

基于负光电导效应的 PtSe₂ 光电突触器件 机理特性与感存算功能*

梁卜嘉¹⁾ 危波¹⁾²⁾ 康艳¹⁾ 豆树清¹⁾ 夏永顺¹⁾
郭宝军¹⁾ 崔焕卿¹⁾ 李佳¹⁾ 杨晓阔^{1)†}

1) (空军工程大学基础部, 西安 710051)

2) (国防科技大学计算机学院, 长沙 410073)

(2025 年 3 月 27 日收到; 2025 年 5 月 23 日收到修改稿)

具有感存算一体的高性能光电突触器件对于开发神经形态视觉系统 (NVS) 至关重要. 本文制备了具有负光响应的 PtSe₂ 光电突触器件, 测试了该器件在光脉冲刺激下呈现出抑制性突触后电流, 同时实现了光学可调的突触行为, 包括双脉冲易化、短程可塑性、长程可塑性. 此外, 器件表现出对光持续时间的依赖性, 模拟 3×3 传感器阵列展示和验证了图像原位传感和存储功能. 利用 28×28 器件阵列结合人工神经网络, 实现了视觉信息的集成感知-存储-预处理功能, 实验结果表明, 预处理后 (去噪后) 的图像在经过 100 个 epoch 训练后达到 91% 的准确率. 最后, 利用器件对不同波长光照所响应的负光电导不同, 建立了光电突触逻辑门: 或非 (“NOR”)、与非 (“NAND”) 和异或 (“XOR”), 实现了图像逻辑运算. 研究结果有力地推进了 PtSe₂ 负光响应光电突触器件的应用, 为更加集成和高效的 NVS 铺平道路.

关键词: PtSe₂, 负光电导效应, 神经形态系统, 感存算, 图像逻辑运算

PACS: 85.35.-p, 72.20.-i, 85.25.Hv

DOI: 10.7498/aps.74.20250403

CSTR: 32037.14.aps.74.20250403

1 引言

人工视觉系统作为人工智能获取外界信息的核心模块, 其性能直接影响智能系统的感知处理能力. 传统的人工视觉系统主要由 3 个部分组成^[1]: 感知单元接受光信号并将其转换为电信号, 存储单元存储光信息, 处理单元对信号进行处理计算. 然而, 这种感、存、算分离的视觉系统不可避免地使单元设备之间存在物理距离, 造成数据的冗余和延时^[2], 并伴随大的硬件开销和高功耗. 相比之下, 人类视觉神经系统通过视网膜高效的层级预处理机制, 可降低原始光信号的冗余信息. 对于人类而言,

超过 80% 的外界信息是由视觉神经系统感知和获取, 外界大量的视觉信息首先通过视网膜进行预处理, 之后再通过视觉神经将精简后的信息传递到大脑皮层形成视觉^[3,4]. 受此启发, 模拟生物视觉的感知-存储-处理一体化特性的神经形态视觉系统 (neuromorphic vision systems, NVS), 正成为突破传统架构瓶颈的重要方向^[5-10].

光电突触器件因为具有高集成度、宽光谱感知及仿生视觉处理等优点, 成为神经形态系统中模拟神经形态视觉的关键硬件^[11]. 二维材料由于具有原子级别厚度、高的载流子迁移率以及大的表面积比等优点, 在构筑新型光电突触器件中展现出独特优势^[12-15]. 迄今为止, 研究人员已经根据不同的工

* 国家自然科学基金 (批准号: 62274183) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yangxk0123@163.com

作机制开发了各种不同结构的光电突触器件. 然而, 由于绝大多数二维半导体材料在光刺激下产生光生载流子导致电导增大, 难以实现模拟抑制相关的突触功能. PtSe_2 薄膜作为一种 p 型新兴二维材料, 通过激光照射使物理吸附在 PtSe_2 的氧气分子脱离, 导致通道电导率中的载流子浓度降低, 使 PtSe_2 具有明显的负光电导 (negative photoconductivity, NPC) 效应 [16], 该独特的光响应机制引起了广泛关注. 但 PtSe_2 的 NPC 效应的突触特性在神经形态方面的应用较少, 这极大限制了多功能光电突触器件的发展. NPC 效应也可以由电荷转移 [17]、表面等离子体共振 [18] 等产生, 但是以秒为单位的慢光电流响应 [19,20] 和严苛的产生条件, 如高栅极电压 [17,21]、低于 79 K 的低温 [22,23] 和高真空 [22] 等限制了器件的应用. 因此以简单器件结构在室温下和正常大气压下实现 NPC 效应及其应用是很重要的.

本文以 PtSe_2 两端光电突触器件为基础, 利用 28×28 突触阵列结合人工神经网络 (ANN) 实现感、存、预处理功能, 去噪后的改进版美国国家标准与技术研究院数据集 (Modified National Institute of Standards and Technology Dataset, MNIST) 在经过 100 epoch 后识别准确率从 50% 显著提高至 91%. 建立“NOR”, “NAND”和“XOR”逻辑门, 利用 PtSe_2 两端光电突触实现了图像处理功能, 包括膨胀、侵蚀、差异检测. 根据器件负光电响应特性和光控突触可塑性特性, 实现了神经形态视觉的感存算一体化, 为具身人工智能、边缘智能等提供了可集成化方向.

2 PtSe_2 光电器件

2.1 器件制备与测试

器件制备: 通过化学气相运输法 (chemical vapor transport, CVT) 合成了特征尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的双层 PtSe_2 薄膜, 该材料由六碳科技 (深圳) 提供. 在高真空石英管中封装 PtSe_2 , 加热 5% 的碘作为传输剂. 高温区 $950 \text{ }^\circ\text{C}$, 低温区 $850 \text{ }^\circ\text{C}$, 生长 200 h. 在低温区沉积晶体. 晶体沉积好后通过机械剥离的方式剥离出薄层薄膜, 然后通过定位光刻曝光和电子束沉积的方式做金电极, 器件光学图像见图 1(a).

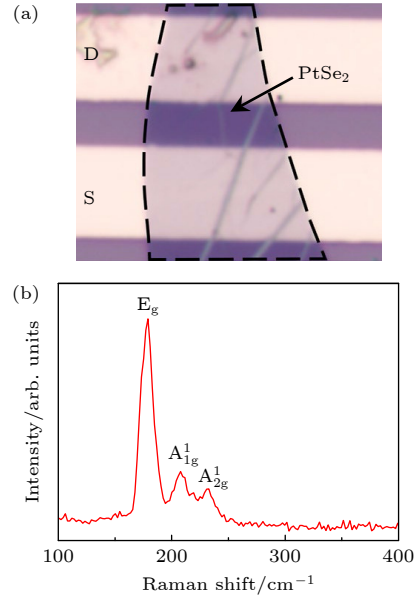


图 1 (a) PtSe_2 的光学图像; (b) 拉曼光谱图
Fig. 1. (a) Optical image of PtSe_2 ; (b) Raman spectra.

测试方法: 器件金属电极通过钨针探针台连接于源表. 光电测试使用吉时利 4200 和 2636B 数字源表进行, 4200 用于输入突触器件时域电信号, 2636B 用于输入漏源电压和采集漏源电流. 使用波长为 532 nm (绿)、405 nm (蓝)、1550 nm (近红外) 的激光器作为激光源, 用光功率计 (索雷博光电科技) 标定光脉冲刺激的功率密度.

对 PtSe_2 薄膜进行了拉曼光谱表征. 如图 1(b) 所示, 在 180 cm^{-1} , 209 cm^{-1} 和 231 cm^{-1} 处观察到 3 个主要拉曼峰. 其中 180 cm^{-1} 处的峰对应于 E_g 对称性的面内振动模式, 而 209 cm^{-1} 和 231 cm^{-1} 处的峰则归属于 A_{1g} 的面外振动模式. 这些特征峰的位置与文献 [24,25] 报道结果高度吻合.

2.2 光电突触特性研究

人类视觉系统具备将信息感知获取与多层级神经处理功能有机整合的特性. 如图 2(a) 所示, 当光刺激通过角膜和晶状体到达光感受器时, 它们会被视杆细胞和视锥细胞吸收, 产生电脉冲. 这些脉冲被传输到视网膜的神经网络进行存储和预处理, 提取和编码移动物体的颜色、亮度和速度等特征, 随后传递到大脑, 由视觉皮层接收提取的精简信息, 进行更复杂的信息加工 [5,26]. 受人类视觉启发, 设计了一种基于 PtSe_2 的感、存、算一体的光电突触器件, 如图 2(b) 所示, 该器件采用 PtSe_2 作为沟道层传输光电流, 光脉冲信号模拟突触前神经元的

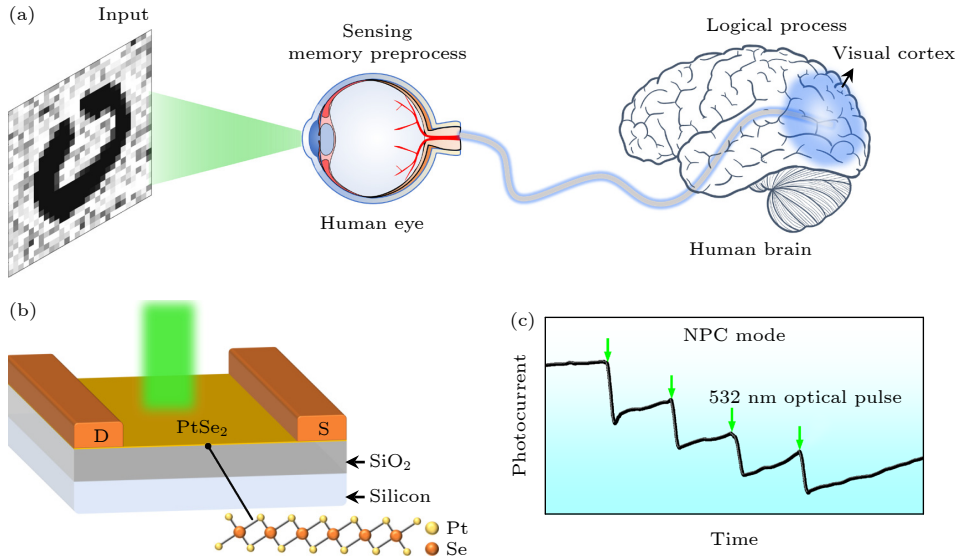


图 2 (a) 人类视觉系统示意图; (b) PtSe_2 的光电突触器件示意图; (c) 532 nm 光照射下 PtSe_2 的光电突触的负光电突触响应
 Fig. 2. (a) Schematic of human visual system; (b) schematic of PtSe_2 photoelectric synaptic device; (c) response curve under 532 nm light irradiation.

视觉信号刺激, 漏源电流作为突触后神经元的响应. 该器件在 532 nm 光激发下具有渐进可调的负光电流, 对应抑制性突触后电流 (inhibitory post-synaptic current, IPSC), 如图 2(c) 所示, 暗态高电流与光照低电流形成天然的二进制决策边界. 这种光响应特性与视网膜 OFF 型双极细胞的超极化反应高度相似, 其响应幅值变化趋势与膜电位超极化方向一致, 即向负值增大的方向变化^[27], 这种仿生特性不仅可以用于图像降噪、识别和逻辑处理等场景, 更重要的是真实模拟视网膜中的信号接收感知 (光信号)、转换传导 (电信号)、处理和修饰. 在相同静态偏置条件下 (仅存在读取电压 V_{ds} , 无光照), 相比于正光响应施加光照引起电流增大从而增强对比度, 负光响应通过降低光照区域的电流来增强对比度, 从而在一定程度上降低功耗.

光电突触在光刺激下抑制性突触后电流的变化值 ΔIPSC 的弛豫过程对于模拟生物突触可塑性和记忆行为至关重要. 为系统研究器件的光突触响应特性, 施加 532 nm 光脉冲刺激, 在给定读取电压 $V_{\text{ds}} = 0.1 \text{ V}$ (后文若无特殊说明均采用此参数) 下测量 ΔIPSC 的动态变化. 如图 3(a)–(c) 所示, 光脉冲触发后器件的 ΔIPSC 幅值呈现瞬时下降, 并在撤光后逐渐恢复. 在图 3(a) 中, 固定读取电压 0.1 V, 光功率 9.5 mW/cm^2 , $|\Delta\text{IPSC}|$ 的值随光脉冲持续时间的延长而增大; 为了研究器件在不同光脉冲功率下 $|\Delta\text{IPSC}|$ 随时间的变化, 将光脉冲

持续时间固定为 2 s, 图 3(b) 显示了施加光强从 5.5 mW/cm^2 增至 15.6 mW/cm^2 时, $|\Delta\text{IPSC}|$ 随时间的变化. 由图 3(a), (b) 可知, 随着光脉冲的持续时间和光功率强度的增大, 器件的 $|\Delta\text{IPSC}|$ 和保留时间逐渐增大, 表明器件逐渐从突触短期可塑性 (STP) 向长期可塑性 (LTP) 转变. $|\Delta\text{IPSC}|$ 与读取电压的关系如图 3(c) 所示, 固定测试条件光强 9.5 mW/cm^2 , 持续时间 2 s, 值得注意的是, 器件即使在低电压工作条件下 ($V_{\text{ds}} = 0.01 \text{ V}$), 仍能保持稳定的突触可塑性, 这表明可以通过施加低电压来最大限度地降低功耗, 具备低功耗的应用潜力. 同时, 在弱光条件下, 可以通过提高工作电压来增大光电突触的变化幅度.

为了量化光诱导的突触记忆特性, 引入记忆保持因子 (memory retention, MR) 作为评价指标^[28,29], 使用 $|\Delta\text{IPSC}|(I_{\text{MR}})$ 参数使负光电流的绝对值曲线同正光电流曲线在形式上保持一致 (先上升后下降), 记忆保持计算如下:

$$I_{\text{MR}} = (I_t - I_{\text{off}}) / (I_{\text{max}} - I_{\text{off}}), \quad (1)$$

其中, I_t 表示 t s 后的 $|\Delta\text{IPSC}|$, I_{off} 表示初始电流, I_{max} 表示最大的 $|\Delta\text{IPSC}|$ 值, $|\Delta\text{IPSC}|$ 的恢复过程可以用 Kohlraush 拉伸指数函数来拟合^[30,31]:

$$I_{\text{MR}} = \exp \left[-(t/\tau)^\beta \right], \quad (2)$$

其中 τ 表示恢复时间常数, 其数值大小与器件的非易失性特性直接相关, 即器件在光照撤离后, 仍

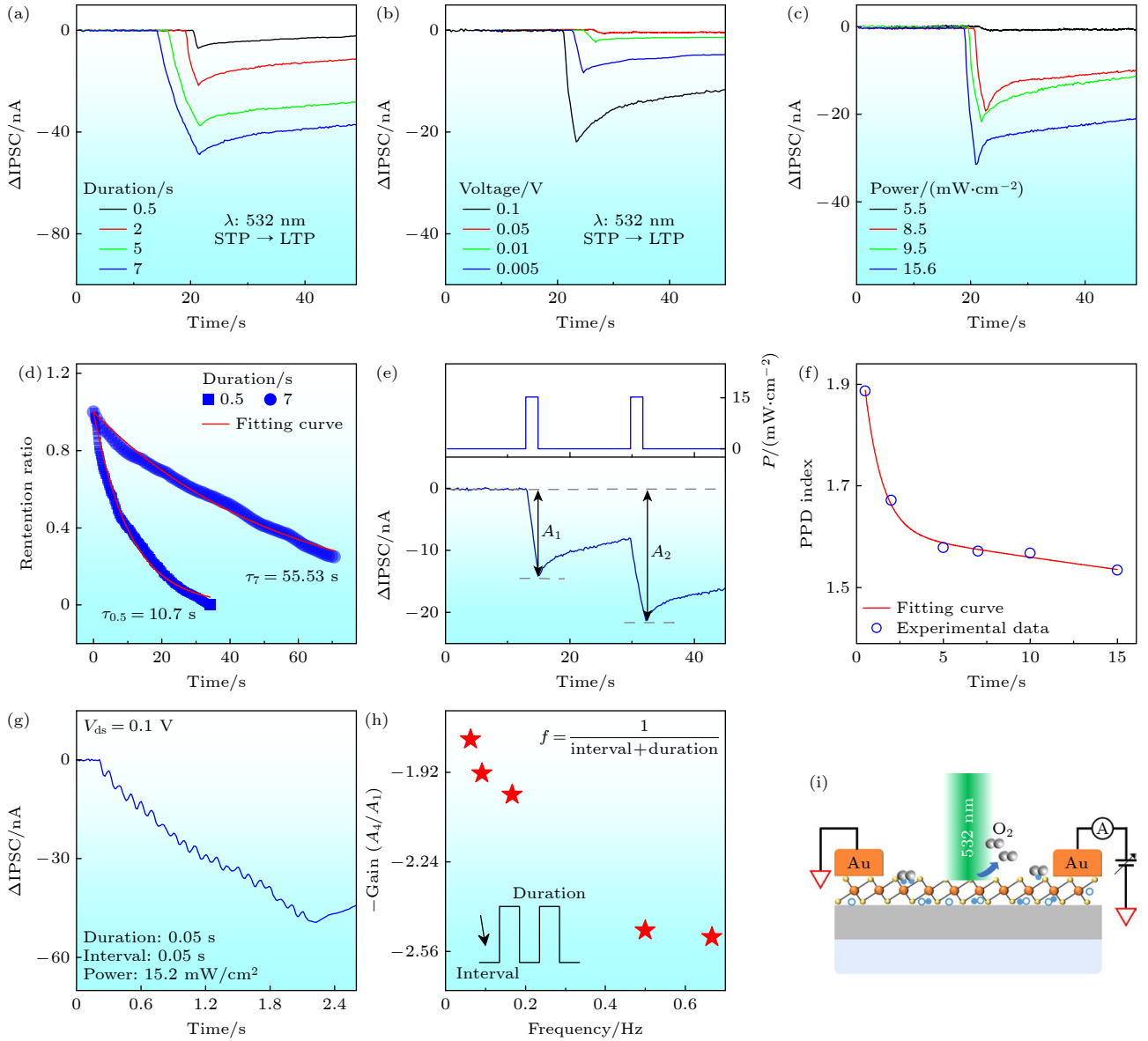


图3 PtSe₂光电突触的 Δ IPSC响应与光刺激 (a) 持续时间; (b) 光强; (c) 读取电压的关系; (d) 记忆保持特性曲线; (e) 两个连续的光脉冲诱导的IPSC; (f) PPD指数与脉冲间隔之间的关系; (g) Δ IPSC在20个绿光脉冲下的光响应; (h) 增益(A_2/A_1)与频率的关系; (i) NPC机理示意图

Fig. 3. Δ IPSC response and light stimulation of PtSe₂ photoelectric synapse: (a) Light duration time; (b) light intensity; (c) reading voltage; (d) curve of memory retention ratio; (e) the Δ IPSC triggered by two consecutive light pulses; (f) PPD index as a function of the interval of light pulse pairs; (g) Δ IPSC response under 20 green light pulses; (h) relationship between gain (A_2/A_1) and frequency; (i) schematic diagram of the NPC mechanism.

能长期保持器件状态或存储信息的特性, β 是拉伸系数. 通过拟合实验数据发现, 当光脉冲持续时间从 0.5 s 延长至 7.0 s, 恢复时间常数由 10.70 s 增至 55.53 s, 如图 3(d) 所示, 由此比较了突触长时程记忆 (LTM) 和短时程记忆 (STM). 光脉冲的持续时间越长, 恢复时间也越长 (高 τ), 这与人类视网膜特性类似, 越长时间的光刺激, 可以获得更长时间的视觉记忆.

PPD 是生物突触最重要的突触可塑性之一,

在实现高级学习和记忆方面起着重要作用. 如图 3(e) 所示, 在两个脉冲刺激下 (光强为 15.6 mW/cm², 持续时间 1 s, 间隔时间 15 s), 第 2 个脉冲刺激后的 $|\Delta$ IPSC| 高于第 1 个脉冲刺激后的 $|\Delta$ IPSC|. PPD 指数可以定量地描述为

$$\text{PPD} = \frac{A_2}{A_1} \times 100\%, \quad (3)$$

其中, A_1 和 A_2 分别表示第 1 次和第 2 次光脉冲诱导的 Δ IPSC. 利用 PPD 指数研究光电突触的 PPD

的间隔时间依赖性, 将具有不同时间间隔的两个连续光脉冲施加到 PtSe₂ 上, 如图 3(f) 所示, PPD 指数从 184% 下降到 149%. 采用双指数衰减模型对实验数据进行拟合^[32]:

$$Y = 1 + C_1 \exp(-\Delta t/\tau_1) + C_2 \exp(-\Delta t/\tau_2), \quad (4)$$

其中, C_1 和 C_2 分别是快速衰减阶段和缓慢衰减阶段的初始易化值, τ_1 和 τ_2 分别是快速衰减阶段和缓慢衰减阶段的特征弛豫时间. 拟合曲线 (红线) 与实验数据 (蓝点) 高度吻合, 表明 PtSe₂ 光电突触具有与生物突触相似的双时间尺度易化特性: $\tau_1 = 1$ s 的快相易化和 $\tau_2 = 100.1$ s 的慢相易化.

在光电突触系统中, 突触权重可以通过多个突触前脉冲序列实现单调调制, 该机制不仅在神经网络内信息的累积与传递中发挥重要的调控作用, 还与视网膜神经回路中的视觉记忆和图像识别所需的多脉冲协同作用密切相关. 为了研究多脉冲刺激下的突触可塑性, 采用 20 个重复光脉冲来评估 Δ I_{PSC} 的积累. 在图 3(g) 中, 应用绿光脉冲 (光强为 15.2 mW/cm², 持续时间 50 ms, 间隔时间 50 ms, 脉冲数为 20) 模拟突触前动作电位, 并得到相应的 Δ I_{PSC}. 相较于单次光刺激, 重复脉冲序列可以产生更高的 $|\Delta$ I_{PSC}|, 这一现象可归因于突触可塑性的巩固. 此外, 视觉信号会被分析和处理成不同频率的信号. 如图 3(h) 所示, 在固定脉冲数为 4 的条件下, 持续时间不变, 通过增大光脉冲的间隔时间来改变频率 (光强为 15.2 mW/cm², 持续时间 1 s), 实验结果表明增益 (A_4/A_1) 与频率呈正相关. PtSe₂ 光电突触展现的抑制性突触可塑性源于其 NPC 效应. 具体机制如图 3(i) 所示, 在常

压环境中, 氧气分子 (O₂) 通过物理吸附在材料表面, 从 PtSe₂ 中夺取电子, 导致 PtSe₂ 沟道中空穴载流子浓度增大. 当光脉冲照射到 PtSe₂ 表面时, O₂ 分子吸收能量发生脱附, 释放的电子与材料中的空穴复合, 导致电导率下降, 产生 NPC 效应. 撤光后 O₂ 分子重新吸附, 空穴浓度逐渐恢复, 电流响应呈现可逆的动态变化^[16].

3 基于 PtSe₂ 感知存储与特征提取

器件具有短程记忆和长程记忆特性, 依此可以进行特征提取. 为了探究光电突触器件的动态记忆特性, 模拟了一个 3×3 的突触阵列. 通过固定光强为 9.6 mW/cm² 的不同时长的光脉冲 (7 s 的光脉冲编码字母“T”, 0.5 s 编码字母“O”) 进行视觉信息写入. 用色阶和高度编码突触权重变化 $|\Delta$ I_{PSC}|. 在图 4(a) 中, 0.5 s 脉冲写入的字母“O”呈现快速衰减特性, 7 s 脉冲写入的“T”在相同条件下仍保持较高的幅值. 特别地, 当将字母“O”叠加写入“T”区域时, 交叉区域表现出增强的记忆保持能力. 这进一步比较了短程记忆和长程记忆的区别.

实验结果表明, 基于 PtSe₂ 的光电突触阵列表现出光脉冲持续时间的依赖性, 成功实现了 STM 和 LTM 以及两者之间的动态过渡. 在人类视觉系统中, STM 和 LTM 在过滤冗余噪声数据方面发挥着重要作用. 图 4(b) 显示了人类视觉系统中亮度特征提取过程示意图. 在这个过程中, 视网膜既充当传感器又能充当预处理单元. PtSe₂ 光电突触这种集成的传感和预处理功能显著提高了图像识别效率并降低了 NVS 延迟.

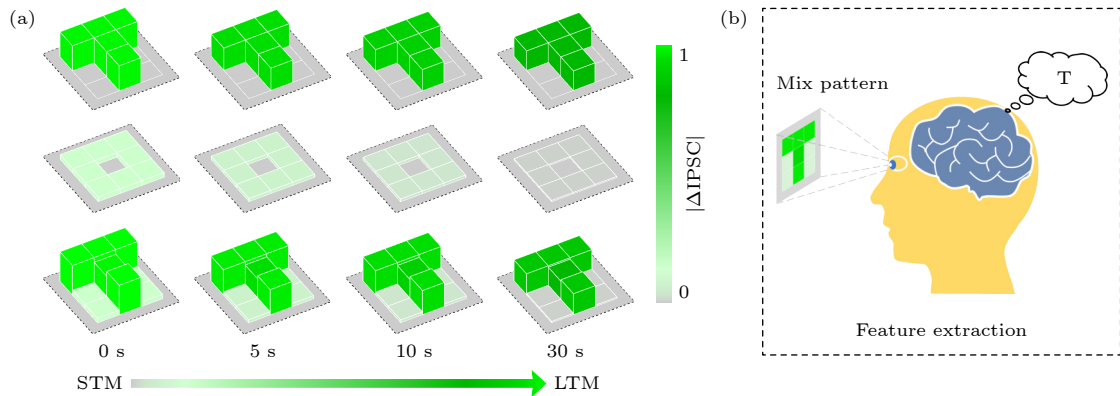


图 4 (a) 施加光脉冲后 0, 10 和 30 s 的 $|\Delta$ I_{PSC} 变化; (b) 人类视觉系统实现特征提取的示意图

Fig. 4. (a) Change of Δ I_{PSC} at 0, 10, and 30 s after the light is turned off; (b) schematic diagram of human vision system realizing feature extraction.

4 PtSe₂ 器件的神经形态视觉系统

4.1 图像预处理

视觉刺激不断增强,生物能够显著提高对视觉特征的辨识能力.随着脉冲数目不断增加,多脉冲连续刺激时突触后电流变化幅值 $|\Delta\text{IPSC}|$ 不断提高.将不同光脉冲数量对应的视觉目标映射到器件阵列上,通过提高目标与背景的对比度实现图片增强,从而提高视觉目标的识别准确率.使用单个器件作为像素单元来接收不同数量的光脉冲.通过掩膜的方法将图像“5”映射到突触阵列上,如图5(a)所示.随着脉冲数目的增加, $|\Delta\text{IPSC}|$ 逐渐增大,图5(b)为在10—100个脉冲刺激下 $|\Delta\text{IPSC}|$ 的变化(光强为15.6 mW/cm²,持续时间100 ms,间

隔100 ms).将不同数量的脉冲输入突触阵列,在初始状态下,光电突触器件 $|\Delta\text{IPSC}|$ 的归一化值为0,利用光电突触的属性来重新配置图像的灰度值,如图5(c)所示,数字“5”随着脉冲数量的增加而更加清晰,即目标与背景之间的对比度随着脉冲数量的增加而增强.结果表明,在反复的光学刺激后可以获得更深的印象,这类类似于人类的视觉.为了验证脉冲数目对识别精度的影响,使用MNIST作为研究对象,将图像灰度值归一化后和 $|\Delta\text{IPSC}|$ 值相映射,将 $|\Delta\text{IPSC}|$ 矩阵输入到如图5(d)所示人工神经网络(ANN,784-300-10)进行处理.图5(e)显示识别的准确率随着施加光脉冲数的增加而增大,这一结果表明,多脉冲可以不断增强NVS中对特定目标的识别.

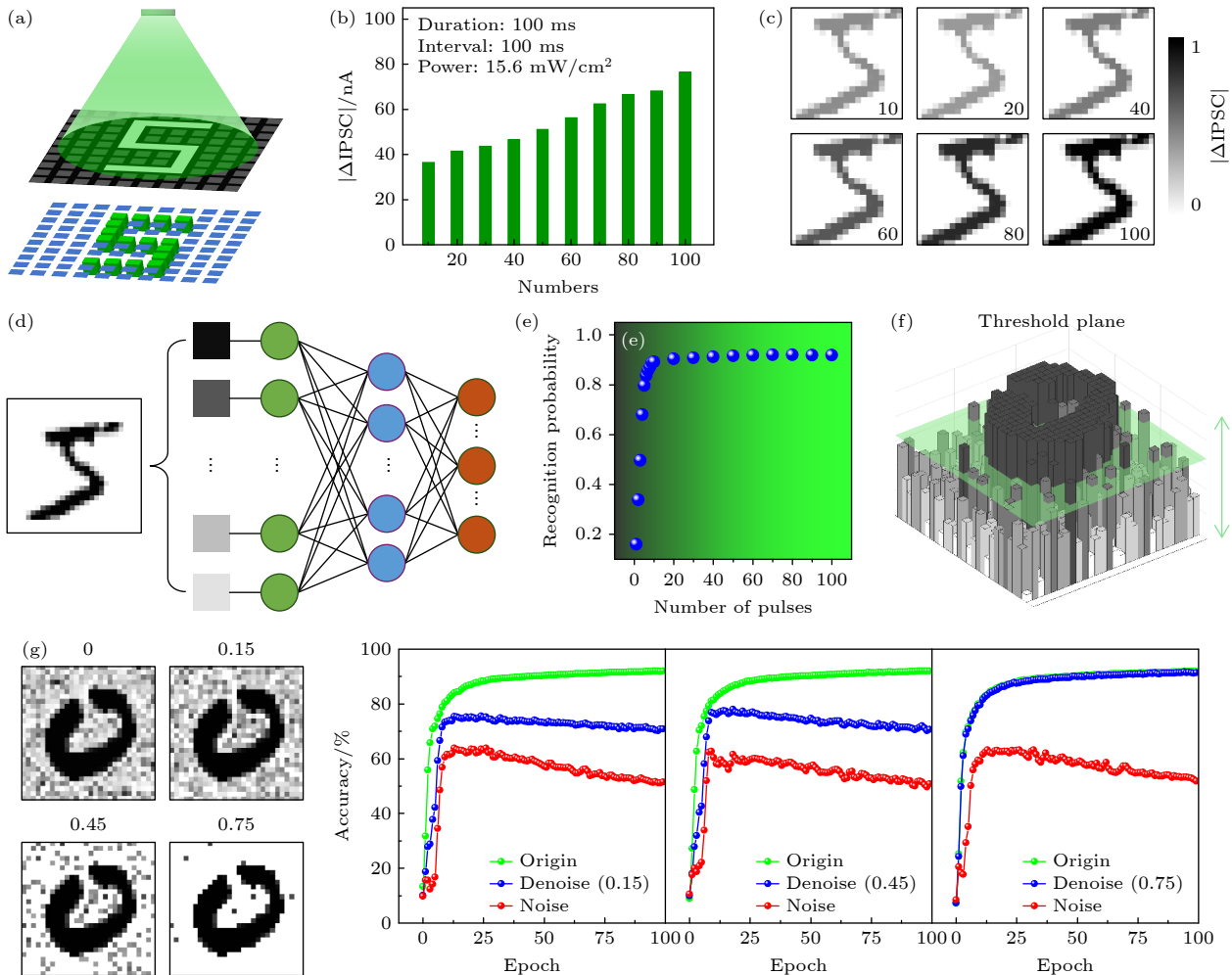


图5 (a) 将图像“5”映射到突触阵列的掩膜方法示意图; (b) $|\Delta\text{IPSC}|$ 与脉冲数目的关系; (c) 数字目标增强; (d) 人工神经网络(ANN); (e) 图像识别结果与光脉冲数量的关系; (f) NVS中的图像去噪; (g) 不同数据集上识别准确性的比较

Fig. 5. (a) Schematic diagram of the mask method for mapping the image ‘5’ to the synaptic array; (b) statistical information on the relationship between $|\Delta\text{IPSC}|$ and pulse number; (c) number recognition enhancement; (d) an artificial neural network (ANN) for processing image data; (e) relationship between image recognition results and the number of optical pulses; (f) image denoising in NVS; (g) comparisons of the recognition accuracy on different datasets.

环境噪声会影响视网膜对特定目标的识别精度. 针对复杂视觉环境中的噪声干扰问题, 利用 NVS 作为前端传感预处理单元, 以 ANN 作为图像处理单元识别预处理后的图像, 实现图像降噪、目标识别等功能. 将无噪声的原始 MNIST 手写数字集 (origin)、含噪声未经处理的 MNIST 手写数字集 (noise) 以及 NVS 降噪处理后的手写数字集 (denoise) 作为输入. 选择不同的阈值平面实现不同的图像过滤效果, 如图 5(f) 所示. 对过滤后的图像信息进行归一化并将其输入到 ANN.

从图 5(g) 可以看出, 未经去噪的 MNIST 手写数字集 (noise) 的识别准确率在 100 个 epoch 之后仅为 50% 左右, 表明 ANN 难以识别此类数据. 相比之下, 100 个 epoch 之后, 降噪后的数据集 (denoise) 的识别准确率提高到 91% 左右, 与无噪声的原始数据集 (origin) 识别能力基本相当, 明显高于去噪前的识别准确性, 这一结果表明, NVS 的传感器内预处理能力可以有效地提取信息, 减少冗余噪声数据, 并对数值图像进行准确识别.

4.2 图像逻辑运算

逻辑运算 (逻辑门) 是人脑进行决策能力的重要基础^[33]. 基于光电突触器件构建可编辑逻辑功能的光电调制策略, 实现动态逻辑运算, 可为神经形态设备提供高效决策能力. 因此利用 PtSe₂ 光电突触对 532 nm 绿光和 405 nm 蓝光的响应程度不同, 具有更高光子能量的蓝光能够激发更高的 $|\Delta\text{IPSC}|$, 设计多输入的光电突触逻辑门, 如图 6 所示, 输入“L1”和“L2”分别对应 532 nm 和 405 nm 的光脉冲, 输出由产生的电流决定, 4 种输入状态定义为 (0, 0), (1, 0), (0, 1), (1, 1)(无光照, 仅 L1 绿光, 仅 L2 蓝光, 双光协同), 其中“1”和“0”代表

光脉冲的有无. 因此, 光电突触中有 4 个输出电流. 通过设置不同的阈值, 实现“NOR”和“NAND”突触逻辑门. 注意到当输入为 (0, 1) 和 (1, 0) 时, 即仅有 532 nm 的绿光输入或 405 nm 的蓝光输入, 输出电流的差异较小, 但这并不影响后续的逻辑运算, 设定双阈值判别机制, 输出电流处于两个阈值之间时 (阈值 1 < 输出电流 IPSC < 阈值 2), 判定逻辑为 1, 从而实现异或门.

选取实际图像, 如图 7 所示, 输入的两张二进制制图像具有人类视觉无法区分的微小差异, 图像的逻辑运算主要作用是改变目标的形态以及提取图像中用于表示和描述形状的有用成分. 对输入的两张图片分别进行“NOR”, “NAND”和“XOR”操作, “NOR” (“NAND”) 逻辑操作增加 (减少) 不同的像素信息, 而“XOR”突出显示不断变化的信息, 定位图像中移动的车辆. 从概念上演示并验证了图像的膨胀、侵蚀和差异, 实现实际场景的逻辑运算.

图片逻辑运算展现了 PtSe₂ 光电突触在神经形态视觉处理中的独特优势, 器件功耗优化仍是实际应用的关键考量. 功耗计算的公式如下:

$$E = V_{ds} \times I_{peak} \times t, \quad (5)$$

其中, V_{ds} 是漏源电压, I_{peak} 是沟道电流的最大幅值, t 是光照的持续时间. 通过降低源漏电压或者缩短光脉冲时间可以降低器件功耗, 成功将单突触事件的最低功耗约为 0.111 nJ (0.001 V, 100 ms, 9.5 mW/cm²). 在表 1 中对比已经报道的光电突触的光响应方式和性能, 所设计的 PtSe₂ 光电突触器件在功耗上具有明显的优势, 此外, 在 532 nm 的可见光 (绿光) 刺激下, PtSe₂ 光电突触器件展现出高达 184% 的 PPD 指数. 在视觉传感、原位存储、图像识别和逻辑运算等神经形态计算领域具有广阔的应用前景.

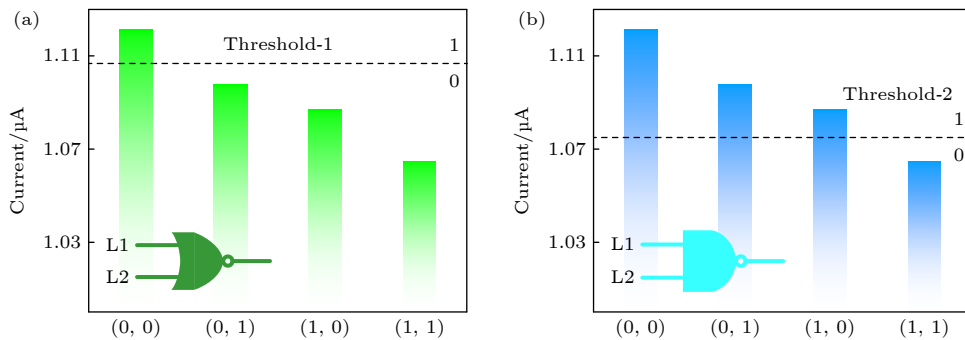


图 6 逻辑功能的实现 (a) “NOR”门; (b) “NAND”门

Fig. 6. Implementation of logic functions: (a) “NOR” gate; (b) “NAND” gate.

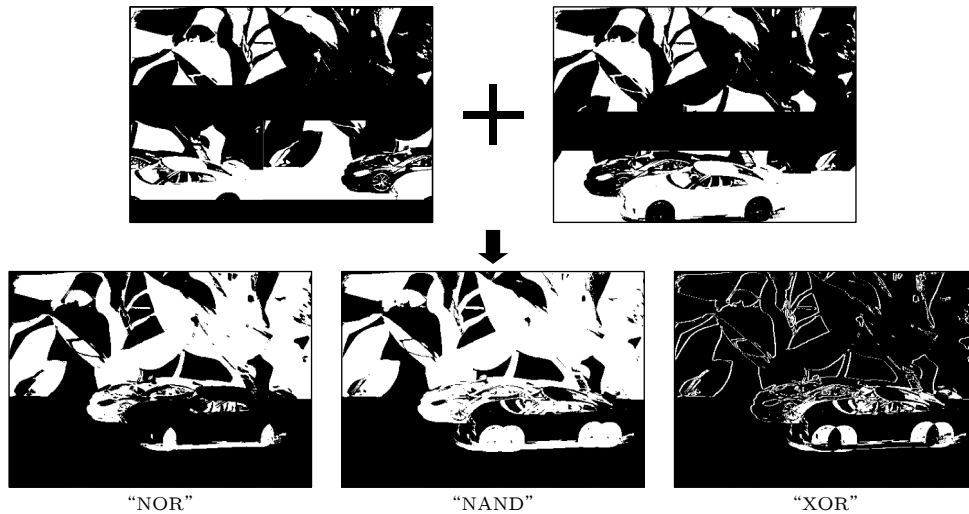


图 7 实际场景 (如移动的车辆) 图像的逻辑运算

Fig. 7. Logical operations of images of actual scene (such as a moving vehicle).

表 1 PtSe₂ 光电突触的结构与性能与近几年报道的光电突触的对比
Table 1. Device structure and performance of some reported photonic artificial synapses.

材料	PPC和NPC	波长/nm	功耗/nJ	PPF	应用	文献
Fe ₇ S ₈ /MoS ₂	PPC	365	1.2	116	感、存、预处理	[34]
(PEA) ₂ SnI ₄	PPC	470	15	130	感、存	[35]
MoS ₂	PPC	1570	50	130	感、存	[36]
TiN _x O _{2-x} /MoS ₂	PPC (电抑制)	365	450	137	感、存	[37]
PtSe ₂	NPC	532	0.11	184	感、存、预处理、图像逻辑运算	本文

5 结 论

综上所述, 设计了基于二维材料 PtSe₂ 的两端结构光电突触器件, 通过光控表面氧气吸附/脱附实现多功能突触可塑性调控. 器件展现出典型的 IPSC, STP, LTP 和 PPD 等生物突触关键特征. 比较了 STM 和 LTM 的动态调制; 基于该器件的 NVS 可以像人类视网膜一样从嘈杂的环境中提取重要特征, 实现了冗余噪声过滤功能, MNIST 手写数据集的识别准确率从 50% 提高到 91%, 得到预处理后的精简图片; 建立多输入逻辑门“NOR”, “NAND”和“XOR”, 实现图片的逻辑运算. 该器件的功耗计算为每个尖峰 0.111 nJ, 表现出明显的优势, 在图像识别、视觉传感等神经形态计算领域具有广阔的应用前景.

参考文献

[1] Zhou F C, Zhou Z, Chen J W, Choy T H, Wang J L, Zhang N, Lin Z Y, Yu S M, Kang J F, Wong H P, Chai Y 2019 *Nat. Nanotechnol.* **14** 776

[2] Mennel L, Symonowicz J, Wachter S, Polyushkin D K, Molina-Mendoza A J, Mueller T 2020 *Nature* **579** 62

[3] Wang G Z, Wang R B, Kong W Z, Zhang J H 2018 *Cogn. Neurodynamics* **12** 615

[4] Wei B, Chen Y B, Han X T, Kang Y, Liang B J, Li C, Yang X K, Liang F, Peng Y X 2025 *Sci. China Inf. Sci.* **68** 140406

[5] Choi C, Leem J, Kim M, Taqieddin A, Cho C, Cho K W, Lee G J, Seung H, Bae H J, Song Y M, Hyeon T, Aluru N R, Nam S, Kim D H 2020 *Nat. Commun.* **11** 5934

[6] Hou Y X, Li Y, Zhang Z C, Li J Q, Qi D H, Chen X D, Wang J J, Yao B W, Yu M X, Lu T B, Zhang J 2020 *ACS Nano* **15** 1497

[7] Chen Y B, Huang Y J, Zeng J W, Kang Y, Tan Y L, Xie X N, Wei B, Li C, Liang F, Jiang T 2023 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **15** 58631

[8] Li S Y, Li J T, Zhou K, Yan Y, Ding G L, Han S T, Zhou Y 2024 *Phys. Mater.* **7** 032002

[9] Lian H X, Liao Q F, Yang B D, Zhai Y B, Han S T, Zhou Y 2021 *Mater. Chem. C* **9** 640

[10] 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]

[11] Kang Y, Chen Y B, Tan Y L, Hao H, Li C, Xie X N, Hua W H, Jiang T 2023 *J. Materomics* **9** 787

[12] Lee G, Baek J H, Ren F, Pearton S, Lee G H, Kim J 2021 *Small* **17** 2100640

[13] Sun L F, Wang W, Yang H J 2020 *Adv. Intellig. Syst.* **2** 1900167

[14] Zhao M Y, Hao Y R, Zhang C, Zhai R L, Liu B Q, Liu W C, Wang C 2022 *Crystals* **12** 1087

- [15] Li C, Yang D L, Sun L F 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 218504 (in Chinese) [李策, 杨栋梁, 孙林峰 2022 物理学报 **71** 218504]
- [16] Li Z C, Wang H L, Wang H P, Li J, Qing F Z, Li X S, Xie D, Zhu H W 2024 *Nano Res.* **16** 10189
- [17] Wang Y, Liu E F, Gao A Y, Cao T J, Long M S, Pan C, Zhang L L, Zeng J W, Wang C Y, Hu W D, Liang S J, Miao F 2018 *ACS Nano* **12** 9513
- [18] Nakanishi H, Bishop K J M, Kowalczyk B, Nitzan A, Weiss E A, Tretiakov K V, Apodaca M M, Klajn R, Stoddart J F, Grzybowski B A 2009 *Nature* **460** 371
- [19] Wei P C, Chattopadhyay S, Yang M D, Tong S C, Shen J L, Lu C Y, Shih H C, Chen L C, Chen K H 2010 *Phys. Rev. B* **81** 045306
- [20] Ding L W, Liu N S, Li L Y, Wei X, Zhang X H, Su J, Rao J Y, Yang C X, Li W Z, Wang J B, Gu H S, Gao Y H 2015 *Adv. Mater.* **27** 3525
- [21] Guo N, Hu W D, Liao L, Yip S P, Ho J C, Miao J S, Zhang Z, Zou J, Jiang T, Wu S W, Chen X S, Lu W 2014 *Adv. Mater.* **26** 8203
- [22] Lui C H, Frenzel A J, Pilon D V, Lee Y H, Ling X, Akselrod G M, Kong J, Gedik N 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 166801
- [23] Yang Y M, Peng X Y, Kim H S, Kim T, Jeon S, Kang H K, Choi W, Song J D, Doh Y J, Yu D 2015 *Nano Lett.* **15** 5875
- [24] Zhao Y D, Qiao J S, Yu Z H, Yu P, Xu K, Lau S P, Zhou W, Liu Z, Wang X R, Ji W, Chai Y 2017 *Adv. Mater.* **29** 1604230
- [25] Hu X, Zhang H M, Liu Y W, Zhang S M, Sun Y Y, Guo Z X, Sheng Y C, Wang X D, Luo C, Wu X, Wang J L, Hu W D, Xu Z H, Sun Q Q, Zhou P, Shi J, Sun Z Z, Zhang D W, Bao W Z 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1805614
- [26] Choi C, Choi M K, Liu S Y, Kim M, Park O K, Im C, Kim J, Qin X L, Lee G J, Cho K W, Kim M, Joh E, Lee J, Son D, Kwon S H, Jeon N L, Song Y M, Lu N, Kim D H 2017 *Nat. Commun.* **8** 1664
- [27] Posch C, Serrano-Gotarredona T, Linares-Barranco B, Delbruck T 2014 *Proc. IEEE* **102** 1470
- [28] Luo Z D, Xia X, Yang M M, Wilson N R, Gruverman A, Alexe M 2020 *ACS Nano* **14** 746
- [29] Ohno T, Hasegawa T, Tsuruoka T, Terabe K, Gimzewski J K, Aono M 2011 *Nat. Mater.* **10** 591
- [30] George A, Fistul M V, Gruenewald M, Kaiser D, Lehnert T, Mupparapu R, Neumann C, Hubner U, Schaal M, Masurkar N, Arava L M R, Staude I, Kaiser U, Fritz T, Turchanin A 2021 *npj 2D Mater. Appl.* **5** 15
- [31] Chang T, Jo S H, Lu W 2011 *ACS Nano* **5** 7669
- [32] Li D Y, Li C M, Ilyas N, Jiang X D, Liu F C, Gu D E, Xu M, Jiang Y D, Li W 2020 *Adv. Intelligent Syst.* **2** 2000107
- [33] de Ronde W, ten Wolde P R, Mugler A 2012 *Biophys. J.* **103** 1097
- [34] Deng Y, Liu S H, Ma X X, Guo S Y, Zhai B X, Zhang Z H, Li M S, Yu Y M, Hu W H, Yang H, Kapitonov Y, Han J B, Wu J S, Li Y, Zhai T Y 2024 *Adv. Mater.* **36** 230940
- [35] Sun Y L, Qian L, Xie D, Lin Y X, Sun M X, Li W W, Ding L M, Ren T L, Palacios T 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1902538
- [36] Abnavi A, Ahmadi R, Hasani A, Fawzy M, Mohammadzadeh M R, De Silva T, Yu N N, Adachi M M 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 45843
- [37] Wang W X, Gao S, Li Y, Yue W J, Kan H, Zhang C W, Lou Z, Wang L L, Shen G Z 2021 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2101201

Mechanism, characteristics and sensing, storage and computing function of PtSe₂ photoelectric synaptic devices based on negative photoconductivity effect*

LIANG Bujia¹⁾ WEI Bo¹⁾²⁾ KANG Yan¹⁾ DOU Shuqing¹⁾
 XIA Yongshun¹⁾ GUO Baojun¹⁾ CUI Huanqing¹⁾
 LI Jia¹⁾ YANG Xiaokuo^{1)†}

1) (*Fundamentals Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China*)

2) (*College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

(Received 27 March 2025; revised manuscript received 23 May 2025)

Abstract

Machine vision, serving as the “eyes” of artificial intelligence (AI), is one of the key windows for AI to acquire external information. However, traditional machine vision relies on the Von Neumann architecture, where sensing, storage, and processing are separated. This architecture necessitates constant data transfer between different units, inevitably leading to high power consumption and latency. To address these challenges, a PtSe₂ photosynaptic device with negative light response is prepared. The device shows an inhibitory postsynaptic current (IPSC) under light pulse stimulation, and achieves optically tunable synaptic behaviors, including double pulse facilitation (PPD), short-range plasticity (STP), and long-range plasticity (LTP). In addition, by using a 3 × 3 sensor array, the device exhibits dependence on light duration, and the image in-situ sensing and storage functions are demonstrated and verified. By using 28 × 28 device array combined with artificial neural network (ANN), the integrated perception-storage-preprocessing function of visual information is realized. The experimental results show that the image after preprocessing (denoising) is trained for 100 epochs, and the accuracy rate reaches 91%. Finally, lasers with two representative wavelengths of 405 nm and 532 nm are chosen as the light sources in the experiment, and the *I-V* characteristic curve changes most under the blue light pulse of 450 nm, which is because the blue light has higher photon energy to produce negative light effect. Based on the different photocurrents of the device responding to different wavelengths of light, the photoelectric synaptic logic gates ‘NOR’, ‘NAND’ and ‘XOR’ are established, which enables image processing functions such as dilation, erosion and difference recognition. The device’s power consumption is calculated to be 0.111 nJ per spike. The research results indicate that the negative photoconductivity of PtSe₂ has great potential in simplifying information processing and effectively promoting applications, which will help promote more integrated and efficient NVS.

Keywords: PtSe₂, negative photoconductivity, neuromorphic visual system, sensing-storage-computing, image logic operation

PACS: 85.35.-p, 72.20.-i, 85.25.Hv

DOI: [10.7498/aps.74.20250403](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250403)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250403](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250403)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62274183).

† Corresponding author. E-mail: yangxk0123@163.com

基于负光电导效应的PtSe₂光电突触器件机理特性与感存算功能

梁卜嘉 危波 康艳 豆树清 夏永顺 郭宝军 崔焕卿 李佳 杨晓阔

Mechanism, characteristics and sensing, storage and computing function of PtSe₂ photoelectric synaptic devices based on negative photoconductivity effect

LIANG Bujia WEI Bo KANG Yan DOU Shuqing XIA Yongshun GUO Baojun CUI Huanqing LI Jia YANG Xiaokuo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 168501 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250403

CSTR: 32037.14.aps.74.20250403

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250403>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

面向感存算一体化的光电忆阻器件研究进展

Recent progress in optoelectronic memristive devices for in-sensor computing

物理学报. 2022, 71(14): 148701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220350>

仿生生物感官的感存算一体化系统

Bio-inspired sensory systems with integrated capabilities of sensing, data storage, and processing

物理学报. 2022, 71(14): 148702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220281>

应用于感存算一体化系统的多模调控忆阻器

Multimode modulated memristors for in-sensor computing system

物理学报. 2022, 71(14): 148502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220226>

神经形态阻变器件在图像处理中的应用

Application of neuromorphic resistive random access memory in image processing

物理学报. 2022, 71(14): 148504 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220463>

光电神经形态器件及其应用

Optoelectronic neuromorphic devices and their applications

物理学报. 2022, 71(14): 148505 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220111>

面向神经形态感知和计算的柔性忆阻器基脉冲神经元

Flexible memristive spiking neuron for neuromorphic sensing and computing

物理学报. 2022, 71(14): 148503 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212323>