实验

2.1 实验仪器

实验装置如图1所示。高压电源(DW-

SA403 1ACE5,中国天津东文高压电源有限公司)的正极连接至金属喷针(外径0.23 mm,内径0.08 mm),负极连接至置于硅晶片之上的PET柔性基底(厚度0.05 mm)。前驱体溶液存储于1 mL注射器(江苏治宇医疗器械有限公司)中,通过精密注射泵(Pump 11 Pico Plus Elite,哈佛仪器,美国)稳定输送至喷针端。基底安装于可编程运动平台(POT-G MOT-F09-06,江西连胜精密光学平台),可根据预设轨迹在PET基底上实现不同层数与堆叠方式的纤维沉积。

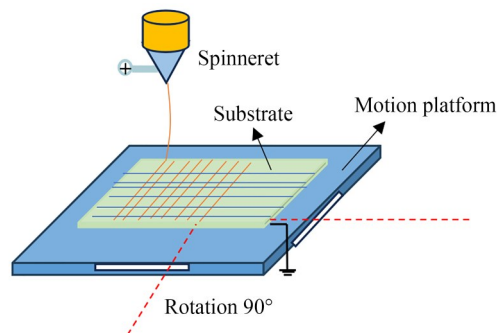


图1 电纺直写与纤维堆叠

Fig. 1 Electrohydrodynamic direct-writing and fiber stacking

为实现纤维的高精度稳定沉积与堆叠,实验采用多轴精密运动平台(行程为50 mm,定位精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$,分辨率为1 nm,单向重复定位精度为 $\pm 25 \text{ nm}$),确保基板与喷头之间的高精度相对运动。同时,结合“带电射流实时监测模块”与“多重电场耦合调控”的核心控制策略,通过高速相机(帧率为1 000 frame/s)实时监测射流形态(如泰勒锥稳定性、射流直径均匀性),并配合预设运动轨迹实现纳米纤维的定点可控沉积。每层纤维堆叠完成后,采用共聚焦显微镜(测试精度 $\pm 0.5 \mu\text{m}$)对纤维层厚度进行原位校准(5层/10层/25层样品的厚度偏差分别控制在 $\pm 0.3 \mu\text{m}$, $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 及 $\pm 1.0 \mu\text{m}$ 以内),以确保不同堆叠层数样品的结构一致性,从而有效排除因堆叠精度差异对器件阈值电压、暗电流等性能参数的影响。

2.2 前驱体溶液的制备

实验所用原料包括聚环氧乙烷(PEO,分子

量 300 000, 国药集团化学试剂有限公司)、乙酸锌($(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}$, 纯度 99.0%, 西陇科学股份有限公司)、乙酸铜($(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$, 纯度 99.0%, 西陇科学股份有限公司)、异丙醇胺(纯度 99%, 山东优索化工科技有限公司)、无水乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, AR, 国药集团化学试剂有限公司)以及去离子水。锌基油墨的组分配比为 5% $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}$, 12% PEO, 水与无水乙醇体积比为 1:2, 且 $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}$ 和异丙醇胺的物质的量比为 1:5。实验具体用量为: $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}$ 0.839 g、异丙醇胺 1.434 g、PEO 0.6 g、水 0.825 g、无水乙醇 1.302 g。铜基油墨的组分配比与之类似, 其中, $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$ 含量为 5%, PEO 为 12%, 水与无水乙醇体积比同样为 1:2, $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$ 与异丙醇胺的物质的量比为 1:5, 具体用量为 $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$ 0.856 g、异丙醇胺 1.476 g、PEO 0.600 g、水 0.802 g、无水乙醇 1.265 g。两种溶液均在 25 °C 条件下搅拌 48 h, 以获得均匀稳定的前驱体油墨。

PEO 在体系中兼具溶液调控与界面强化的双重作用。其分子链中富含的醚氧基团可与 Zn^{2+} , Cu^{2+} 等金属离子形成配位络合, 有效稳定离子环境并抑制金属前驱体的局部团聚, 从而提升溶液的均匀性与电场响应稳定性。PEO 的高分子链结构赋予溶液适宜的黏弹性, 有助于射流在高电场作用下保持连续稳定拉伸, 保障纤维成形过程的完整性与尺寸一致性。此外, PEO 具有良好的柔韧性与极性匹配特性, 可在 ZnO 与 $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 纳米纤维界面诱导分子缠结与氢键相互作用, 构筑稳定的过渡结合层, 增强界面结合强度并降低应力集中风险。

ZnO 作为主纤维材料, 具备优异的压电与光敏响应特性, 它在堆叠过程中可在界面处引入局域电场, 从而增强光电转换效率。而 $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 作为辅助层, 具有可调带隙与载流子调控能力, 能在纤维交叉界面构建非对称势垒, 抑制热激发载流子迁移, 进而降低暗电流。在 PEO 的协同作用下, ZnO 与 $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 共同构建出稳定的二维正交堆叠结构, 显著提升了器件的结构完整性、暗电流抑制能力和响应速度, 为发展高性能柔性光电探测器奠定了基础。

2.3 柔性光电探测器的制备

柔性光电探测器采用电纺直写技术制备。首先, 将 PET 基底裁剪为 70 mm × 70 mm 的矩形片材, 并在其相对两侧贴附尺寸为 5 mm × 70 mm 的导电石墨烯胶带, 作为器件的柔性电极。随后, 通过电纺直写工艺从一侧电极向另一侧依次沉积不同功能层。喷印锌基前驱体溶液, 形成均匀铺展的 ZnO 纳米纤维层, 经部分固化处理以增强其与基底的附着力。再沿与前一层正交 90° 的方向喷印铜基前驱体溶液, 形成 $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 纳米纤维层, 从而构筑层状交错的复合纤维网络结构。最终, 样品在 50 °C 下烧结 60 min, 获得 $\text{ZnO} @ (\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 复合结构的柔性光电探测器。

为研究堆叠结构对光电性能的影响, 制备了无 $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 纤维堆叠的 ZnO 纤维器件的对照样品(记为 ZnO 光电探测器), 用于与复合结构器件进行性能对比及相关机理分析。ZnO 光电探测器与 $\text{ZnO} @ (\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 光电探测器的结构分别如图 2(a) 和 2(b) 所示。

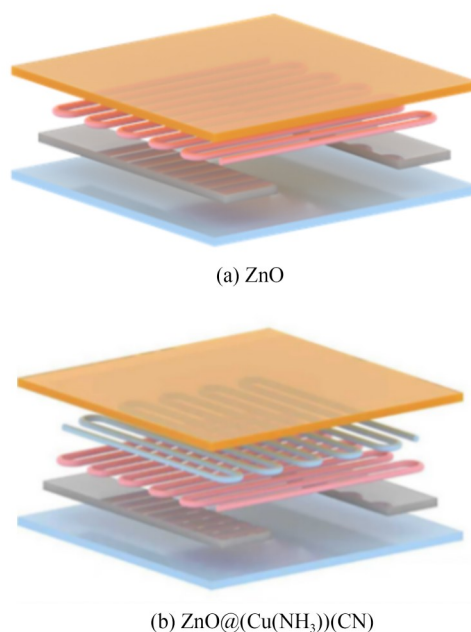


图2 不同光电探测器结构

Fig. 2 Structure of different photodetectors

在电纺直写过程中, 通过控制针头与基底间距、供液速度及电压等关键参数(具体参数如表 1 所示), 确保纤维的稳定直写与精确沉积。

表 1 电纺直写工艺参数

Tab. 1 Operating parameters of electrohydrodynamic direct-writing

Parameter	Numerical value
Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	25 ± 1
Humidity(RH)	$56\% \pm 1\%$
Applied voltage/kV	1.76 ± 0.3
Distance from nozzle to substrate/mm	1.50 ± 0.02
Platform speed/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	60 ± 1
Infuse rate/ $(\mu\text{L} \cdot \text{h}^{-1})$	1 ± 0.01
Outer diameter of needle/mm	0.23 ± 0.001
Inner diameter of needle/mm	0.08 ± 0.001

2.4 器件表征与性能测试

采用场发射扫描电子显微镜(SUPRA55 SAPHIRE,德国蔡司公司)观察纤维形貌,以分析 $\text{ZnO} @ (\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 的微观结构特征。利用傅里叶变换红外光谱仪(NICOLET iS10,美国赛默飞世尔科技公司)测定样品的化学组成,并通过 X 射线衍射仪(XRD-7000,日本岛津公司)对其晶体结构进行表征。为提升结晶质量与界面结合稳定性,样品在恒温加热台(Kaisi-818,中国金卡西贸易有限公司)上进行烧结处理。采用源表(B2901B,中国常州同惠电子股份有限公司)测试器件的光电响应特性,获取电流-电压($I-U$)曲线及光电流响应行为。

2.5 光控电路搭建

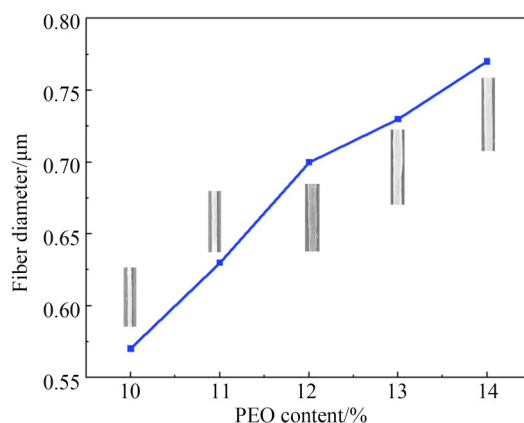
本实验采用经校准的 254 nm 单色紫外光源(UVGO,中山紫固照明电器),其发射特征峰中心位于 254 nm,半高全宽为 $(1.6 \pm 0.2) \text{ nm}$ 。利用可调光阑与功率计精确调控辐照强度,在器件表面形成直径约 $(4.8 \pm 0.3) \text{ mm}$ 的圆形光斑。为研究堆叠层数对光电性能的影响,对不同堆叠层数的探测器进行分组测试,并通过可调支架固定光源与样品间距,确保入射光强具备良好的稳定性与实验可重复性。测试条件下的紫外光强设定为 $5.6 \text{ mW}/\text{cm}^2$,通过调节入射光强,系统记录不同堆叠层数器件的阈值电压变化及光电流响应特性。在此基础上,构建基于多输入条件的“与门”和“或门”光控逻辑电路,以验证器件在光逻辑运算中的响应准确性与判别能力。

3 结果与讨论

3.1 纤维直径与界面结合力分析

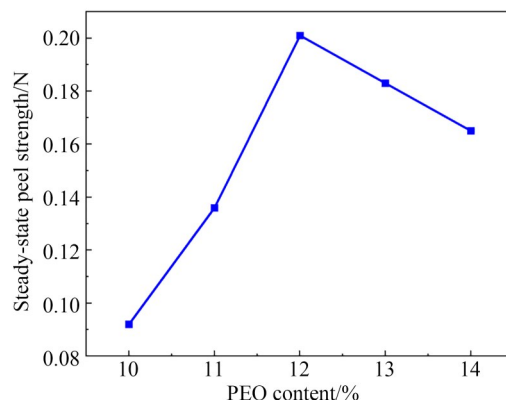
电纺直写制备的 ZnO 和 $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 纳米纤维经扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)表征显示,其平均直径为 697 nm。纤维表面光滑、连续,无明显断裂、珠状结构或其他形貌缺陷,整体呈现均匀的一维纤维结构。纤维内部组织致密,未观察到明显孔洞或分层现象,表明其在电纺直写过程中具有良好的成形连续性与结构完整性。

为深入探究 PEO 在电纺直写体系中的作用机制,系统研究了不同 PEO 含量对纤维形貌及界面结合性能的影响。图 3(a)展示了纤维直径



(a) 纤维直径与PEO含量之间的关系

(a) Relationship between fiber diameter and PEO content



(b) PEO/PET界面剥离力与PEO含量的关系

(b) Relationship between PEO/PET interfacial peeling force and PEO content

图 3 纤维直径和界面结合力与 PEO 含量的关系

Fig. 3 Relationship between fiber diameter and interfacial bonding strength versus PEO content

与PEO含量之间的关系,随着PEO含量从10%增加至14%,纤维平均直径由565 nm逐渐增大至772 nm。这一变化主要归因于溶液黏度与黏弹性随聚合物含量增加而显著提高,使喷射过程中的拉伸程度降低,从而导致纤维线径增粗。与此同时,PEO与PET基底之间的稳态剥离力随其含量变化呈现先升高后降低的趋势(图3(b)),并在PEO含量为12%时达到最大值0.201 N。由此表明,适中含量的PEO有助于在纤维-基底界面形成均匀且连续的分子缠结与氢键网络,从而显著增强界面结合强度;而过高的PEO含量则可能引起聚合物层内部滑移及其吸湿性增强,反而削弱界面黏附能力。上述实验结果证实,PEO在电纺直写过程中不仅调控纤维成形的稳定性,也对纤维与基底的界面结合性能具有重要调控作用。

3.2 光电探测器材料结构与组分分析

图4展示了器件表面的元素分布情况,由图可知器件表面各元素分布均匀,活性组分在纤维网络中实现了稳定掺杂与协同分布。均匀的成分分布促进了连续电荷传输网络的形成,减少了界面势垒与缺陷态,提高了载流子迁移效率与界面结合稳定性。图5(a)为柔性光电探测器的傅里叶变换红外光谱,在 $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 中, $3\,254\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰归属于O-H键的伸缩运动,反映了含羟基化合物的存在; $2\,882\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰源于大量烷基链中C-H伸缩振动;而 $1\,466\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,340\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰则与C-H的

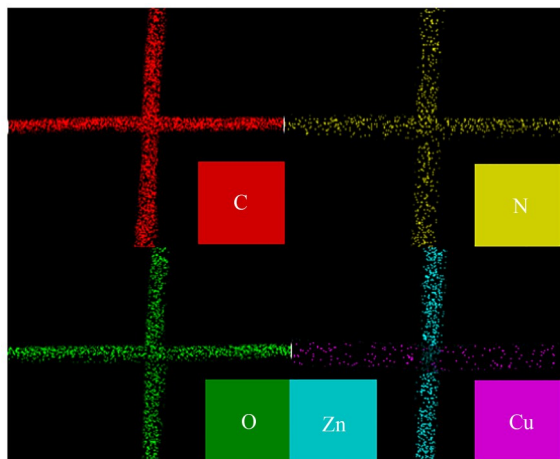
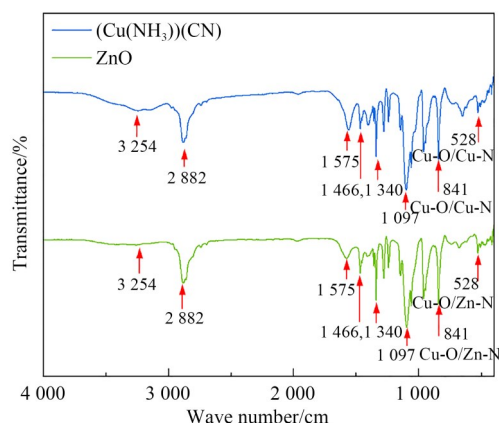


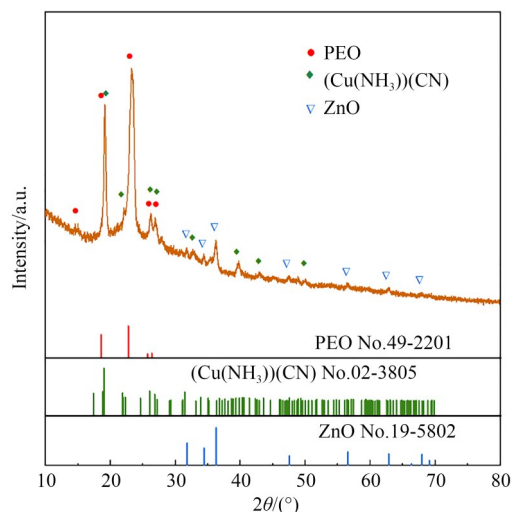
图4 柔性光电探测器的元素面分布

Fig. 4 Element distribution of flexible photodetector



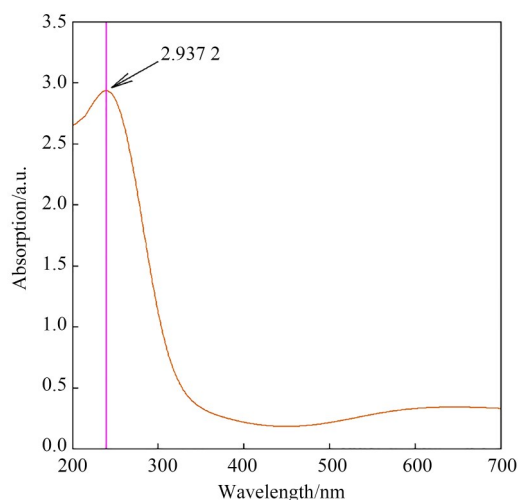
(a) 傅里叶变换红外光谱

(a) FTIR spectrum



(b) X射线衍射谱

(b) XRD spectrum



(c) 紫外吸收光谱

(c) UV absorption spectrum

图5 柔性光电探测器的光谱表征

Fig. 5 Spectral characterization of flexible photodetector

弯曲振动有关;1 575 cm^{-1} 处的吸收峰则对应 N-H 弯曲振动,表明胺基的存在,这对金属配合至关重要。此外,C-O 键的伸缩振动可能源自 PEO,而 528 cm^{-1} 和 841 cm^{-1} 处的吸收峰可能与 Cu-O 或 Cu-N 键的振动有关^[41]。与 $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 相比,ZnO 纤维在 3 254 cm^{-1} 附近的 O-H 振动峰明显减弱,说明其表面羟基吸附被有效抑制,这可能归因于 Zn^{2+} 与含氧、含氮配体之间较强的配位作用,使得 O-H 振动受限。

图 5(b)为柔性光电探测器的 X 射线衍射图谱。通过与标准卡片(No. 49-2201)对比,位于 $2\theta=14.5^\circ, 18.8^\circ$ 和 22.9° 的衍射峰分别对应于 PEO 晶体的(110),(120)和(112)晶面。根据标准卡片 No. 02-3805,衍射峰位于 $2\theta=19.1^\circ, 21.9^\circ, 26.1^\circ, 26.8^\circ, 32.7^\circ, 39.7^\circ, 42.9^\circ$ 和 44.9° 分别对应于 $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 的 $(-111), (-102), (021), (002), (-122), (210), (112)$ 和 (-313) 晶面。位于 $2\theta=31.8^\circ, 34.4^\circ, 36.3^\circ, 47.5^\circ, 56.6^\circ, 62.8^\circ$ 和 67.9° 的衍射峰与 ZnO 标准卡片匹配良好,分别对应六方氧化锌的(100),(002),(101),(102),(110),(103)和(112)晶面。上述结果表明,该样品包含了 3 种主要化合物,即 PEO, $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 和 ZnO。

如图 5(c)所示,样品在 200~700 nm 波长内表现出显著的紫外吸收特性。在 220 nm 处观察到强度为 2.937 2 a. u. 的强吸收峰,表明该器件在紫外区域具有显著的光吸收能力。该吸收主要来源于 ZnO 价带电子向导带的本征带隙跃迁,以及 $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 中 Cu-N 配位键的电荷转移跃迁。 $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 的引入调控了材料的能带结构,在紫外区形成额外的电荷转移吸收峰,从而提升了整体吸收效率。相比之下,器件在 400~700 nm 可见光内吸收较弱,显示出优异的光谱选择性,有助于抑制暗电流并提高紫外探测灵敏度。

3.3 $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 纤维堆叠效果性能探究

高性能光电探测器需具备低暗电流、低功耗、高响应度以及优异的机械稳定性。实验表明, $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 的正交堆叠结构能显著提升探测器综合性能,有效拓宽其应用前景。

在光电探测器的性能评估中,响应度(Re-

sponsivity, R)与探测率(Detectivity, D^* , Jones)是两项核心指标,其计算公式如下:

$$R = \frac{I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}}{PS}, \quad (1)$$

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

其中: S 是光电探测器的有效光敏面积, P 是入射光功率密度, I_{light} 是光电流, I_{dark} 是暗电流, e 是电子电荷。ZnO@ $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 光电探测器在 5.6 mW/cm^2 的 254 nm 紫外光辐照下,显示出高响应度(13.3 A/W)和高探测率(9.4×10^9 Jones)。

根据电子发射理论,正电压的电流为:

$$I = A^* A T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{K_B T}\right) \left[\exp\left(-\frac{qU_D}{nK_B T}\right) - 1 \right], \quad (3)$$

其中: A^* 是理查森常数, A 是有效面积, T 是绝对温度, q 是电子电荷, ϕ_B 是肖特基势垒, U_D 是施加的偏压, n 是理想因子, K_B 是玻尔兹曼常数。

图 6 展示了 ZnO 光电探测器与不同堆叠层数 ZnO@ $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 光电探测器的 I - U 特性曲线。可以看出,随着堆叠层数的增加,器件的伏安曲线整体形态保持一致,均呈现稳定的整流行为,而暗电流由 2.89×10^{-4} A 降至 1.12×10^{-7} A。暗电流的降低使器件能够在更高正偏压下保持稳定工作,并实现 6~11 V 的可调阈值电压。

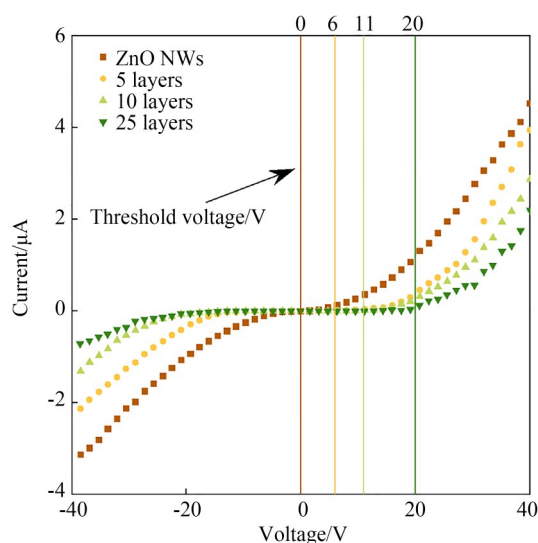


图 6 柔性光电探测器的 I - U 曲线

Fig. 6 I - U curve of flexible photodetector

压,体现出良好的电学调控能力与结构可设计性。

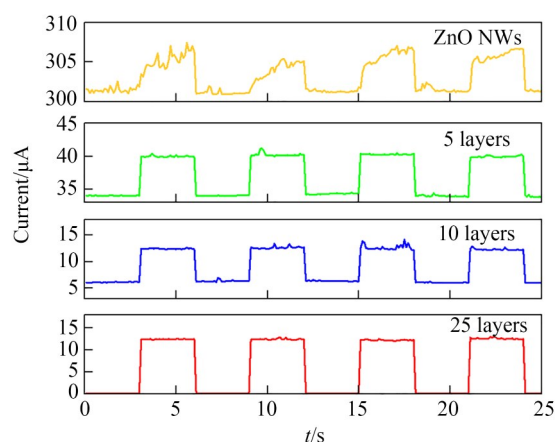
堆叠结构的引入不仅显著降低了器件暗电流,还改善了载流子在界面处的传输与调控行为。这一结果表明,ZnO与 $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 之间形成的多界面耦合结构在调节势垒高度与抑制热激发电子迁移方面发挥了关键作用,从而实现了更稳定的电学输出特性。为了进一步揭示堆叠结构对光电响应性能的影响规律,研究对不同堆叠层数器件的动态响应过程及光电参数进行了系统测试与对比分析,以探讨压电电子效应对响应速度、灵敏度及探测率的综合提升机制。

如图7(a)所示,随着堆叠层数的增加,响应波形从粗糙不齐逐渐转变为快速稳定。当堆叠层数达到25层时,器件的响应时间和恢复时间分别缩短至11 ms和9 ms。图7(b)和图7(c)进一步量化了响应度与探测率随堆叠层数的变化趋势。随着层数从0层增至25层,响应度从0.312 5 A/W提升至13.3 A/W,探测率也从 4×10^6 Jones显著提高至 9.79×10^9 Jones,表明光电探测器的性能得到了大幅增强。

目前,多数探测器仅具径向能带调控能力,而轴向势垒调控不足,使得在外加电场作用下载流子可沿轴向无阻传输,从而产生较高暗电流。ZnO作为一种典型的压电半导体材料,在 $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 堆叠的作用下,其纳米纤维接触点的径向会引入相反的电荷。热电子发射输运机制表明,在热平衡状态下,能够跨越势垒的电子数量较多,因此暗电流较大。

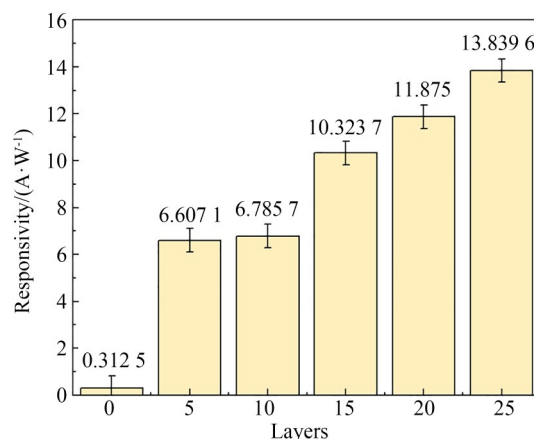
$(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 与ZnO接触区域对ZnO上表面产生压缩作用,在ZnO纳米纤维上表面引入了负的压电势,导致能带上升。这种压缩效应相当于在其能带上引入一系列不连续的小势垒,从而显著抑制了通过热电子发射过程输运至另一侧石墨电极的电子数量,有效降低了暗电流。

表2汇总了近三年典型柔性光电探测器的关键性能参数,包括响应/恢复时间、探测率、响应度及暗电流等指标。对比结果显示,本器件在低偏压下同时实现了较低的暗电流(1.12×10^{-7} A)、较高的响应度(13.3 A/W)以及快速的响应/



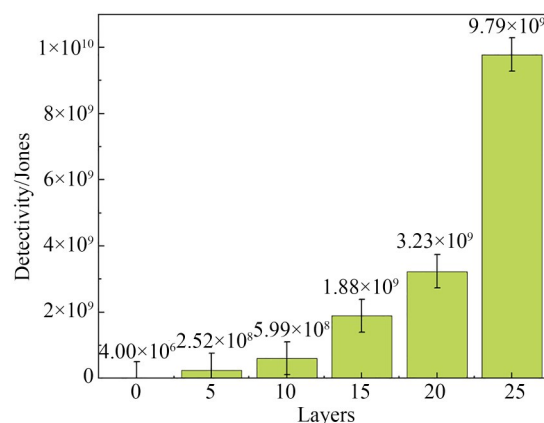
(a) 柔性光电探测器的电流响应

(a) Current response of flexible photodetectors



(b) 柔性光电探测器的响应度

(b) Responsivity of flexible photodetectors



(c) 柔性光电探测器的探测率

(c) Detection rate of flexible photodetectors

图7 不同纤维层数下柔性光电探测器的光电性能
Fig. 7 Photoelectric performance of flexible photodetectors with different numbers of fiber layers

恢复时间(11 ms/9 ms),其综合性能优于多数已报道的同类器件。

表 2 柔性光电探测器的关键性能参数对比

Tab. 2 Comparison of key performance parameters of flexible photodetectors

Type	Response time/ms	Recovery time/ms	Responsivity /($\text{mA}\cdot\text{W}^{-1}$)	Detectivity /Jones	Dark current /A	Ref.
ZnO@ $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$	11	9	13300	9.4×10^9	1.12×10^{-7}	This work
Graphite/ TiO_2	860	890	8.94	4.16×10^9	—	[42]
NiO/ Ga_2O_3	240	340	0.047	3.84×10^9	—	[43]
BTO@TO	500	—	3.8	3.7×10^{11}	2.6×10^{-7}	[44]
FTO/ TiO_2 /CsPbBr ₃ -CSA/C	276	278	1.523	2.1454×10^9	—	[45]
TiO_2 @ Al_2O_3	90	90	2.8	—	5.14×10^{-6}	[46]

为系统评估器件的柔性稳定性,进一步设计了循环弯折实验。测试在 25 ℃、相对湿度 40%RH 条件下进行,弯折半径设定为 50 mm,循环次数范围为 50 至 1 000 次。为量化弯折对电学性能的影响,在不同循环次数后记录了器件的 I - U 特性曲线。结果显示,随着弯折次数的增加,器件输出电流仅出现轻微上升,从初始状态(0 次弯折)的 4.53 mA 增至 500 次弯折后的 4.86 mA,性能保持率超过 95%。这表明器件在重复机械形变下仍能保持良好的结构完整性与电学稳定性,具备优异的柔性可靠性。图 8 展示了光电探测器在弯折测试中的实际状态,进一步验证了其良好的机械稳定性。

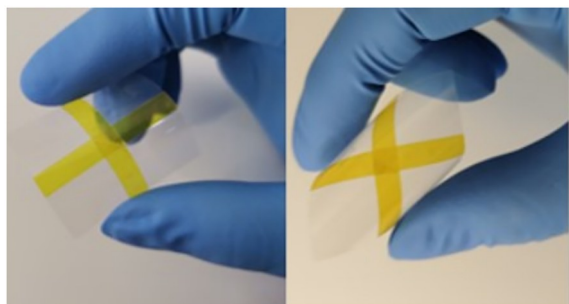


图 8 光电探测器的柔性测试

Fig. 8 Flexibility testing for photodetector

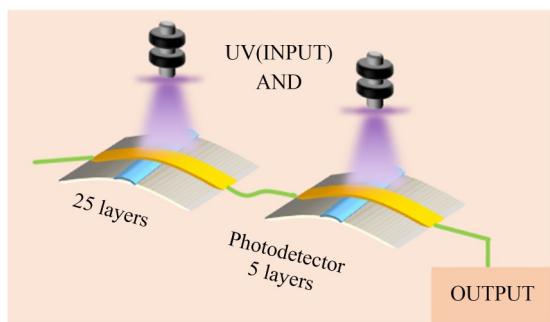
3.4 光控电路应用

光控开关器件需具备高灵敏度、快速响应及良好的环境抗干扰能力。基于压电光电子效应

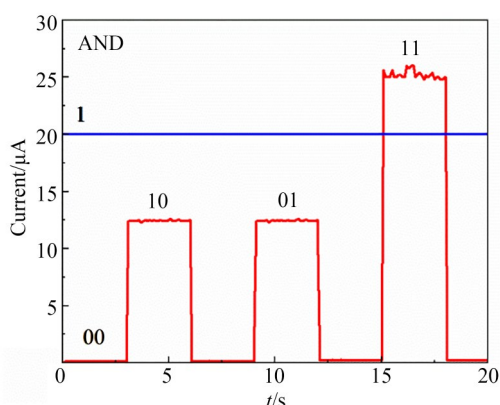
优势,可有效实现光信号的快速触发与稳定转换。基于上述性能优势,构建了以 ZnO@ $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 光电探测器为核心的光控开关电路模型,以验证其在柔性光控逻辑与信号调制中的应用潜力。

通过调控 $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 纤维的堆叠层数,可实现器件阈值电压的灵活调节。以 5 层堆叠为例,其阈值电压较低,适用于弱紫外光条件下的探测;而 25 层堆叠则因势垒更高、选择性更强,更适用于强紫外光环境中的精确控制。在此基础上,进一步研究该器件在多输入条件下的逻辑判断与信号处理能力,构建了具备逻辑门功能的光控电路模型。作为信息处理系统的核心单元,逻辑电路通常依赖电压或电流信号执行布尔逻辑运算。利用堆叠层数对输出特性的调控作用,成功实现了以光强为输入的简易“与门”和“或门”逻辑功能。定义 4 种输入信号(11),(10),(01),(00),即为两束紫外光是否辐照的组合,其中“1”表示有紫外光照射,“0”表示无紫外光照射。

在与门实验中,将一个 25 层堆叠和一个 5 层堆叠的探测器通过导线串联连接,构成级联式电流路径,其电路结构如图 9(a)所示,相应的光电流输出特性如图 9(b)所示。在(11)输入条件下,输出光电流约为 25 μA ,而在其他输入状态下均低于 20 μA 。因此,将输出光电流小于 20 μA 定义为逻辑“0”,大于该阈值则为逻辑“1”,实现了“全真为真”的与逻辑功能。



(a) 光电与门
(a) Optoelectronic AND gate



(b) 与门 I - t 曲线
(b) I - t curve for AND gate

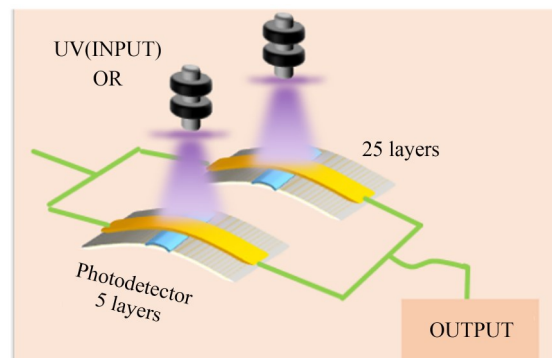
图9 与门的示意图与测试

Fig. 9 AND gate schematic and test

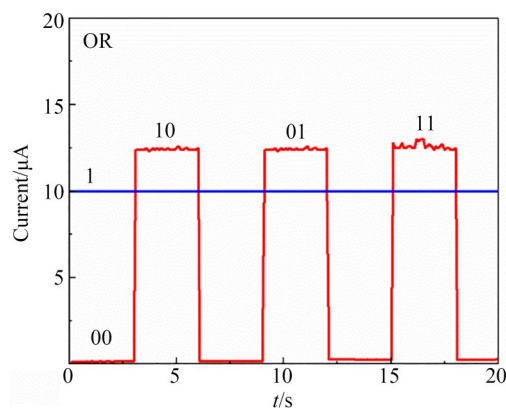
在或门实验中,将一个25层堆叠和一个5层堆叠的探测器并联连接,电路结构如图10(a)所示,相应的光电流输出如图10(b)所示。任一探测器受到紫外光照射所产生的光生电流均可使总输出电流超过设定阈值($10\text{ }\mu\text{A}$),从而判定为逻辑“1”;仅当两个探测器均无光照时,输出才为逻辑“0”,符合“有真为真”的或逻辑规则。

为了阐明器件逻辑响应的物理机制,建立等效电路模型,将 $\text{ZnO} @ (\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 异质结视为具有可调势垒的光控二极管。其中, ZnO 层提供压电极化电势,而 Cu 基复合层作为电子俘获与输运通道。外加偏压 U_{bias} 与光生压电势 U_{piezo} 叠加后,共同调制结区有效势垒高度及开启电压阈值 U_{th} 。当入射紫外光激发载流子产生内建场调制使 $U_{\text{bias}} + U_{\text{piezo}} \geq U_{\text{th}}$ 时,势垒降低,器件导通(逻辑“1”),否则器件维持高阻态(逻辑“0”)。

在不同逻辑门(如 AND、OR)的实现中,通过调节两个输入端的光强或电压幅值,器件仅在



(a) 光电或门
(a) Optoelectronic OR gate



(b) 或门 I - t 曲线
(b) I - t curve for OR gate

图10 或门示意图与测试

Fig. 10 OR gate schematic and test

特定输入组合下达到导通阈值。例如,在 AND 门模式下,仅当两束输入光同时照射时,叠加的压电势超过阈值,输出电流高于逻辑判断电流 I_{th} ,从而实现逻辑“1”输出。这一过程揭示了阈值电压调控与逻辑输出之间的内在关联:压电光子效应通过调制界面势垒分布与阈值位置,使器件在光、电双输入条件下呈现“条件触发型”电导响应,进而实现无需外部放大器的低功耗逻辑判断功能。

$\text{ZnO} @ (\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 堆叠结构构建的光强逻辑电路在响应速度、选择性和灵敏度方面表现出显著优势,为柔性光电子器件的实际应用提供了可行路径。

4 结 论

本文提出了一种基于压电光子协同效应

的 $\text{ZnO} @ (\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 柔性光电探测器, 通过调控 ZnO 与 $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 纳米纤维的堆叠层数, 实现了光电性能的可控调节。采用电纺直写技术构建的自堆叠结构有效优化了界面载流子传输路径与能带匹配, 使器件表现出低暗电流 ($1.12 \times 10^{-7} \text{ A}$)、高响应度 (13.3 A/W)、快速响应与恢复特性 ($11/9 \text{ ms}$, 堆叠 25 层), 阈值电压可在 $6 \sim 20 \text{ V}$ 内调节。

针对传统柔性光电探测器存在的界面结合弱、暗电流高及响应迟滞等问题, 本文提出了一种“结构-机制-功能”协同的设计策略: 构建 ZnO 主纤维与 $(\text{Cu}(\text{NH}_3))(\text{CN})$ 调控层的二维正交自堆叠结构, 增强界面结合强度与载流子输运有序性; 引入压电光子协同机制, 在异质界面形成非对称势垒与内建电场, 同步提升光响应与电学调控能力; 拓展阈值电压调控与逻辑响应功能, 为柔性智能光电系统提供可编程单元设计新思路。

参考文献:

- [1] BASHIR M S, ZEESHAN AHMED Q, ALOUINI M S. Optimal photodetector size for high-speed free-space optics receivers [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23 (11): 16390-16403.
- [2] TANG X, YANG J W, DUAN Z H, *et al.* Advances in paper-based photodetectors: fabrications, performances, and applications [J]. *Advanced Optical Materials*, 2024, 12(27): 2401114.
- [3] 康国毅, 钟易晟, 姜佳昕, 等. 柔性湿度传感器低温直写制备 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(22): 3279-3288.
KANG G Y, ZHONG Y SH, JIANG J X, *et al.* Low-temperature direct writing fabrication of flexible humidity sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(22): 3279-3288. (in Chinese)
- [4] HU Y, ZHANG Q P, HAN J C, *et al.* Recent progress on stability and applications of flexible perovskite photodetectors [J]. *Journal of Semiconductors*, 2025, 46(1): 011601.
- [5] LI Z Q, YAN T T, FANG X S. Low-dimensional wide-bandgap semiconductors for UV photodetectors [J]. *Nature Reviews Materials*, 2023, 8 (9): 587-603.
- [6] QU S D, LIU J Q, HU J H, *et al.* Flexible DPPT-TT/PEO fiber-exploiting electro-optical synaptic transistor for artificial withdrawal reflex arc [J]. *Advanced Fiber Materials*, 2024, 6(2): 401-413.
- [7] 张晨阳, 莫德锋, 徐红艳, 等. 用于 InGaAs 单光子探测器的微透镜阵列及表征 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(11): 1667-1675.
ZHANG CH Y, MO D F, XU H Y, *et al.* Design and characterization of microlens arrays for InGaAs single photon detectors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(11): 1667-1675. (in Chinese)
- [8] TRAN M H, HUR J. Direct, simple, rapid, and real-time monitoring of ultraviolet B level in sunlight using a self-powered and flexible photodetector [J]. *EcoMat*, 2023, 5(3): e12301.
- [9] 张森浩, 邱东海, 衣宁, 等. 可穿戴柔性电子的快速制备与医疗应用 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27 (6): 1362-1369.
ZHANG S H, QIU D H, YI N, *et al.* Rapid preparation and medical application of wearable Flexible electronics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(6): 1362-1369. (in Chinese)
- [10] ZHANG Z, JI P R, LI S B, *et al.* High-performance broadband flexible photodetector based on

作者贡献声明:

杜贤若: 测量方法提出, 论文审核与编辑;
王俊翔: 论文构思和撰写, 可视化呈现;
陈瑞欣、陈华坛: 实验数据分析, 初稿写作;
郑高峰: 获取资助, 理论指导。

- Gd₃Fe₅O₁₂-assisted double van der Waals heterojunctions [J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2023, 9: 84.
- [11] FAYAD A, CINKLER T, RAK J. Toward 6G optical fronthaul: a survey on enabling technologies and research perspectives [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2025, 27(1): 629-666.
- [12] PRASAD TERA S, CHINTHAGINJALA R, PAU G, *et al.* Toward 6G: an overview of the next generation of intelligent network connectivity [J]. *IEEE Access*, 2024, 13: 925-961.
- [13] WU C, ZHAO T L, HE H L, *et al.* Enhanced performance of gallium-based wide bandgap oxide semiconductor heterojunction photodetector for solar-blind optical communication *via* oxygen vacancy electrical activity modulation [J]. *Advanced Optical Materials*, 2024, 12(10): 2302294.
- [14] HONG E L, LI Z Q, ZHANG X Y, *et al.* Deterministic fabrication and quantum-well modulation of phase-pure 2D perovskite heterostructures for encrypted light communication [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(29): 2400365.
- [15] LIU M X, WEI J X, QI L J, *et al.* Photogating-assisted tunneling boosts the responsivity and speed of heterogeneous WSe₂/Ta₂NiSe₃ photodetectors [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 141.
- [16] CHANG S H, KOO J H, YOO J, *et al.* Flexible and stretchable light-emitting diodes and photodetectors for human-centric optoelectronics [J]. *Chemical Reviews*, 2024, 124(3): 768-859.
- [17] TONG S C, YUAN J, ZHANG C J, *et al.* Large-scale roll-to-roll printed, flexible and stable organic bulk heterojunction photodetector [J]. *NPJ Flexible Electronics*, 2018, 2: 7.
- [18] LIAN X J, LUO L M, DONG M H, *et al.* A review on the recent progress on photodetectors [J]. *Journal of Materials Science*, 2024, 59 (47): 21581-21604.
- [19] 吴阳, 冯玉涛, 韩斌, 等. 长波红外差分干涉仪光栅低温安装结构设计及优化 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(2): 171-183.
- WU Y, FENG Y T, HAN B, *et al.* Design and optimization of cryogenic installation structure for gratings of Long-wave Infrared Spatial Heterodyne Interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32 (2): 171-183. (in Chinese)
- [20] PENG M F, WEN Z, SUN X H. Recent progress of flexible photodetectors based on low-dimensional II-VI semiconductors and their application in wearable electronics [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(11): 2211548.
- [21] WANG P, LAN Y Y, HUAN C M, *et al.* Recent progress on performance-enhancing strategies in flexible photodetectors: From structural engineering to flexible integration [J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2023, 156: 100759.
- [22] ZHU X L, QIU H, ZHANG Y, *et al.* Vertical-aligned and ordered-active architecture of heterostructured fibers for high electrochemical capacitance [J]. *Advanced Fiber Materials*, 2024, 6 (1): 312-328.
- [23] 袁兆林, 吴永炜, 余璐瑶, 等. Ga掺杂 ZnO 微米棒紫外光探测器的制备与特性 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(5): 643-652.
- YUAN ZH L, WU Y W, YU L Y, *et al.* Fabrications and characteristics of Ga-doped ZnO microrods ultraviolet photodetectors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(5): 643-652. (in Chinese)
- [24] HUI Q, LI Q K, WANG S, *et al.* Highly efficient flexible BiVO₄ thin-film photodetector with good bending robustness on mica substrates [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2023, 127 (36): 18219-18226.
- [25] LIU Y Z, LIU K W, YANG J L, *et al.* A self-powered flexible UV photodetector based on an individual ZnO-amorphous Ga₂O₃ core-shell heterojunction microwire [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, 12(26): 9623-9629.
- [26] QIAO Q, ZHAO T G, ZHENG J, *et al.* Self-powered poly(3-hexylthiophene)/ZnO heterojunction ultraviolet photodetectors decorated by silver nanoparticles [J]. *Optical Materials*, 2024, 153: 115615.
- [27] LI Y J, LIU Y, LIU L, *et al.* Low temperature self-growth of organic-inorganic perovskite nanowires for high performance flexible photodetectors [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 40: 109951.
- [28] LEUNG S F, HO K T, KUNG P K, *et al.* A

- self-powered and flexible organometallic halide perovskite photodetector with very high detectivity [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30 (8) : 1704611.
- [29] YOU Q, LI Y N, ZHANG Y, *et al.* High-performance carbon nanotube-based photodetectors enhanced by SWCNTs/graphene heterojunction [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(7): 9868-9876.
- [30] XIA X L, ZHOU S Y, WANG Y, *et al.* Emerging optoelectronic architectures in carbon nanotube photodetector technologies [J]. *Fundamental Research*, 2025, 5(3): 1153-1168.
- [31] ZHANG Z R, ZHANG N, ZHANG Z Y. High-performance carbon nanotube electronic devices: progress and challenges [J]. *Micromachines*, 2025, 16(5): 554.
- [32] WANG L Z, TRICARD N, CHEN Z T, *et al.* Progress in computational methods and mechanistic insights on the growth of carbon nanotubes [J]. *Nanoscale*, 2025, 17(19): 11812-11863.
- [33] ZE Y M, LIU Y F, WANG B, *et al.* Carbon nanotube materials for future integrated circuit applications [J]. *Materials Today*, 2024, 79: 97-111.
- [34] 方向明, 周起成, 孙宇, 等. Ag/Bi₂O₃ 纳米块自供能紫外探测器的制备及性能 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(5): 653-660.
- FANG X M, ZHOU Q CH, SUN Y, *et al.* Preparation and performance of self-powered Ag/Bi₂O₃ nanoblocks ultraviolet photodetector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(5): 653-660. (in Chinese)
- [35] LI P S, YANG Y Q, DONG Z X, *et al.* Piezophototronic effect modulated performances of guest-substrate integrated p-i-n GaN ultraviolet detectors [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, 12 (32): 12615-12622.
- [36] KUMAR P, PAUL T, SAHOO A, *et al.* Harnessing self-powered and photoresponsive biomechanical activity sensors by exploring the piezophototronic effect in lead-free layered halide perovskite/PVDF composites [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2025, 13(24): 18420-18435.
- [37] HUANG S H, ZHAO X H, HAO C L, *et al.* Multifunctional PVDF/CeO₂@PDA nanofiber textiles with piezoelectric and piezophototronic properties for self-powered piezoelectric sensor and photodetector [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 482: 148950.
- [38] 郑高峰, 姜佳昕, 康国毅, 等. 光栅编码器电纺直写精确喷印 [J]. *光学精密工程*, 2021, 29(10): 2393-2399.
- ZHENG G F, JIANG J X, KANG G Y, *et al.* Optical grating encoder *via* precise electrohydrodynamic direct-writing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(10): 2393-2399. (in Chinese)
- [39] HUANG Y A, BU N B, DUAN Y Q, *et al.* Electrohydrodynamic direct-writing [J]. *Nanoscale*, 2013, 5(24): 12007-12017.
- [40] 赵扬, 姜佳昕, 张恺, 等. 基于电纺直写的图案化微纳结构喷印技术 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24 (9): 2224-2231.
- ZHAO Y, JIANG J X, ZHANG K, *et al.* Precision deposition of micro/nano pattern printed by electrohydrodynamic direct-write [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2224-2231. (in Chinese)
- [41] HERRÁN L, VELIZ-SILVA D F, POBLETE C, *et al.* Improved ammonia production using Cu₂O@poly-carbazole electrocatalysts in the electrochemical reduction of molecular nitrogen and nitrogen oxoanions [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, 12(37): 25011-25021.
- [42] SONIL N I, ULLAH Z, HAIDER S, *et al.* Flexible UV photodetector based on graphite/titanium dioxide through facile transfer of pencil drawn graphite films on desired substrates [J]. *Ceramics International*, 2024, 50(19): 37057-37066.
- [43] AMARI M, AL-ZOUBI O H, BANSAL P, *et al.* A self-powered and flexible deep ultraviolet photodetector based on NiO/Ga₂O₃ heterojunction and employing stable MXene electrodes [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 373: 115360.
- [44] SU L, YAN T T, LIU X Y, *et al.* A tunable polarization field for enhanced performance of flexible BaTiO₃@TiO₂ nanofiber photodetector by suppressing dark current to pA level [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(15): 2214533.
- [45] DHAKSHNAMOORTHY M, KATHIRVEL A, RAJ S M, *et al.* Self-powered white light photodetector with enhanced photoresponse using camphor

- sulphonic acid treated CsPbBr₃ perovskite in carbon matrix[J]. *Materials Letters*, 2023, 341: 134250.
- [46] WANG G, JI F B, LI J, *et al.* Preparation of a flexible photoanode of the photoelectrochemical ul-

traviolet photodetector based on rutile TiO₂ nanowires and the suppressed charge recombination at solid/liquid interface [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2024, 57(2): 025101.

作者简介:



杜贤若(2002—),男,四川邻水人,博士研究生,2024年于厦门大学获得学士学位,主要从事微纳喷印和柔性传感器制造方面的研究。E-mail: duxianruo@stu.xmu.edu.cn

通讯作者:



郑高峰(1984—),男,福建泉州人,博士,教授,博士生导师,2006年于华中科技大学获得学士学位,2011年于厦门大学获得博士学位,主要从事静电纺丝和微纳米系统制造方面的研究。E-mail: zheng_gf@xmu.edu.cn