

# CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO 多层异质结的持续光电导增强及类神经突触特性研究\*

杨亮<sup>1)</sup> 丁继军<sup>1†)</sup> 屈永锋<sup>1)</sup> 党博<sup>2)</sup> 任博权<sup>1)</sup> 陈海霞<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>西安石油大学理学院, 陕西省油气井测控技术重点实验室, 西安 710065

<sup>2)</sup>西安石油大学电子工程学院, 西安 710065

**摘要:** ZnO 的持续光电导特性为实现 ZnO 基光电突触模拟器件提供了可能。本文采用磁控溅射在玻璃基底上设计制备了 Cu/CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO/ITO 多层异质结器件, 通过调节 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层溅射时间 (0 min、1 min、3 min) 并结合 Ar 氛围退火对器件性能进行改性研究。结果表明, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层对器件暗电流特性有明显调控作用, 退火后器件暗态输运整体更接近欧姆行为, 且不同间隔层条件下仍保持可分辨的电学差异。在 365 nm 紫外激发下, 器件均呈现典型持续光电导保持衰减特性, 且电流幅度与保持性随功率密度增强而提高, 其中 3 min Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 器件表现出更强的残余电流保持。在脉冲光刺激下, 三种器件均可实现兴奋性突触后电流可调、短期记忆向长期记忆转变、频率依赖可塑性以及配对脉冲促进等突触功能。最后结合双指数过程拟合显示秒级快速弛豫与 10<sup>3</sup> s 量级慢弛豫共同贡献, 为 ZnO 基光电突触的界面结构设计与动力学调控提供了参考。

**关键词:** 多层异质结; 磁控溅射; 光电导; 暗电流

**PACS:** 73.21.Ac, 61.46.-w, 81.40.Rs

**基金:** 陕西省自然科学基金 (批准号: 2024JC-YBMS-060), 高校青年教师科研创新能力支持项目 (U40) (批准号: SRICSPYF-BS2025031), 油气井智能测控技术与装备青年科研创新团队 (批准号: 2022QNKYCXTD02) 和西安石油大学研究生创新基金项目 (批准号: YCX2513178) 资助的课题

† 通讯作者. E-mail: jjding@xsyu.edu.cn

# 1 引言

近年来，仿神经形态计算被认为是下一代计算机架构，它能够实现高并行、低功耗智能计算<sup>[1-3]</sup>，在这种架构中，类神经突触器件承担着权重计算与信息传递的核心功能，其特征能够在外界刺激下实现可重复、可调的导电率变化，并呈现与生物突触相似的短时或长时可塑性记忆行为，包括兴奋性突触后电流、配对脉冲促进、频率依赖可塑性以及记忆保持/遗忘等<sup>[4-6]</sup>。特别是对于类视觉神经突触光电器件而言，它能够将“感知-存储-计算”功能进行耦合，将光刺激可直接作为事件输入，器件电导率的变化可作为神经状态直接输出，从而在硬件层面简化传感与信息处理流程。研究者将类神经突触器件的可塑性归因于材料内部缺陷对光生载流子的俘获-释放过程以及异质结界面势垒调制对载流子的输运调控作用<sup>[7,8]</sup>。

ZnO 是一种宽带隙（3.37 eV）半导体材料，对紫外光波段具有高响应特性，且在紫外光照射下常伴随显著的持续光电导现象<sup>[9,10]</sup>，这一现象可使得器件在停止光照后仍保持较高的电导率，在仿神经突触行为学上被称为“光致记忆”<sup>[11,12]</sup>。一般认为，ZnO 中的持续光电导与氧空位和锌间隙等本征缺陷密切相关<sup>[13,14]</sup>。这些缺陷可在禁带中形成俘获态并延缓光生载流子的复合与释放，从而导致关光后的长尾衰减，表面吸附氧则主要参与表面耗尽层的调制过程<sup>[15,16]</sup>。电导状态随时间而演化的现象可直接类比为神经突触的兴奋程度，因此，ZnO 可被应用于人工光电突触器件。在光电探测器设计中，可通过构建异质结以及引入间隔层等方法进行改性，这是由于异质结界面处的能带弯曲和势垒结构有助于调控光生载流子的分离、传输与捕获路径<sup>[17]</sup>，从而有效提升光电探测器的性能<sup>[18,19]</sup>。

在 ZnO 基紫外探测器件中，通过引入 p 型金属氧化物（如 CuO、NiO 等），与 n 型 ZnO 所形成的 p-n 结能带弯曲与界面势垒变化影响了载流子注入与缺陷

释放过程，可有效抑制暗电流、获得高开关比和可控的持续光电导特性，进一步改善了神经突触器件的性能指标，包括兴奋性突触后电流大小、短期记忆与长期记忆相互演化、频率依赖可塑性与配对脉冲促进等。本论文首先设计制备了 Cu/CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO/ITO 紫外光电突触器件，将 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层引入 CuO/ZnO 异质结构中，用于调控器件的持续光电导与类突触响应行为。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 一方面可削弱 CuO 与 ZnO 的直接接触并抑制界面复合，另一方面可改变界面邻近区域缺陷态对载流子的俘获/释放过程，从而影响持续光电导保持及后续类突触响应行为。其次，在统一测试条件下系统比较了 0 min、1 min 和 3 min 三种 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层条件对器件暗态输运、持续光电导动力学以及兴奋性突触后电流、配对脉冲促进、短期记忆/长期记忆和频率依赖可塑性等关键突触指标的影响。再次，结合材料表征、电化学测试和能带分析，建立了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层厚度影响持续光电导保持与突触可塑性之间的关联关系，这为基于氧化物异质结的紫外光电突触器件结构优化与性能调控提供了实验依据。

## 2 实验部分

采用磁控溅射法（北京泰科诺，JCP500 型）在玻璃基底上逐层沉积了 Cu/CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO/ITO。图 1 所示为 Cu/CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO/ITO 器件的制备流程和结构示意图，其中各功能层与电极形成了阶梯状分层结构，有效避免了底部 Cu 电极与顶部 ITO 电极在侧壁接触而引起的短路。首先将载玻片切割为 1.5 cm×2.5 cm 的尺寸，依次经丙酮、无水乙醇和去离子水超声清洗各 10 min 并干燥后，使用 Ar 等离子体处理（氩气流量 20 sccm，功率 35 W，时间 10 min）进一步去除表面污染物。所有溅射工艺均在 5×10<sup>-4</sup> Pa 的腔室本底真空度下进行，器件有效感光面积为 1 cm×1 cm，所用靶材纯度均为 99.99%，工艺气体纯度≥99.999%，具体的溅射参数如表 1 所示。

使用 Keithley 2450 源表在黑暗条件下对器件进行电学性能分析（ITO 接正极，Cu 电极接负极）；使用波长为 365 nm 的紫外 LED 作为光源，通过调节驱动电流大小（直流电源型号为 LPS-305）来改变光照强度；利用 LS123 紫外光功率计来测量光功率密度；通过 STM32 单片机控制继电器的开关时长来精确控制紫外 LED 的照射状态，为避免环境光的干扰，紫外 LED 与被测试样品安装在一个遮光盒子里。测试所用的光功率密度除已标注的外，其余测试过程中均设置为  $360 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。

表 1 磁控溅射工艺参数

Table 1 Magnetron sputtering process parameters

溅射材料	气体流量 (sccm)	溅射气压 (Pa)	溅射功率 (W)	溅射时间 (min)	溅射温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
Cu	Ar=30	0.17	20	5	25
CuO	Ar:O <sub>2</sub> =30:20	0.57	25	20	80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ar:O <sub>2</sub> =25:15	0.43	30	0、1、3	80
ZnO	Ar:O <sub>2</sub> =35:5	0.63	40	50	80
ITO	Ar=30	0.17	30	10	25

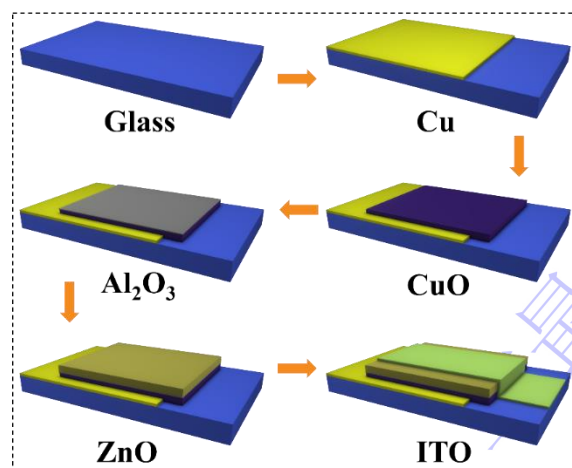


图 1 CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO 异质结器件的制备过程与结构示意图

Fig.1. Preparation process and structural schematic diagram of CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO heterojunction devices

### 3 结果与讨论

图 2(a-c)分别给出了 ZnO、CuO 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的表面 SEM 形貌。可以看出，

ZnO 薄膜表面分布致密均匀且无孔洞，晶粒不是典型的六方晶体结构，这表明所制备 ZnO 为多晶薄膜。CuO 薄膜同样呈颗粒状形貌，但局部存在一定的团聚趋势，反映出其生长动力学与 ZnO 层存在差异。相比之下，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜表面更加平整致密，没有明显的颗粒边界特征，符合致密氧化物薄膜常见的表面形貌。图 2(d) 为 CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO 异质结器件的 SEM 断面形貌，器件自下而上形成连续完整的层状堆叠结构，在 CuO 与 ZnO 材料之间有明显的界面，其中 ZnO 层呈现出纵向柱状晶粒生长特征，厚度约为 200 nm，与上层 ITO 层及下层 CuO 之间紧密贴合。由于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层厚度较薄且与相邻层对比度接近，在 SEM 断面形貌中难以被清晰分辨，但截面中未出现明显孔洞或脱层现象，说明所制备的异质结器件在结构的连续性与界面结合方面表现良好。为分析 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层表面形貌与粗糙度，在玻璃基底上单独沉积 1 min 和 3 min Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜并进行 AFM 测试，如图 2(e-f) 所示。1 min 样品的 RA 和 RMS 分别为 2.478 nm 和 3.218 nm，3 min 样品分别为 2.832 nm 和 3.563 nm，表明溅射时间延长后表面起伏略有增加。根据膜沉积速率估算，1 min 和 3 min Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层等效厚度分别约为 3.77 nm 和 11.31 nm。

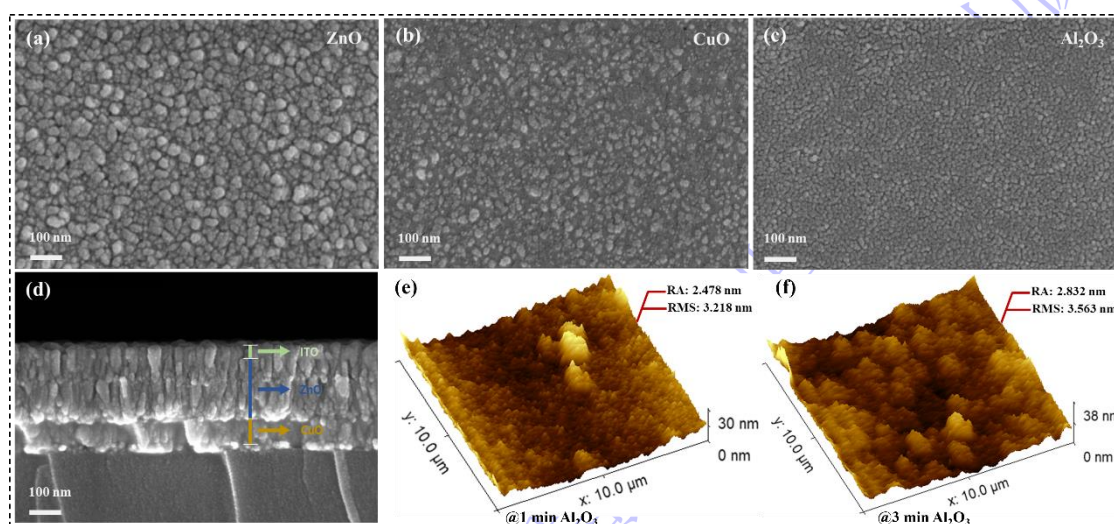


图 2 SEM 形貌：(a) ZnO 薄膜表面，(b) CuO 薄膜表面，(c) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜表面，和(d) 器件横截面；Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的 AFM 形貌：(e) 1 min，和 (f) 3 min

Fig.2. SEM images: (a) ZnO films, (b) CuO films, (c) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films, and (d) cross section of CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO heterojunction devices. AFM images of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film: (e) 1 min, and (f) 3 min.

如图 3(a)所示, CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO 异质结器件横截面的 EDS 元素分布形貌表明, Zn 元素主要集中于薄膜上部区域, 对应 ZnO 功能层; Cu 元素主要分布于下部区域, 对应 CuO 层; O 元素则在整个氧化物薄膜区域内均有分布。由于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层厚度较薄且 Al 元素含量相对较低, 其分布信号在截面方向上不明显, 但在对应区域仍可检测到 Al 元素的存在。整体来看, 各元素在截面方向呈现出较为清晰的层状分布, 在 EDS 空间分辨率内未观察到明显的大尺度互扩散特征, 说明器件具有较好的层状完整性与界面可分辨性。图 3(b)给出了相应区域的 EDS 能谱图, 谱中可见 Zn、Cu、Al 和 O 的特征峰, 进一步验证了器件中相关元素的存在及组成的合理性。图 3(c)为 ZnO 薄膜退火前后的 XRD 谱。未退火样品在测试范围内主要表现为宽峰背景, 而退火后样品在约 34.4° 附近出现弱的 ZnO(002)特征衍射峰, 表明热处理后 ZnO 薄膜的局部结晶或 c 轴择优取向有所改善。需要指出的是, 该衍射峰峰强较低且峰形较宽, 同时 20° 至 30° 范围内主要来自玻璃基底非晶散射较强的宽峰背景。因此退火后氧化锌薄膜整体结晶程度仍然有限。图 3(d)为 ZnO 薄膜退火前后的吸收光谱。两组样品均在 380 nm 附近出现明显的近带边吸收特征, 说明 ZnO 薄膜保持了典型的紫外响应特性。退火后样品在整个测试波段内的光吸收强度整体略有增强, 而吸收边位置未见明显偏移, 说明退火处理对其光吸收能力具有一定改善作用。

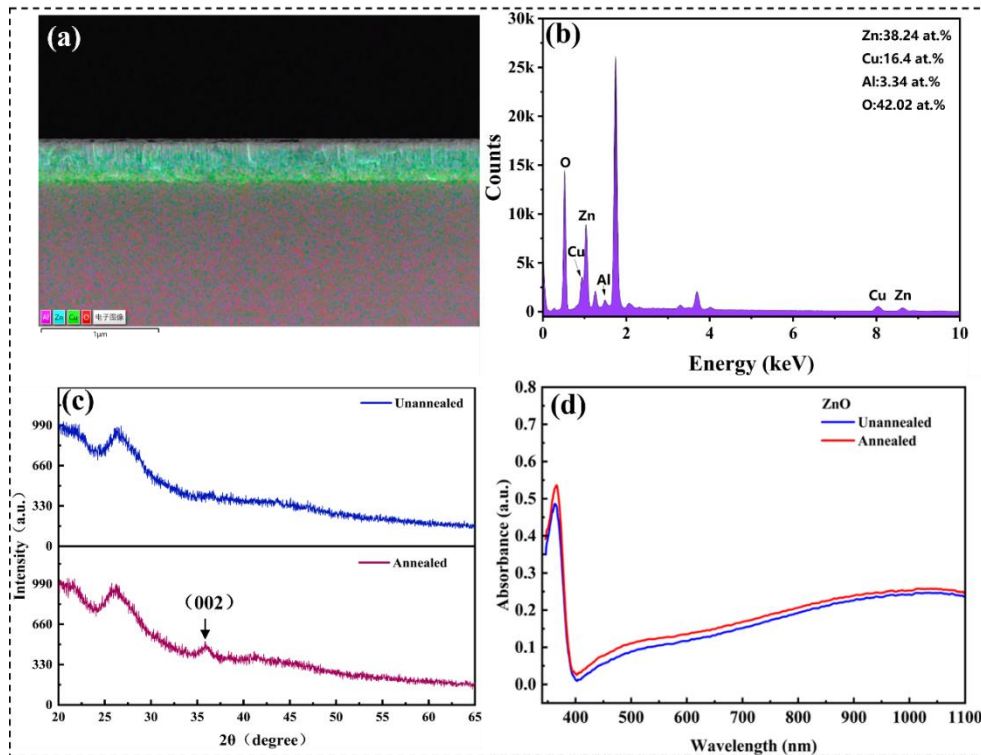


图 3 (a) CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO 异质结器件横截面 EDS 形貌, (b) 对应区域的 EDS 能谱, ZnO 薄膜退火前后的 (c) XRD 谱和 (d) 吸收光谱

Fig.3. (a) EDS images of CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO heterojunction cross section, (b) the corresponding of EDS energy spectra, (c) XRD patterns and absorption spectra of ZnO films before and after annealing

退火前后的三种 CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO 异质结 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 溅射时长分别为 0、1、3 min) 器件在暗态下的 I-V 特性 (线性坐标与半对数坐标) 如图 4 所示。未退火时 (图 4 a), 无 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层的器件在低偏压区电流高于具有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层的器件, 说明间隔层对载流子注入与界面势垒具有抑制作用。其中, 1 min Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 器件的暗电流整体最低, 并表现出更明显的整流特性, 表明适宜厚度间隔层的引入有利于增强异质结界面调制作用<sup>[20]</sup>。相比之下, 3 min Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 器件在负偏压区的电流绝对值低于无 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 器件, 但明显高于 1 min 器件。而在正偏压区其电流随电压升高增长更快, 在较高偏压下超过无 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 器件, 说明当 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层进一步增厚后, 器件暗态输运行为不再表现为简单的持续抑制, 而是呈现出更复杂的非对称传输特征。通过半对数坐标 I-V 特性 (图 4 b) 进一步表明 1 min Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层的器件具有更低

的电流谷值，而 3 min  $\text{Al}_2\text{O}_3$  器件在近乎零偏压附近的最小电流值虽仍低于无  $\text{Al}_2\text{O}_3$  器件，但高于 1 min 器件，表明  $\text{Al}_2\text{O}_3$  间隔层厚度对暗态电流的调控具有非单调性。这可能是由于适度厚度的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层更有利于抑制界面直接注入并增强势垒调制，而较厚间隔层在进一步改变界面局域电场和载流子传输路径的同时，使器件在正负偏压下呈现出不同程度的输运差异。退火后三种器件的 I-V 曲线均为线性的（图 4c），表明其暗态输运更接近欧姆行为，这说明界面缺陷影响被减弱、传输通道更为通畅，薄膜致密化与界面接触改善以及缺陷态占据/分布的重新平衡，降低了界面非均匀势垒从而使整体输运更接近欧姆行为<sup>[21,22]</sup>。结合前述 XRD 与吸收光谱结果可知，退火后 ZnO 薄膜的局部结构有序性和光吸收能力均有所提升，这有助于减弱部分非理想结构对载流子输运的不利影响，并为器件暗态输运与光响应性能的改善提供了材料基础。由此可见， $\text{Al}_2\text{O}_3$  间隔层厚度与退火处理共同影响了器件的输运状态。

图 5 给出了  $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$  器件在紫外照射下的电流与时间变化曲线，所有器件均呈现典型持续光电导行为。在紫外照射时光电流随时间逐步上升，在停止光照后电流并未立刻回到初始暗态，而是出现缓慢衰减的长尾过程。（图 5a）中退火后样品在相同光照条件下表现出更强的光响应电流和兴奋性突触后电流，说明退火能有效增强器件的光响应性能以及延缓光电流的衰减。（图 5b）对比了不同溅射时长  $\text{Al}_2\text{O}_3$  间隔层的器件在相同光照条件下的响应电流，3 min  $\text{Al}_2\text{O}_3$  器件的峰值与残余电流更高且衰减更慢，而 1 min 与无间隔层样品整体更为接近，这表明较厚  $\text{Al}_2\text{O}_3$  间隔层的器件更易形成界面电荷积累并强化长时间尺度分量贡献<sup>[23,24]</sup>。（图 5c）的测试结果表明，随着紫外光功率密度的提高，光响应电流与兴奋性突触后电流同步增强，且响应曲线的衰减动力学特征基本一致，说明更高的光功率产生了更高的光生载流子密度，使得缺陷态被更充分地填充，从而增加了

俘获的电荷总量；而衰减形态的相似性则表明，主导电荷释放的载流子释放过程在整个功率范围内保持基本一致<sup>[25]</sup>。

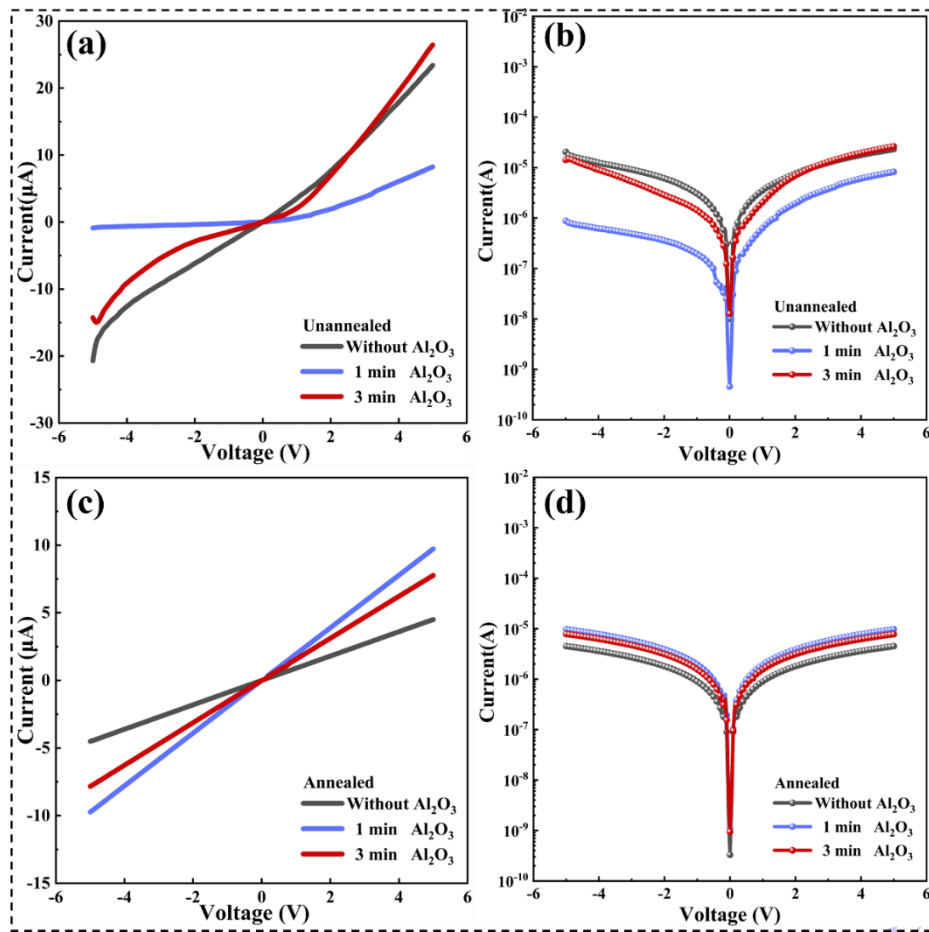


图 4 CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO 器件的暗态 I-V 特性（线性坐标与半对数坐标）：(a, b) 未退火, (c, d) Ar 氛围下 180°C退火 2 h

Fig.4. Dark I-V characteristics of CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO devices (linear and semi logarithmic coordinates): (a, b) unannealed, (c, d) annealed at 180 °C for 2 h in Ar atmosphere

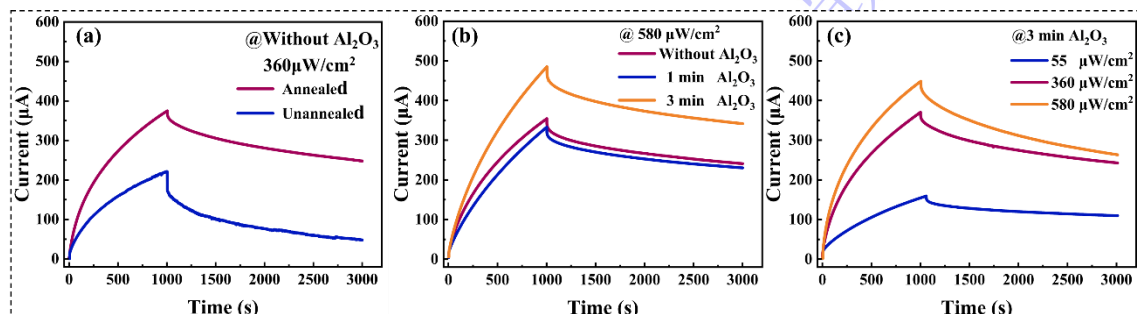


图 5 CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO 器件在紫外照射下的 I-T 变化曲线

Fig.5. I-T curve of CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO devices under UV irradiation

为评估器件的类突触“学习-记忆”特性，图 6 对三种退火后 CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO 器

件（0 min、1 min、3 min Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）的兴奋性突触后电流响应特性进行了对比。其中，图 6(a-c)在保持脉冲宽度为 1 s 的条件下，通过改变紫外光功率密度来研究光强对器件兴奋性突触后电流的影响；图 6(d-f)在光功率密度为 360 μW/cm<sup>2</sup> 条件下，采用 5 s 光照/5 s 黑暗的周期性脉冲，通过改变脉冲次数来分析电流的累积行为；图 6(g-i)在光功率密度同为 360 μW/cm<sup>2</sup> 条件下，通过改变单个光脉冲照射时长（1、2、5、10、20 s），研究光照持续时间对器件兴奋性突触后电流的调控作用。图 6(a-c)显示了不同紫外光功率下三种器件均能产生明显的兴奋性突触后电流响应，并随着脉冲周期性变化电流逐步累积增强的过程，可对应为神经突触的“学习”行为。停止光照后，光电流并不立即回到初始暗态，而是缓慢回落，对应神经突触的“记忆保持”。图 6(d-f)所示为在相同光功率密度的循环脉冲下，随着脉冲次数  $n$  增加，各周期末的兴奋性突触后电流逐步增加并呈现累积增强，说明相邻脉冲间存在未完全弛豫的电荷/缺陷占据状态，使后续脉冲的有效写入量叠加，从而实现“重复刺激-权重增强”的学习过程。图 6(g-i)给出了在相同功率密度下不同照射时长的结果，照射时间越长，光电响应峰值与兴奋性突触后电流均越大，体现出持续刺激可促进记忆巩固并增强长期保持。通过对比发现在三类不同刺激维度（强度、次数和时长）下光电流响应的总体演化趋势一致，但 3 min Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 器件普遍表现出更高的兴奋性突触后电流与更慢的衰减，而 0 min 与 1 min 样品残余电流相对较小、衰减更快。这些结果表明 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层对 CuO/ZnO 界面的载流子复合抑制与电荷俘获作用，它作为间隔层阻碍了界面处的电子与空穴直接复合，从而提高光生载流子的有效寿命与残余导电分量<sup>[26]</sup>。

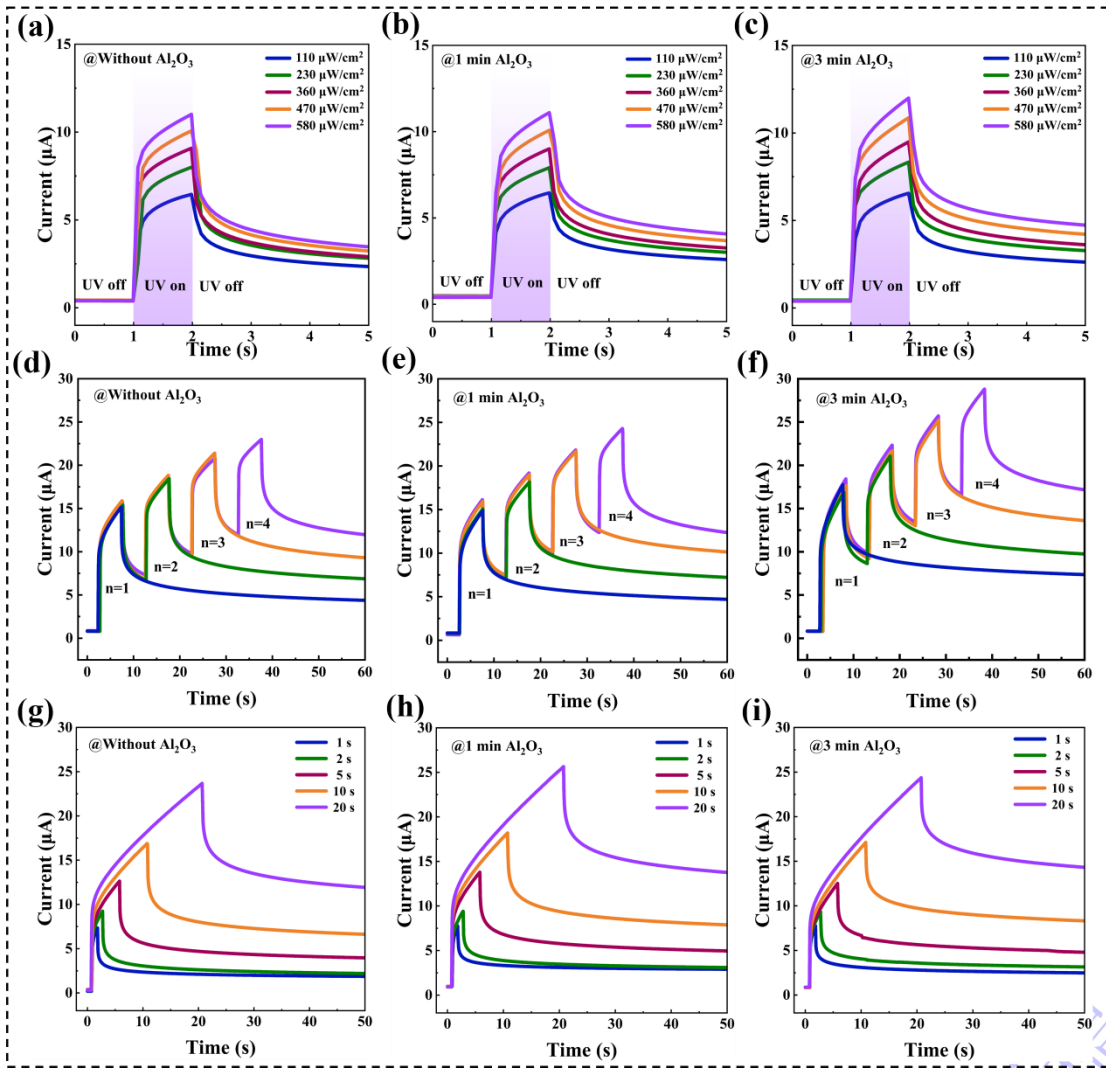


图 6 CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO 器件的类突触学习与记忆行为: (a-c) 不同紫外光功率密度下 1 s 单脉冲诱导的兴奋性突触后电流, (d-f) 360  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、5 s 光照/5 s 黑暗循环脉冲下, 兴奋性突触后电流随脉冲次数的演化, (g-i) 360  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  下, 不同单脉冲照射时长 (1、2、5、10、20 s) 诱导的兴奋性突触后电流响应

Fig.6. Synaptic like learning and memory behavior of CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO devices: (a-c) Excitatory postsynaptic current induced by 1 s single pulse at different UV densities, (d-f) Evolution of excitatory postsynaptic current with pulse number under cyclic UV pulses of 5 s light/5 s dark at 360  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , (g-i) Excitatory postsynaptic current responses induced by different single-pulse irradiation durations (1, 2, 5, 10, and 20 s) at 360  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

图 7(a-c)给出了三种 CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO 器件在相同光功率密度 (360  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) 和相同 1 秒脉冲宽度条件下、经 10 个等幅紫外脉冲激发后的电流-时间响应。测试中通过改变关光时长 (分别为 10 s、4 s、2 s、1.25 s、1 s) 来调节脉冲周期。

随着关光时长逐渐缩短，脉冲电流峰值整体下降，而兴奋性突触后电流基线逐渐抬升，体现出典型的频率依赖可塑性，表明当脉冲间隔接近或小于器件的载流子俘获/释放弛豫时间常数时，缺陷态占据与界面电势难以在相邻脉冲间充分重整，导致后续脉冲的增量响应受限，并使关光阶段更易体现快速复合/浅能级相关的快速衰减分量<sup>[27,28]</sup>。在任一给定脉冲条件下，当器件的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层沉积时间由 0 min 增至 3 min 时，电流衰减逐步减缓且残余电流更高，表明较厚  $\text{Al}_2\text{O}_3$  间隔层增强了脉冲序列后的残余电流，并延缓关光后的衰减过程。该差异可归因于间隔层对  $\text{CuO}/\text{ZnO}$  界面能带对齐与界面态环境的调制：光生载流子更易在半导体/间隔层邻近界面区域发生分离与滞留，从而延长有效弛豫时间并提高残余电流<sup>[29]</sup>。

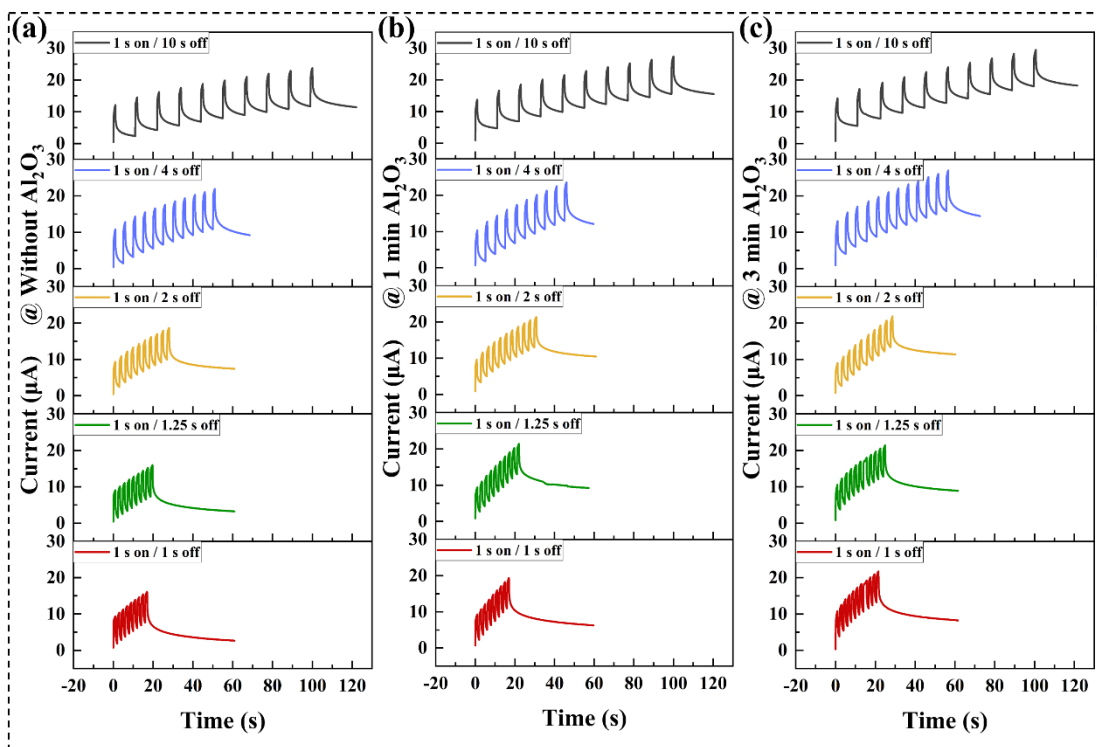


图 7  $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$  器件在不同脉冲周期条件下的 I-T 曲线 (测试中光功率密度均为  $360 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , 单个脉冲宽度均为 1 s, 脉冲个数为 10): (a) 0 min  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , (b) 1 min  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和(c) 3 min  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Fig.7. I-T curves of  $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$  devices under different pulse period conditions (the optical power density in all tests is  $360 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , the single pulse width is 1 s, and the number of pulses is 10): (a) 0 min  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , (b) 1 min  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and (c) 3 min  $\text{Al}_2\text{O}_3$

为进一步比较不同  $\text{Al}_2\text{O}_3$  间隔层对器件类突触响应的影响，图 8 给出了相关电流参数及循环重复性测试结果。如图 8(a)所示，在 1 s 紫外光脉冲和  $580 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  光功率密度下，0 min、1 min 和 3 min  $\text{Al}_2\text{O}_3$  器件的峰值兴奋性突触后电流分别为 11.01、11.19 和 11.99  $\mu\text{A}$ ，说明  $\text{Al}_2\text{O}_3$  间隔层增加后器件对光脉冲刺激的响应幅值有所提高。图 8(b)为  $360 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  光功率密度和 20 s 光照条件下 50 s 时的残余电流保持率，三种器件的保持率分别为 50.38%、53.71%和 58.72%，表明 3 min  $\text{Al}_2\text{O}_3$  器件具有更强的关光后电流保持能力。图 8(c)给出了  $360 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、1 s on/1 s off 脉冲条件下的电流量，随着  $\text{Al}_2\text{O}_3$  溅射时间由 0 min 增加至 3 min，基线电流抬升量由 16.15  $\mu\text{A}$  增加至 20.58  $\mu\text{A}$ ，说明  $\text{Al}_2\text{O}_3$  间隔层有利于增强连续脉冲刺激下的电流累积效应。进一步地，在  $360 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、1 min 光照/1 min 黑暗循环条件下，三种器件均表现出稳定的重复响应和关光衰减行为，说明器件具有较好的循环重复性。上述结果表明， $\text{Al}_2\text{O}_3$  间隔层能够调控器件的光响应幅值、残余电流保持和脉冲累积行为。

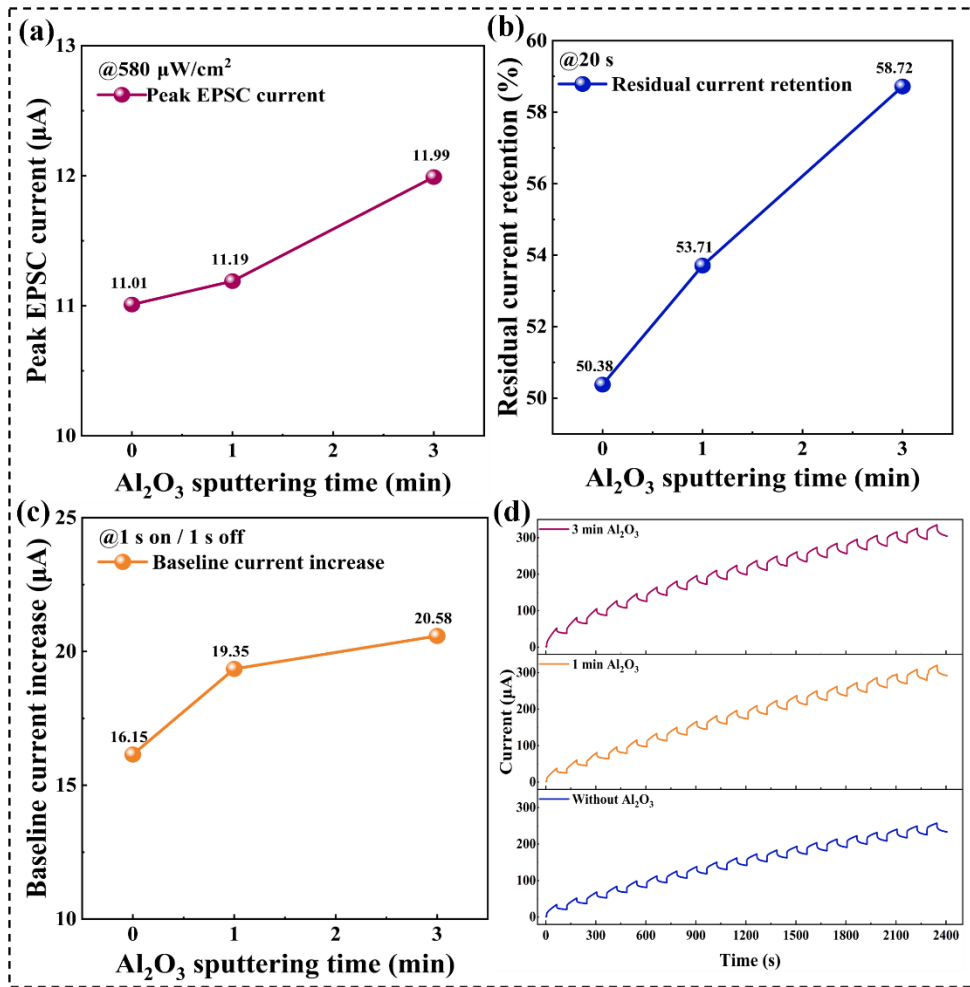


图 8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层对 CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO 器件关键突触参数及循环重复性的影响: (a) 580 μW/cm<sup>2</sup>、1 s 紫外光脉冲下三种器件的峰值兴奋性突触后电流, (b) 360 μW/cm<sup>2</sup>、20 s 光照条件下 50 s 时三种器件的残余电流保持率, (c) 360 μW/cm<sup>2</sup>、1 s on/1 s off 脉冲条件下三种器件的基线电流抬升量, (d) 360 μW/cm<sup>2</sup>、1 min 光照/1 min 黑暗循环条件下三种器件的重复性测试

Fig.8. Effect of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interlayer on key synaptic parameters and cycling repeatability of CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO devices: (a) Peak excitatory postsynaptic current of the three devices under a 1 s UV pulse at 580 μW/cm<sup>2</sup>, (b) Residual current retention of the three devices at 50 s under 360 μW/cm<sup>2</sup> UV irradiation for 20 s, (c) Baseline current increase of the three devices under the 360 μW/cm<sup>2</sup> UV irradiation for 1 s on/1 s off pulse condition, (d) Repeatability test of the three devices under 360 μW/cm<sup>2</sup> and 1 min light/1 min dark cycles.

为了表征器件的短时突触可塑性, 采用两次相同光脉冲刺激来提取成对脉冲促进 (PPF) 指数<sup>[30]</sup>:

$$PPF = A_2/A_1 \times 100\% \quad (1)$$

其中, A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 分别为第一和第二光脉冲诱导的兴奋性突触后电流峰值。在 3

min Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 器件上 (图 9 a), 当施加两次相同强度与持续时间的光刺激时, 可观察到 A<sub>2</sub> 明显大于 A<sub>1</sub>, 说明在两次刺激间隔  $\Delta t$  内前一脉冲产生的光生载流子尚未完全复合, 其残余部分与第二次激发叠加, 从而增强了后续突触响应<sup>[31,32]</sup>。图 9(b) 给出了三种器件的 PPF 随  $\Delta t$  的变化关系, 随着脉冲间隔  $\Delta t$  增大, PPF 指数逐步下降并接近 100%, 意味着间隔时间越长, 第一次刺激产生的俘获占据与残余载流子恢复的越充分, 第二次刺激的促进效应随之减弱。这表明引入较厚 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层使得器件在前一脉冲残留的载流子得以在更长时间尺度上参与后续突触事件的叠加, 从而实现更强、更持久的成对脉冲促进效应。

为进一步定量分析 PPF- $\Delta t$  依赖关系, 图 9(b)中采用双指数函数拟合<sup>[33]</sup>:

$$\text{PPF}(\Delta t) = 1 + C_1 \exp(-\Delta t/\tau_1) + C_2 \exp(-\Delta t/\tau_2) \quad (2)$$

其中,  $\Delta t$  为两个连续刺激脉冲的时间间隔, C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 分别为快过程和慢过程的权重,  $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别对应快过程和慢过程的弛豫时间, 拟合得到的各器件参数如表 2 所示。可以看出三种器件均同时存在秒级的快速弛豫与 10<sup>3</sup> s 量级的缓慢弛豫, 表明 PPF 可由快、慢两类过程共同贡献<sup>[34-36]</sup>, 其中 3 min Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 器件具有 C<sub>2</sub> 慢分量贡献更大且  $\tau_1$  快过程弛豫更慢, 与其在测试时间内表现出的较高 PPF 水平及较慢衰减相一致, 说明增厚间隔层可增强慢过程贡献并减缓快过程弛豫。

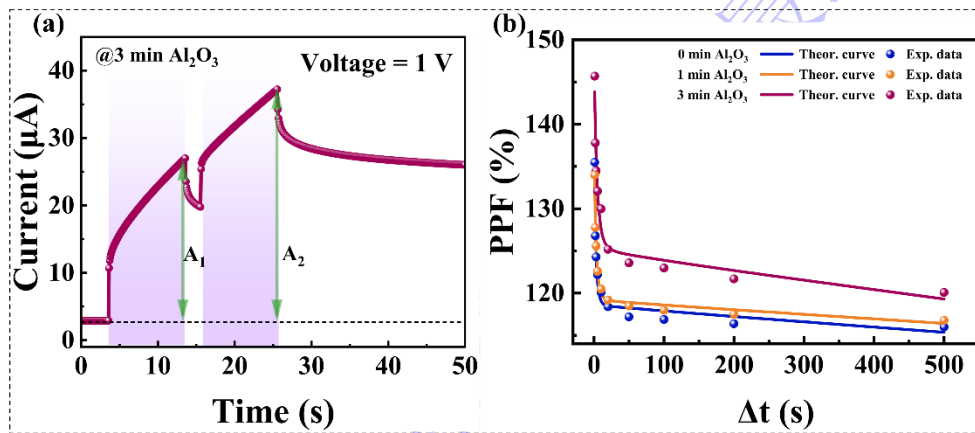


图 9 CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO 器件的成对脉冲促进特性: (a) 3 min Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 器件在两次紫外脉冲刺激下的兴奋性突触后电流响应, A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 分别为第一和第二脉冲峰值, (b) 三种器件的配对脉冲促

进随脉冲间隔  $\Delta t$  的变化（球形点）及双指数拟合曲线（实线）

Fig.9. Paired pulse promotion characteristics of CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO devices: (a) Excitatory postsynaptic current response of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> devices under two UV pulse stimuli for 3 min, with A<sub>1</sub> and A<sub>2</sub> being the first and second pulse peaks, respectively, (b) The paired pulse promotion of three devices varies with the pulse interval  $\Delta t$  (spherical point) and double exponential fitting curve (solid line)

表 2 三种 CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO 器件 PPF- $\Delta t$  曲线的双指数拟合参数 ( $C_1$ 、 $C_2$ 、 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ )

Table 2 Double exponential fitting parameters for PPF -  $\Delta t$  curves of three CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO devices ( $C_1$ 、 $C_2$ 、 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ )

CuO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ZnO 器件	$C_1$	$C_2$	$\tau_1$ (s)	$\tau_2$ (s)
0 min Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.271	0.186	1.95	$2.62 \times 10^3$
1 min Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.213	0.192	2.51	$3.20 \times 10^3$
3 min Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.243	0.252	3.78	$1.88 \times 10^3$

结合持续光电导、频率依赖可塑性及配对脉冲促进结果可知，器件的类突触行为本质来源于光生载流子分离、界面势垒调制以及俘获-释放过程的共同作用。如图 10 所示，在紫外光照下，ZnO 层作为主要吸收层产生电子-空穴对，在异质结内建电场与外加电场的协同作用下，电子向 ZnO/ITO 一侧迁移，空穴向 CuO/Cu 一侧漂移，从而提高电子与空穴的空间分离程度并降低直接复合概率。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层的引入进一步削弱了 CuO 与 ZnO 的直接接触，一方面增强界面势垒对载流子运输的调制，另一方面使 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 邻近界面区域保留部分分离载流子。当停止紫外光照后，残余的载流子没有立即恢复到初始暗态，而是经历缓慢的释放和延迟复合过程，此时器件表现出持续光电导特征，在脉冲光刺激下，这种残余占据状态又会继续参与后续响应叠加，进一步体现为较高的兴奋性突触后电流、更慢的衰减以及更明显的配对脉冲促进和记忆保持行为。结合实验结果表明，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层的引入以及适当的厚度有利于增强上述慢过程贡献，从而提高器件的持续光电导保持能力和类突触可塑性表现。

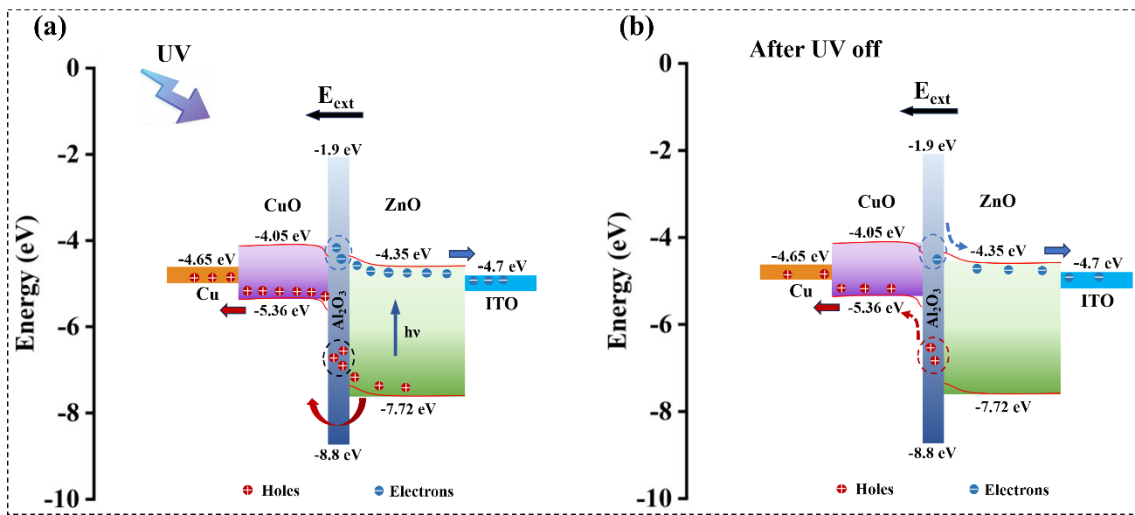


图 10 CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO 异质结器件能带结构示意图：(a) 紫外光照下，(b) 停止光照后

Fig.10. Schematic diagram of the band structure of CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO heterojunction device: (a) under UV irradiation, (b) after light irradiation

## 4 总结

采用磁控溅射法在玻璃基底上设计制备了 CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO 异质结器件，改变了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 溅射时长并结合退火处理，对材料结构、暗态输运、持续光电导动力学与类突触行为进行了系统对比。结果表明，器件具有较好的层状完整性，退火后 ZnO 薄膜出现弱的(002)特征衍射峰，且吸收整体略有增强，说明热处理对薄膜局部结晶和光学响应具有一定改善作用。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层对暗态漏电与整流/线性输运具有调制作用，器件在紫外光照下均表现出可重复的持续光电导长尾衰减，且功率密度升高会同步增强光电流累积与关光保持；在相同激励下，3 min Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 器件通常呈现更高的残余电流保持与更慢的衰减特征。进一步的脉冲光突触结果表明，器件可实现兴奋性突触后电流、短期记忆/长期记忆类学习记忆以及频率依赖可塑性与配对脉冲促进等典型突触功能；双指数拟合揭示快慢两类弛豫过程共同贡献，其中 3 min Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 器件的慢过程贡献更为突出。总之，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 间隔层厚度能够在不改变器件基本响应模式的前提下，对持续光电导动力学及突触记忆保持分量进行有效调制，为后续 ZnO 基光电突触器件的结构设计与性能对比提供了实验依据。

## 参考文献

- [1] Liu J Q, Gong J D, Wei H H, Li Y M, Wu H X, Jiang C P, Li Y X, Xu W T 2022 *Nat. Commun.* **13** 7427 <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35092-w>
- [2] Wen X Y, Wang Y S, He Y H, Liao X S 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 140501 (in Chinese)  
[温新宇, 王亚赛, 何毓辉, 缪向水 2022 物理学报 **71** 140501]  
<https://doi.org/10.7498/aps.71.20220666>
- [3] Dalapati P, Yamamoto K, Kubo T, Egawa T, Miyoshi M 2021 *Optik* **245** 167691  
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167691>
- [4] Liu Y, Guo J M, Wang J, Zhao Y W, Zhang Y T, Gu G X, Ruan H R, Li P F, Sun Y, Zhang L Y, Du Z L, Cheng G 2025 *Chem. Eng. J.* **525** 170213  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.170213>
- [5] Kim D, Leem J Y 2021 *Sci. Rep.* **11** 382 <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79849-z>
- [6] Malik N, Gupta D, Kumar A, Singhal R, Kumar S, Aggarwal S 2025 *Results. Surf. Interf.* **19** 100480 <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2025.100480>
- [7] Kaur A, Sikdar S, Sahu B P, Patra U, Dhar S 2025 *ACS Appl. Electron. Mater.* **7** 4472 <https://doi.org/10.1021/acsaelm.5c00313>
- [8] Sunny A, Thamankar R 2024 *AIP Adv.* **14** 085010  
<https://doi.org/10.1063/5.0203002>
- [9] Li X Q, Yi L, Yin X M, Cheng J F, Xin Q, Song A 2025 *npj Flex. Electron.* **9** 57  
<https://doi.org/10.1038/s41528-025-00425-4>
- [10] Xu L P, Xiong H, Fu Z C, Deng M H, Wang S Y, Zhang J Z, Shang L Y, Jiang K, Li Y W, Zhu L Q, He L, Hu Z G, Chu J H 2021 *Phys. Rev. Appl.* **16** 044049

<https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.044049>

- [11] Gao K C, Ran S L, Han Q, Yang Q, Jiang H, Fu J T, Leng C Q, Feng S L, Zhou D H, Li Z C, Li X, Huang D P, Yu L Y, Shen J 2022 *Opt. Mater.* **124** 112013  
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112013>
- [12] Shang G X, Tang L B, Wu G, Yuan S Z, Jia M H, Guo X P, Zheng X, Wang W, Yue B, Teng K S 2023 *Sensors* **23** 2741 <https://doi.org/10.3390/s23052741>
- [13] Ma H Y, Liu K W, Cheng Z, Zheng Z Y, Liu Y Z, Zhang P X, Chen X, Liu D M, Liu L, Shen D Z 2021 *Chin. Phys. B* **30** 087303 <https://doi.org/10.1088/1674-1056/ac0131>
- [14] Liang H L, Cui S J, Huo W X, Wang T, Zhang Y H, Quan B G, Du X L, Mei Z X 2019 *Chin. Phys. Lett.* **36** 110701 <https://doi.org/10.1088/0256-307X/36/11/110701>
- [15] Wang Y L, Wang M X, Zhang D L, Wang H S 2020 *Chin. Phys. B* **29** 118101  
<https://doi.org/10.1088/1674-1056/abb222>
- [16] Shen L F, Hu L X, Kang F W, Ye Y M, Zhuge F 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 148505 (in Chinese) [沈柳枫, 胡令祥, 康逢文, 叶羽敏, 诸葛飞 2022 物理学报 **71** 148505] <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220111>
- [17] Zhang Z, Li F P, Peng W B, Zhu Q Z, He Y N 2024 *Sensors* **24** 8197  
<https://doi.org/10.3390/s24248197>
- [18] Liu S S, Li M Y, Zhang J B, Su D, Huang Z, Kunwar S, Lee J 2020 *Nano-Micro Lett.* **12** 114 <https://doi.org/10.1007/s40820-020-00455-9>
- [19] Jeon D, Lee S H, Cho J B, Kim K B, Lee S N 2025 *Materials* **18** 4377  
<https://doi.org/10.3390/ma18184377>
- [20] Li S Y, Yang F X, Sun H, Dong X F, Li Y 2026 *Mater. Lett.* **407** 140045

<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2026.140045>

- [21] Shin J, Yoo H 2023 *Nanomaterials* **13** 882 <https://doi.org/10.3390/nano13050882>
- [22] Huo Z H, Zhang Y F, Han X, Wu W Q, Yang W K, Wang X D, Zhou M M, Pan C F 2021 *Nano Energy* **86** 106090 <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106090>
- [23] Ma X Z, Tang L B, Jia M H, Zhang Y P, Zuo W P, Cai Y H, Li R, Yang L Q, Teng K S 2024 *Adv. Electron. Mater.* **10** 2300909 <https://doi.org/10.1002/aelm.202300909>
- [24] Song Y X, Li Y Q, Wang L H, Zhang X L, Wang C, Wang Q S 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 226801 (in Chinese) [宋雨心, 李玉琦, 王凌寒, 张晓兰, 王冲, 王钦生 2023 物理学报 **72** 226801] <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231000>
- [25] Wang C J, Yang X, Zang J H, Chen Y C, Lin C N, Liu Z X, Shan C X 2020 *Chin. Phys. B* **29** 058504 <https://doi.org/10.1088/1674-1056/ab8891>
- [26] Cao F, Hong E L, Hu Z J, Liu Y, Sun B, He J H, Fang X S 2024 *Nano Energy* **120** 109135 <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.109135>
- [27] Labed M, Kim K, Kim K H, Hong J, Rim Y S 2024 *Sens. Actuators A* **372** 115368 <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115368>
- [28] Oommen R, Ganapathi Mavuri D S, Jose K, Nair A R 2024 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **57** 465102 <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad6dff>
- [29] Xu B B, Shen H L, Xu Y J, Ge J W, Wang S, Zhao Q C, Lai B K 2021 *J. Alloys Compd.* **874** 159864 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159864>
- [30] Liu Q, Ni Y, Liu L, Sun L, Liu J Q, Xu W T 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 148501 (in Chinese) [刘强, 倪尧, 刘璐, 孙林, 刘甲奇, 徐文涛 2022 物理学报 **71** 148501] <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220303>

- [31] Jeon D, Lee S H, Lee S N 2025 *Materials* **18** 1321  
<https://doi.org/10.3390/ma18061321>
- [32] Thirumoorthi M, Dhavud S S, Ganesh V, Al Abdulaal T H, Yahia I S, Deivatamil D  
2022 *Opt. Mater.* **128** 112410 <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112410>
- [33] Li H D, Jiang D Y, Zhao M 2024 *J. Alloys Compd.* **1005** 176217  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.176217>
- [34] Shrivastava S, Limantoro S E, Juliano H, Tseng T Y 2025 *APL Mater.* **13** 071105  
<https://doi.org/10.1063/5.0261193>
- [35] Bhatt V, Kumar M, Kim J, Chung H J, Yun J H 2019 *Ceram. Int.* **45** 8561  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.01.174>
- [36] Sunny A, Thamankar R 2025 *Appl. Surf. Sci.* **684** 161767  
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161767>

录用稿件，非最终出版稿

# Sustained Photoconductivity Enhancement and Synapse-Like Properties of CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO Multilayer Heterojunctions\*

YANG Liang<sup>1</sup> DING Jijun<sup>1,†</sup> QU Yongfeng<sup>1</sup> DANG Bo<sup>2</sup> REN Boquan<sup>1</sup> CHEN Haixia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shaanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas Wells, School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China

<sup>2</sup>School of Electronic Engineer, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China

The sustained photoconductivity of ZnO offers the potential for developing ZnO-based optoelectronic synaptic devices. However, the decay dynamics of sustained photoconductivity and the retention characteristics of the synaptic response are significantly influenced by interface recombination, defect state occupancy, and carrier transport at the heterojunction interfaces. Consequently, designing the interface structure is an effective strategy to regulate the optoelectronic synaptic performance of ZnO-based heterojunction devices. In this paper, Cu/CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO/ITO multilayer heterojunction device is fabricated on glass substrates using magnetron sputtering. The device performance is modulated by varying the sputtering time of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interlayer (0 min, 1 min, and 3 min) and by introducing post-annealing treatment in an Ar atmosphere. The structure and electrical properties are characterized using SEM, EDS, XRD, absorption spectroscopy, current-voltage measurements, and time-dependent photoresponse. The results indicate that the device exhibits a distinct multilayer structure, and the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interlayer produces pronounced modulation of the dark-current characteristics. After annealing, the dark-state transport behavior of the devices becomes more closely approximated by Ohmic conduction, while distinguishable electrical differences are retained among devices with different interlayer conditions. Under 365 nm ultraviolet light irradiation, all devices display typical persistent photoconductivity with a retention-and-decay response after the removal of UV excitation. Both the photocurrent amplitude and residual-current retention increase with increasing light power density. Compared to the device without an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interlayer, the

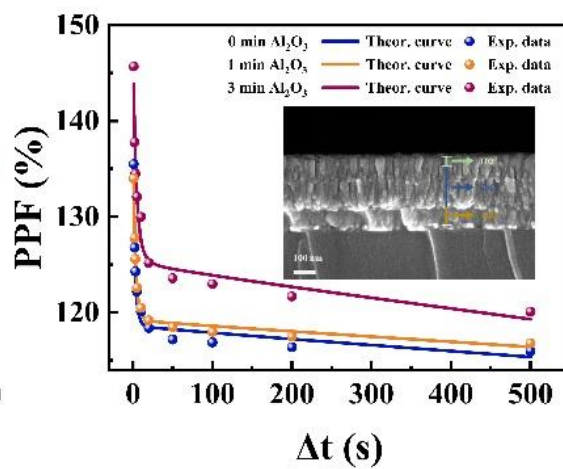
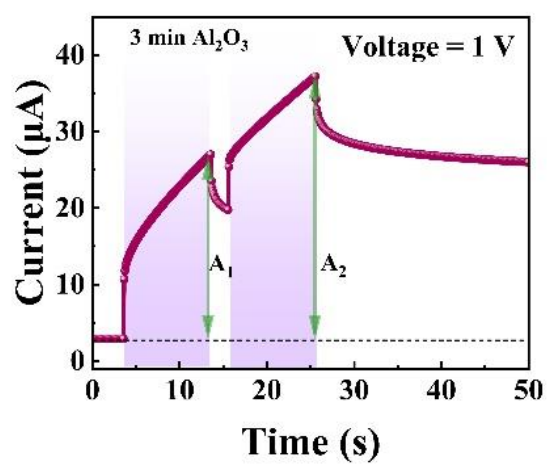
device with a 3 minute Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interlayer sputtering time demonstrates stronger residual-current retention and slower photocurrent decay.

Under pulsed light stimulation, all three devices can achieve adjustable excitatory postsynaptic currents, transition from short-term memory to long-term memory, frequency-dependent plasticity, and paired-pulse facilitation. Double-exponential process fitting reveals that a rapid relaxation process on the second scale and a slow relaxation process on the order of 10<sup>3</sup> s jointly contribute to the photoresponse decay. These results suggest that the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interlayer plays an important role in coordinating interfacial carrier transport, persistent-photoconductivity retention, and synaptic relaxation dynamics. This work provides useful guidance for the interface-structure design and dynamic regulation of ZnO-based optoelectronic synaptic devices.

**Keywords:** Multilayer heterojunction; Magnetron sputtering; Photoconductivity; Dark current

\* This work was supported by the Natural Science Foundation of Shaanxi Province (Grant No. 2024JC-YBMS-060), Scientific Research Innovation Capability Support Project for Young Faculty (Grant No. SRICSPYF-BS2025031), the Intelligent Monitoring and Control of Oil and Gas Wells Youth Scientific Research and Innovation Team (Grant No. 2022QNKYCXTD02), and Postgraduate Student Innovation Project of Xi'an Shiyou University (Grant No. YCX2513178).

# 摘要图



录用稿件，非最终出版稿